

生きる建築へのアプローチ (その1) 建築は考える葦となりうるか

21世紀鋼構造フォーラムグループA

生きる	表情	治癒
動く建築	エネルギー循環	地域防災

1. はじめに

1.1 21世紀とは

地球は46億年前に誕生し、その5億年後に生命の源となる海ができた。更にその5億年後の36億年前のはるか昔に生命が誕生したのである。人類の誕生は数百万年前であり、生命の誕生からすればはるかに短い期間である。今を生きることにすべてがあるわけではない。長い生命の歴史からすれば今我々の生きている21世紀はほんの一瞬である。しかしそれは「遠い未来へ生命を受け渡す重要な瞬間」である。

1.2 建築技術の発展

様々な機械の発明による産業革命に端を発する大量生産技術とその供給体制の確立により、建築物の主要構造材料である鉄(鋼)及びコンクリートが、今日まで建築構造用材料の主流として使用されてきた。この発展を象徴とする20世紀に対し、21世紀の建築はどのような形で発展していくのか。

本論では、20世紀では完成に至らなかった建築物の進化した姿について、その1では人間の機能を建築に置き換えたとき、どのような発展性が残されているか、その2ではそれらのうち、鋼構造建築物に適用可能な機能について技術的検証を行う。

2. 現在の建築技術

2.1 地球と建築物

建築物とは本来、無機なるものであり、人間を含めた生物は有機なるものである。しかし、地球は無機物の集まりでありながら、それ自身がエネルギーを蓄え、まだ明らかにされていない機能を有している、いわば「擬似生命体」である。これまで、地球はこうしたエネルギーや豊富な資源を、我々地球上に存在する全てのものに対して提供し続けてきた。つまり、長年にわたり、地球上にあるすべてのものは、地球と共存してきたのである。

2.2 環境への対応

地球上の生物は、環境変化に対応していくために、時間をかけて進化を繰り返して生存し続けてきた。しかし急激な進化を行うことは難しいため、その代わりに、建築を含む技術を進歩させることで、大自然の脅威から身を守ってきたのである。その結果副作用として、地球環境を悪化してきたことに気がついてきた。

2.3 既存概念からの脱却と生きる意味

建築物は無機なるものである限り、擬似生命体である地球の発する大自然の脅威、その代表格である

地震や台風、洪水などに対して、受け身の存在でしかありえない。擬似生命体との関係をうまく保つためには、建築物を「無機なるもの」から「擬似生命体」に昇格させるという、これまでとは違った概念を建築物に持たせる必要がある。

建築物は、これまでの既成概念から解き放たれることにより、大いに進化する可能性を秘めている。

3. 21世紀の処方箋 「生きる」

3.1 Thinking Reed 概念の導入

生物と無生物は、「自己複製」と「物質とエネルギーの代謝」を行なう点で区別できるとされている。生物は自らの意志によって活動(Action)を起こすことにより、受け身としての存在からの脱却を図ることができる存在である。ただ生きながらえるのではなく、「知性を持った擬似生命体」として生きる建築物の未来像を想定し、論じていく。

21世紀は、前世紀の「機械文明」から「知能/環境文明」への転換の時期である。建築にも動物や植物のように「生きる」ものとして魂を吹き込み「生きる」状態の具現化を図る。動かない財産「不動産」と呼ばれる建築物は本当に動けないのか。建築物は、人間が家族との共同生活を行うように、ごく一般的に協力しあって成立することはできないのか。

これらを解決するための1つの方法として、人間の機能に置き換えて建築物を考えること、すなわち、建築物を我々人間と同じく、「生きる」ものと捉えることを試みる。

3.2 「生きる」建築物の機能構成

建築物を機能毎に図1及び以下のように分類する²⁾。

- | | |
|-----------------|------------|
| ①外殻 (Skin) | : 内外分離機能 |
| ②主架構 (Backbone) | : 恒久機能 |
| ③内部空間 (Organs) | : 変容機能 |
| ④付加装置 (Fuse) | : 損傷制御機能 |
| ⑤損傷探知 (Sensor) | : 情報感知伝達機能 |
| ⑥生きる (to Live) | : 擬似生命体機能 |

20世紀までの建築物は、Skinにより建築物と周囲との環境を分離し、かつデザイン性を持たせ、Backboneにより恒久的な安全性を確保し、Organsを持つサブストラクチャーにより内部の空間を自由に変容させ、Fuseにより損傷を制御することまでが可能であった。

21世紀の「生きる」建築物は、今までの建築物の機能に加え、活動するためのエネルギーを自然界から受容し Organs に蓄え、外部からの情報を検知し、内部の損傷を感知伝達する Sensor を備え、更

には Fuse をよりパッシブに機能させることで外乱に対し建築物の損傷を制御する。これらの機能を備えることで、あたかも生命を与えられたような擬似生命体「生きる」建築物が構築される。我々が産み出した 21 世紀の「生きる」建築物は、我々に対してこれまでにない可能性を提供してくれるはずである。

4. 未来の技術

4.1 未来の建築技術

「生きる」建築物のイメージを図 2 に示す。

(1) 表情のある建築物

- ・光、風、音、熱、応力等に応じて色変化のある材料（装飾的、損傷・疲労度の明示）
- ・「魅せる」接合

(2) 治癒（自己保存）能力をもった建築物

- ・自身で損傷を感知し、修復する自己修復システム（形状記憶合金、インテリジェントコンクリート）
- ・損傷をセンサーにより感知し、補修をうながすシステム（色変化・ひずみ感知塗料、複合材）
- ・水の循環や Sensor による温度調節システム

(3) 動く建築物

- ・形状変化によって用途変化に対応する建築物
- ・2 足歩行ロボットのような重心移動による転倒防止機能をもった建築物
- ・風に対し翼の形状や角度を変化させることで外力低減できる建築物
- ・センサーにより外力を感知し、リニアモーター等の超電導により建築物または人工地盤を宙に浮かすアクティブ免震システム
- ・伸縮・着脱が容易な構造物

(4) エネルギーの蓄積および地域共有

- ・外壁風力発電のような自然エネルギーを効率よく蓄積するシステム
- ・地震の振動エネルギーをコントロールすることによりエネルギーを蓄積するシステム
- ・落雷エネルギーの蓄電システム
- ・人工地盤上に建築物を構築することによる地域防災制御システム

(5) その他

- ・ナノテクノロジーを利用した高強度かつ軽量の鉄
- ・炭素繊維を利用した高強度部材（複合部材）
- ・4 次元 CAD による仮想建築システム
- ・リユースを想定した構法・材料の規格化、ユニット化

4.2 未来に向けて

ここまで生きる建築物単体の可能性を示した。生きる建築物があり、個々の機能が発展して、特徴をもった建築物が有機的に効率よく連動することが可

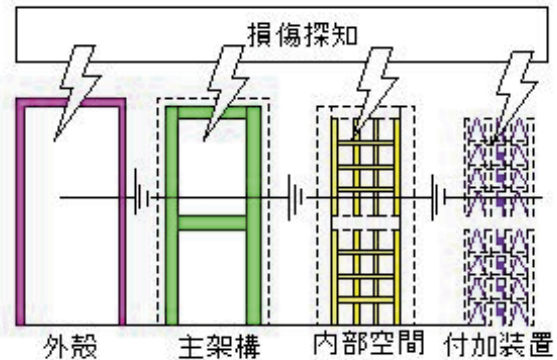


図1 生きる建築物の機能構成

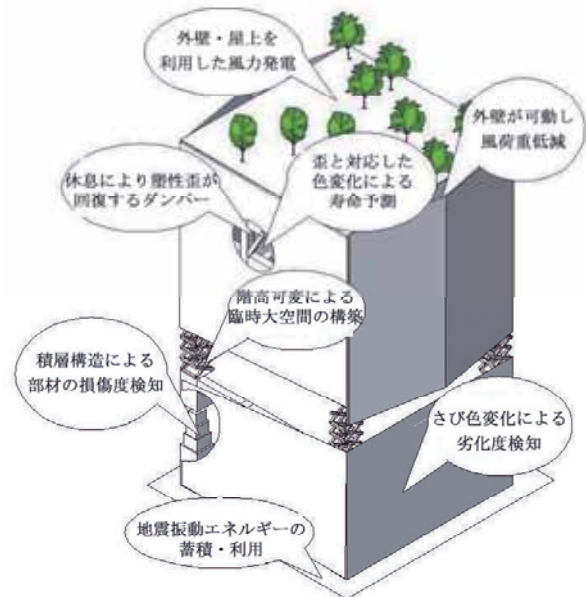


図2 「生きる」建築のイメージ

能になれば、地域としてさらによいものが得られるはずである。これまで個別に発展してきた耐震、耐風技術は、そのまま特定地域の（人工または天然の）地盤に対して応用することで、建築物の新しい形が生まれるものと推測できる。これを地域防災制御と呼ぶことにすると、これは、地域での防災制御だけでなく、エネルギー共有、さらには個々の構造体の単純化、というところまで発展していく可能性を秘めたものになるであろう。

参考文献

- 1) 鈴木啓三：エネルギー・環境・生命－ケミカルサイエンスと人間社会－、化学同人、1990
- 2) Organic Structural System Utilizing Mega-Sub Control Mechanism : Akira MITA and Yoshio KANEKO, A New Direction in Seismic Design, Tokyo, 9-10 October 1995

生きる建築へのアプローチ (その2) 鋼構造への適用と技術的検証

21世紀鋼構造フォーラムグループA

色彩可変
可動構造

自己診断
塗 装 材

自己修復
複合部材

1. はじめに

その2では、その1で提案された「生きる建築のイメージ」で示されたシステムのうち「色彩可変」「自己診断」「自己修復」「可動」について、現時点で鋼構造への適用性の高いと思われる現状技術の検証と適用可能性について述べる。

2. 色彩可変

2.1 色彩可変システムの提案

外乱（地震、風、積雪、熱、光等）に反応して、鋼材の表面の色を変化させることができれば、様々な用途での利用可能性が生まれる。構造物を対象と考えるならば、構造安全性検知としての利用可能性や装飾効果としての利用が考えられる。

しかし、応力等に反応して鋼材自体の色を変化させるのは、現状技術では、かなり困難なものと考えられる。一方、様々な外乱に対して色や形が変化する塗料や、鋼材の表層面に様々な機能を持たせた材料を接着させて複合部材（または合金）として同様の機能を持たせる方法は、実現の可能性が比較的高いと考えられる。

以下に、塗装材及び複合部材に関する技術的検証とさびの発色の利用可能性について述べる。

2.2 現状技術的検証と適用可能性

2.2.1 塗装材による損傷（応力）検知

文献1)では、地震後の鉄骨部材の損傷程度を、さび止め塗料の剥離状況により推定可能かどうか調べている。0.2%程度のひずみから塗料の剥離が観察され、損傷を受けていることは把握できるが、ひずみ量を正確に同定するのは現状では、やや困難と思われる。さび止め機能以外に、ひずみ検知としての機能も持つ塗料（剥離開始のひずみが異なる塗料）を開発すれば、それを梁端部等の損傷を受ける部位に数種類塗布することで、ひずみ量をより正確に検知できるようになる（図1参照）。

2.2.2 表層面に別の材料を接着させた複合部材

フィルムやシート等の添付または接着による複合材を開発し、表層面には鋼材では実現できない機能を持たせることによって、部材の色彩可変機能を代替できると考えられる（図1参照）。このような複合部材では、ひずみや熱に対して何らかの変化が視覚によって確認できる材料を接着させることで対応させることになる。この材料に、太陽光を吸収させて、夜、発光させるというようなことは、可能性があると考えられる。このような複合材は、ひずみ検

知や装飾効果以外にも、補強材としての使い方も考えられ、床振動音減衰材としての複合部材は、すでに実用化されている。

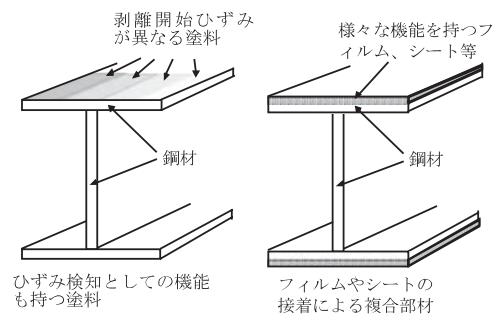


図1 塗料、フィルム等による損傷検知

2.2.3 さびの色の制御

鋼材に発生するさびの色として、白、黒、黄、淡褐色、オレンジ、赤、褐色、緑などがある²⁾。1つの鋼材で、年数を経るとともに、これらの色を次々と発色させることができれば、装飾効果や、より詳細な経年劣化検知に利用できる可能性がある。

3. 自己診断

3.1 自己診断システムの提案

柱、梁、床、壁といった構造体の疲労度や損傷度を検知するシステムがあれば、たとえ仕上げ材で覆われていても、迅速かつ信頼性の高い検査が可能となる。これにより、大事故になる前に検知した状況に応じた補強措置や適切な安全対策を施すことができる。

3.2 現状技術的検証と適用可能性

すでに航空機の外壁パネル等に用いられている技術で、複合材積層板の層間に格子状の光ファイバーセンサーを配置している³⁾。光ファイバーセンサーは、温度・ひずみに敏感で、耐電磁干渉性にも優れる。他に、損傷発生に伴う動的現象への応答に優れた圧電セラミックスや多点の情報を利用して損傷位置の特定を行う piezo（圧電）フィルム等がある。また、磁場や電場をかけると見掛けの粘性が増大する性質をもった磁気・電気粘性流体も制御機能をもたせるのに有効である。圧電材料等で自然エネルギーによる発電機能を持たせたり、内部層に、粘性流体をいれて減衰を調整したり、図2に示すように透水層を設け水を循環させることで耐火被覆や断熱を不要とするなど、積層構造の各層に様々な機能を併せ持たせることで幅広い利用が可能となる。

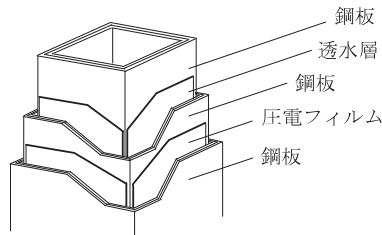


図2 鋼管柱への適用

4. 自己修復

4.1 自己修復システムの提案

地震時に鋼部材に発生するひずみを除去したり、亀裂や破断を防止できるような機能を材料自体に持たせることができれば、鋼構造物の耐震設計に対して、極めて有効な手段となりえる。ここでは、そのような特性を持つ鋼材について紹介し、その適用可能性を探る。

4.2 現状技術の検証と適用可能性

4.2.1 トリップ鋼

図3に示すようにトリップとは、室温で、原子の結晶構造としての準安定のオーステナイト（面心立方格子）が、引張によりくびれが生じて、マルテンサイト（体心立方格子）に変わる（加工誘起マルテンサイトと呼ぶ）現象である⁴⁾。それによって、くびれた部分の強度が増加し、そこでは変形が進行せず、他の部分で変形が進行し、結果として大きな均一伸びが得られる。

このような性質の鋼材を、地震時に塑性化する部分の構造用の鋼材として利用することによって、大きな耐力と変形能力が得られ、これまでよりも経済的な断面設計への可能性が考えられる。

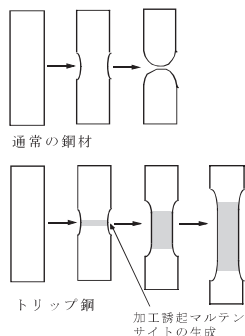


図3 トリップ鋼の概念図

4.2.2 形状記憶合金

形状記憶合金を構造物の耐震要素として利用するための研究はすでに進んでいる。材料特性⁵⁾、筋かい⁶⁾、半剛接合部のボルト、梁の主筋及びアンカーボルトとしての利用可能性等が検討されている。現状では30mm程度の径が最大である。より大断面での製造が、利用拡大につながると思われる。これらの部材が、大地震で塑性化した後にひずみが除去

されれば、エネルギー吸収部材として大きな効果が期待できる。

5. 可動

5.1 可動システムの提案

建物の形状を変化させることができれば、受光面を常に太陽に向けたり、図4に示すように受風面を調整して建物に作用する外力を低減したり、用途に応じて階高やスパンを変化させる等様々な利用可能性が広がる。

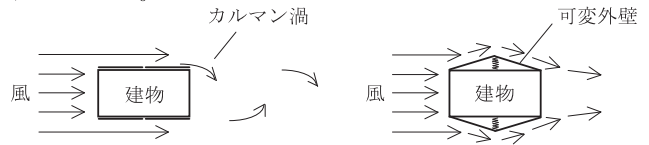


図4 可変構造の適用

5.2 現状技術の検証と適用可能性

小さく折りたたんで大きく展開できるシザースシステム⁷⁾やトラスの一部が伸縮する可変形状トラス⁸⁾等の形状を変化させることのできる既存技術は確立されているが、規模が大きくなり荷重条件が厳しくなると、動力部の納まりと部材剛性および強度の確保が必須条件となり、如何に適用していくかが今後の課題であると考えられる。

また、増築や改修工事においてエレベータ等の部材搬入路の制限を受けることが多く、仮設部材だけでなく本設部材に対しても、コンパクトに折りたたんで使用場所で大きく広げる技術の適用は新たな施工方法に結びつくものと考えられる。

6. まとめ

現状技術に着目し、実現性のあるものとして「生きる鋼構造」の幾つかの提案を示した。今後は、ナノテクノロジーの発展により新たなインテリジェント材料が開発され、よりヒューマンライクな利用法が実用化されることを期待する。

参考文献

- 1) 西山功、他：さび止め塗装の剥離状況による鋼材の損傷度評価、日本建築学会大会梗概集 C-1、pp315-316、1999.9
- 2) 三澤俊平：さびサイエンスと耐候性鋼さび層研究進歩、ふえらむ Vol.6(2001)No.5
- 3) 日本機械学会編：「インテリジェント技術 材料・構造」、日刊工業新聞社
- 4) 牧正志：鋼の加工熱処理の最近の動向、熱処理 37 巻 1号、平成9年2月
- 5) 福田俊文、北川良和、守護嘉朗：Ni-Ti系形状記憶合金の応力歪み特性、鋼構造年次論文報告集、第9巻、pp141-144、2001.11
- 6) 大井謙一、他：超弾性筋かい・履歴型ダンパー併用構造の耐震性能、鋼構造年次論文報告集、第9巻、pp397-404、2001.11
- 7) 日経B P社：「日経アーキテクチャー 2002.8.19」
- 8) 井上文宏、栗田康平、古屋則之、汐川孝、名取通弘：可変形状トラスを用いた可動型構造物の適用実験、第9回建設ロボットシンポジウム論文集、pp.259-266、July 2002

3.2 21世紀鋼構造フォーラムBグループ提案—進化する鋼構造

①着脱可能な接合部の探求

②次世代接合部を有するユニバーサル鉄骨架構の提案

「進化」のキーワードに対する具体的な構造性能を、階高・床面積・建築物の高さの変更を可能とする性能または再利用を可能とする性能であると考えた。そしてそれらを実現する技術・工法は、架構の組み立て作業および解体作業を容易にするものつまり接合に工夫を凝らしたものとすることが必須であろう。

そこで、他分野における着脱可能な接合部の鋼構造建築部への適用可能性を検討すると共に着脱可能な接合方式を有する新鉄骨架構の提案を試みた。

着脱可能な接合部の探求

21世紀鋼構造フォーラムグループB

地球環境
接合

進化
着脱可能

可変性
解体

1. 緒言

1.1 背景

建築は地球環境に多大な負荷をもたらしており、その改善が強く求められてきている。建築には実現、運用、除却などに関わる営みを多く含んでいるため、地球環境を保全するために克服すべき課題は多い。

2000年6月に日本建築学会等が「地球環境・建築憲章」を発表している¹⁾。21世紀の建築創造に対する以下の5つの目標を掲げ、取り組むことを宣言したものである。

1) 長寿命, 2) 自然共生, 3) 省エネルギー, 4) 省資源・循環, 5) 継承

上記目標のうち、1)と4)については構造が果たせる役割がとくに大きいと考えられる。本論文では、この目標を達成するために必要となる、鋼構造建築における接合部の「進化」の可能性について考えてみたい。

1.2 “進化”の方向性・手段

建物の寿命は、社会環境の変化や用途変更によって決まる場合が多く、「長寿命化」する場合はこのことを考慮する必要がある²⁾。具体的には、階高・床面積・建物高さの変更を可能にすることである。一方、仮設シアターやショッピングセンター、テナント商業ビル等の中には、使用期間を短く限定した建物が多く、その要求される使用期間、機能、性能等に応じて、「再利用化」できる場合もある³⁾。したがって、拡張や再利用を考慮した、現状よりも「進化」した技術・工法が必要となる。例えば、目標1)と4)を達成するために必要な技術として、柱・梁骨組の組立作業および解体作業を容易にすること、つまりは、部材と部材をつなぐ「接合」に工夫を凝らすことが挙げられる。

現在の鋼構造・鋼製品における接合の方法は、機械的接合、溶接および接着など図1に示すように多岐

にわたっている。どの接合方法を採用するかは対象となる部品の形状、材質あるいは表面状態などから選択されている。鋼構造建築分野の接合では、溶接に属する融接と機械的接合に属するボルト接合が主流となっている。ただし、これらの接合方法は接合部の解体容易性を必ずしも考慮したものはなっていない。さらに、溶接については、溶接工の高齢化に伴う人員不足、ボルト接合については、接合部の重量増加等の大きな問題を抱えている。

一方、「進化した」新しい接合方法に考慮しなければならない性能は、作りやすさ・外しやすさなど”施工時”に求められるものと安全・安心など出来上がった”製品（接合部）”に求められるものに分けられる(図2)。目標1)と4)を達成するためには、前者に重きを置くことになる。すなわち、前述のように組立作業および解体作業を容易にすること＝”容易に着脱可能な接合”とすることが、鋼構造建築の接合部を「進化」させるための重要課題となる。

そこで以下では、着脱可能な接合技術をいくつか取り上げ、定性的に評価するとともに、鋼構造建築分野への適用可能性について検討する。

2. 着脱可能な接合部

2.1 着脱可能な接合技術

他の分野で行っていることを真似ることは、自分の分野では独創となりうる。そのような観点から他分野における”着脱可能な”接合技術を調査し、鋼構造建築分野への転用・応用が可能かどうかについて検討し、新しい接合方法への”進化”の足掛かりとした。

他分野技術を探索した結果、具体的な技術として表1に掲げるものが見つかった。それらの技術は「嵌合系」、「摩擦系」、「接着系」の3つに分類できる。なお、他にも適用が可能と考えられる技術もあった

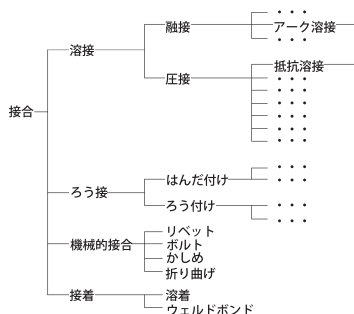


図1 接合の種類

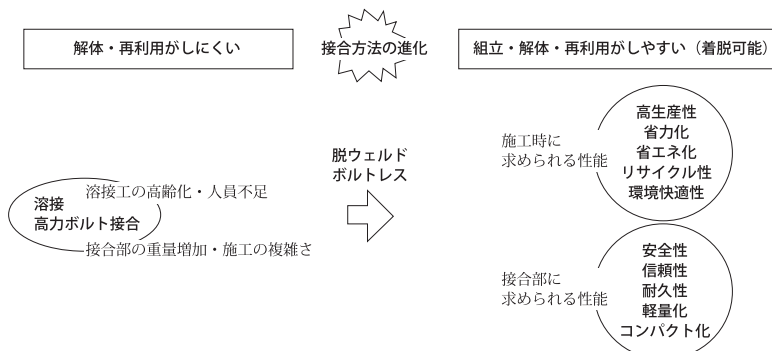


図2 建築分野の「接合方法」の進化

が、建築物に導入した際に重大な障害を引き起こす可能性が考えられるものは除外した（例えば、「マグネット」は電波妨害を起こす可能性がある）。

2. 2 接合部の評価

表1に示した他分野における接合技術を、「構造適応性」と「現場適応性」の2つの観点から評価する。

「構造適応性」については、適用する接合形式を図3のように想定し、評価を行った。Type-Aは継手タイプの接合を、Type-Bは仕口タイプの接合を、Type-Cは床材・壁材などの面材と柱材（梁材）の接合を想定している。それぞれのTypeの接合形式に対して表1の接合技術には構造的な見地から得手・不得手があるが、その適応性をまとめると表2のようになる。

続いて「現場適応性」について示す。表4に、各接合技術を表3に示した評価基準に基づいて評価したものを示す。また、それぞれの特徴および適用接合形式も同表に合せて示した。なお、各接合要素の評価ポイントは当グループの委員（6名）が各評価項目に対して3段階評価（良い：3点、普通：2点、悪い：1点）したポイントの平均点である。

評価が高い接合技術は「ワンタッチコネクタ」、「締付けリング」、「ホック」でいずれも「嵌合系」の接合部であった。これらの接合技術を想定する接合形式に対して適宜組合せて適用すれば、目標1）、4）の

目標に叶った接合部が実現できると考えられる。一例として、「次世代接合部を有するユニバーサル鉄骨架構の提案」論文で示される、建物形状に可変性を持つ新鉄骨架構への適用が挙げられる。

3. まとめ

建物の組立・解体を考慮し、着脱可能な接合技術をいくつか取り上げ、定性的に評価を行った。その結果、「嵌合系」の接合技術が評価が高く、適用範囲が広いことがわかった。

参考文献

- 1) 地球環境・建築憲章委員会：「地球環境・建築憲章」パンフレット，2000年6月
- 2) 日本機械工業連合会・日本鉄鋼協会：平成11年度 循環型社会における金属系材料の在り方に関する調査研究報告書，2000年3月
- 3) 平石澄夫，飯塚信一，齋藤美佐男：「西松式リユース鉄骨工法（N-RUSS工法）の開発，鉄構技術，Vol.15，No.172，pp26-pp30，2002年9月
- 4) 日経アーキテクチュア2002 5-27：プロジェクトナビ「邑楽町庁舎は山本理顕氏の伸縮自在なシステムに」，第719号，pp32，2002年5月

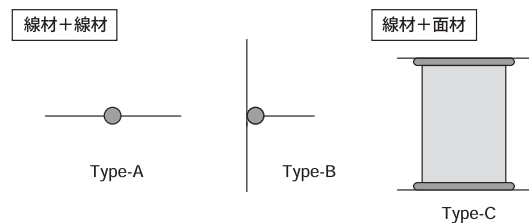


図3 想定する接合形式
表3 評価基準

表1 着脱可能な接合技術

嵌合系	ワンタッチコネクタ	ホック	ジッパー	マジックテープ	締付けリング
摩擦系	締付けリング	圧着ベルト			
接着系	はんだ	粘着テープ			

表2 想定する接合形式への構造適応性

		嵌合系	摩擦系	接着系
接合形式	Type-A	適	適	不適
	Type-B	適	適	不適
	Type-C	適	可	適

表3 評価基準

接合部に関する評価基準	具体的項目
①施工性	スキルレスである。管理項目が少ない。着脱が容易である。
②環境条件作用	油脂類・溶剤に耐える特性を持つ。耐熱性、耐水性、耐腐食性がある。
③検査	検査が容易かつ確実に行える。

表4 各種着脱可能な接合技術の現場適応性

接合形式	ワンタッチコネクタ	ホック	ジッパー	マジックテープ	締付けリング
1) 施工性	3.0	3.0	3.0	2.7	3.0
2) 環境条件作用	3.0	3.0	3.0	2.7	3.0
3) 検査	3.0	3.0	3.0	2.7	3.0
特性	ワンタッチコネクタは、ワンタッチで簡単に着脱できる。また、ワンタッチコネクタは、ワンタッチで簡単に着脱できる。また、ワンタッチコネクタは、ワンタッチで簡単に着脱できる。	ワンタッチコネクタは、ワンタッチで簡単に着脱できる。また、ワンタッチコネクタは、ワンタッチで簡単に着脱できる。また、ワンタッチコネクタは、ワンタッチで簡単に着脱できる。	ワンタッチコネクタは、ワンタッチで簡単に着脱できる。また、ワンタッチコネクタは、ワンタッチで簡単に着脱できる。また、ワンタッチコネクタは、ワンタッチで簡単に着脱できる。	ワンタッチコネクタは、ワンタッチで簡単に着脱できる。また、ワンタッチコネクタは、ワンタッチで簡単に着脱できる。また、ワンタッチコネクタは、ワンタッチで簡単に着脱できる。	ワンタッチコネクタは、ワンタッチで簡単に着脱できる。また、ワンタッチコネクタは、ワンタッチで簡単に着脱できる。また、ワンタッチコネクタは、ワンタッチで簡単に着脱できる。
適用接合形式	Type-A, B	Type-A, B	Type-A, B	Type-A, B	Type-C

接合形式	圧着ベルト	粘着テープ	はんだ	その他
1) 施工性	2.0	2.0	2.0	2.0
2) 環境条件作用	2.0	2.0	2.0	2.0
3) 検査	2.0	2.0	2.0	2.0
特性	圧着ベルトは、圧着力で簡単に着脱できる。また、圧着ベルトは、圧着力で簡単に着脱できる。また、圧着ベルトは、圧着力で簡単に着脱できる。	粘着テープは、粘着力で簡単に着脱できる。また、粘着テープは、粘着力で簡単に着脱できる。また、粘着テープは、粘着力で簡単に着脱できる。	はんだは、はんだで簡単に着脱できる。また、はんだは、はんだで簡単に着脱できる。また、はんだは、はんだで簡単に着脱できる。	その他は、その他で簡単に着脱できる。また、その他は、その他で簡単に着脱できる。また、その他は、その他で簡単に着脱できる。
適用接合形式	Type-C	Type-C	Type-C	Type-C

次世代接合部を有するユニバーサル鉄骨架構の提案

21世紀鋼構造フォーラムグループB

可変性
接合

持続性
360度

着脱可能
ユニット化

1. 緒言

成熟化社会を迎えた21世紀となった現在、地球環境負荷低減における対応は、個人レベル以上に生産者企業が主体となって取り組むべき大きな課題である。その対応に呼応するように建設業界も大きな転換期にあり、図1に示すように建築物に対する社会的概念が「A」から「B」に変化している。この変化は、環境負荷低減と同時に、建築物が社会的変化の乏しい中での不動産価値であったものを、多様な社会変化に対して時間軸を有した動産価値として評価していく意識の表れとも考えられる。

一方、建築物における構造体は、基本的には「要素」（種々の材料）を「加工」して「結合」（鉄骨造においては溶接等、コンクリート造においては鉄筋を含むセメントの硬化）するという構成方法に還元できる。そこでこの3つの構成方法の中から図1の「B」の概念を有し、環境負荷低減・動産価値評価の観点から、従来の技術を革新する効果的な着目点と考えた場合、「接合方法」が第1にあげられる。特に鋼構造建築物においては、溶接・ボルト接合が一般的で、逆にそのことが21世紀の課題解決を阻むと予想される。他分野を含めた接合方法の分析は、「着脱可能な接合部の探求」の論文において建築分野における応用を示唆しているので参照することとし、本論文では、次世代接合部を含めた実現可能な新鉄骨架構の提案を試みる。

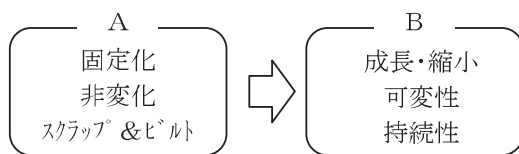


図1 建築物に対する社会的概念の変化

2. 提案

2.1 次世代接合を含む架構への要求について

次世代接合部を含む架構への要求は上記「B」の概念を満足するものと考えると以下のような項目があげられる。

- ・容易な接合と同時に分解可能
- ・架構形態の自由な構成が可能
- ・単位部材によるシステム構成
- ・運搬・施工の容易性
- ・部材の伸長・縮小性
- ・軽量化

以上の項目はお互いに独立した項目ではなく、求める具体案は、同時に満足するものでもあり、また、矛盾を解決するものが求められる。例えば、ユニット化により通常、部材の生産性・再利用が考えられるが同時に平面プランの許容自由度・可変性が失われる。

2.2 接合部と架構体の提案

本論文で提案する架構を図2に示す。名称は、「次世代接合部を有するユニバーサル鉄骨架構」（略称NUS架構）とする。NUS架構の特徴の項目と、その主要内容を下記に示す。

- ・柱中央部ピン接合
- ・テーパー鋼管柱
- ・360度方向大梁接合
- ・リング嵌合接合
- ・仕口鋼管と柱のねじ留め接合
- ・スラブと大梁の接着接合
- ・最小限の構成要素

柱中央ピン接合方式は、従来の接合位置と考える端部ではなく、階高の中央とすること、さらにメタルタッチとすることで大きな効果が得られる接合方式である。まず中央とすることで、水平力によって生じる曲げモーメントの反曲点位置（ $M=0$ ）が必然的に中央部となり応力の均等化が図れる。従って計算不要の可能性と同時に断面標準化による部材の規格化ができる。また、応力分布に応じて高強度鋼材を用いたテーパー鋼管とすることで、材料の軽量化、柱のデザイン化が図れる。また、最近増加しつつある建築物の用途変更に応じる階高拡張も、接合部のかさ上げにより容易に対応できる。

次に仕口部の接合方式について述べる。まず大梁には端部に曲面エンドプレートをあらかじめ接合しておく。一方柱仕口部鋼管には一回り直径の大きい下部リングプレートがあり、このすきま部分に大梁のエンドプレートを上から差込み嵌合し、その上からさらに上部リングプレートをかぶせる。この接合方式により、大梁の取り付け方は360度方向を可能とする。従って柱位置も非グリッド上で問題なく架構構成でき、建築平面形態の自由度は、大幅に大きくなる（図3）。また、嵌合接合であるため、着脱・解体は容易となる。

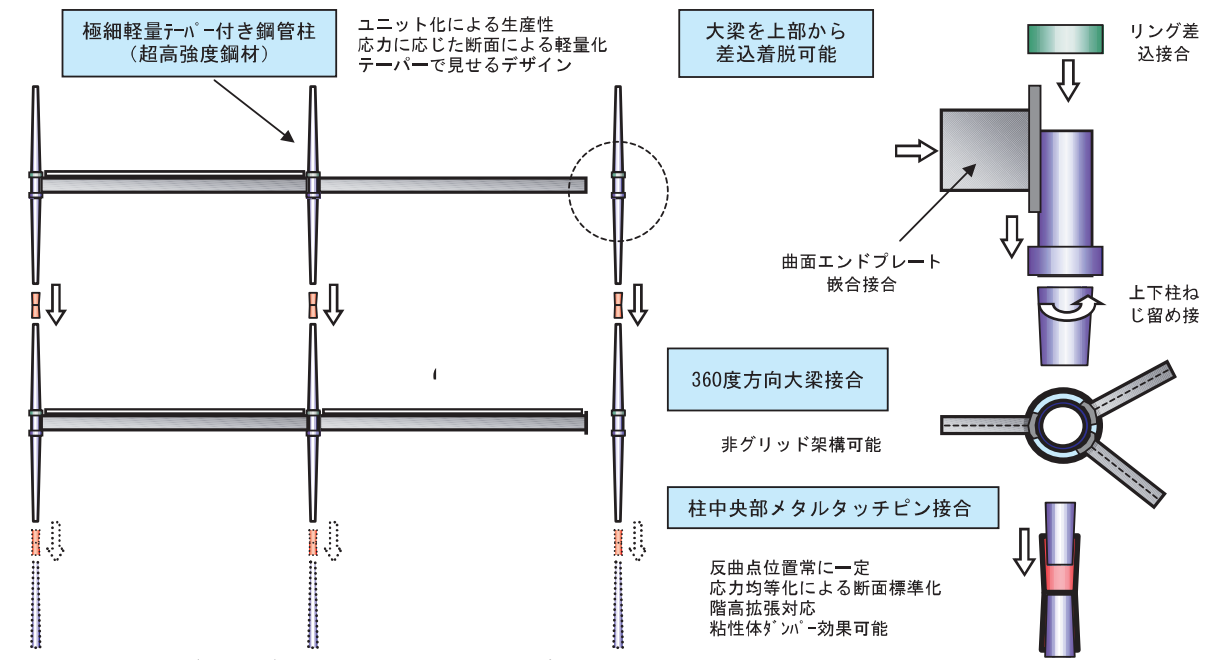


図2 次世代接合部を有するユニバーサル鉄骨架構

2.3 予測される効果

予想される効果を以下に示す。

- ・環境負荷低減としての建築物として、着脱式接合方式による解体・再利用が容易となり、資源循環化が増大できる。また、そのことによりイニシャルコストも大幅に低減される。
- ・動産価値評価としての建築物として、増築、減築、移築、階高変更、平面プラン形態の変更が容易になり、資産価値が増大、また、事業計画の変更にも対応、経済市場を拡大する。

2.4 応用可能性

本提案に対し応用提案を以下に示す(図4)。

- ・伸縮柱
テーパ鋼管の円錐形状を利用、コップ形態の入れ子状態で運搬し、建設現場で上方に引き伸ばし、構築する伸縮性を有する柱の提案。仮設建築物など、移築の多い場合に有効である。
- ・伸縮大梁
伸縮柱と同様に大梁断面を角形鋼管とした上に、入れ子状態で運搬し、引き伸ばす大梁の提案。
- ・フラットパネルとの組み合わせ
図のような単位要素のフラットパネルを組み合わせて柱に接合する提案。大梁はなく、正方形・正三角形のパネルをプレストレス(P S)等で締め付ける方法とする。
- ・教育模型
学生にラーメン架構を教える場合、現在適切な模型がない。このNUS架構の縮小版であれば模型材料として使用できる。

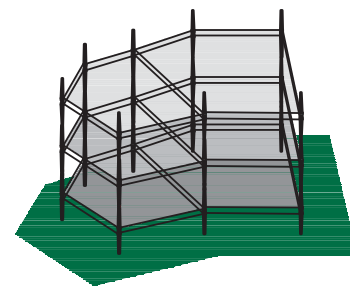


図3 ネットワーク型架構

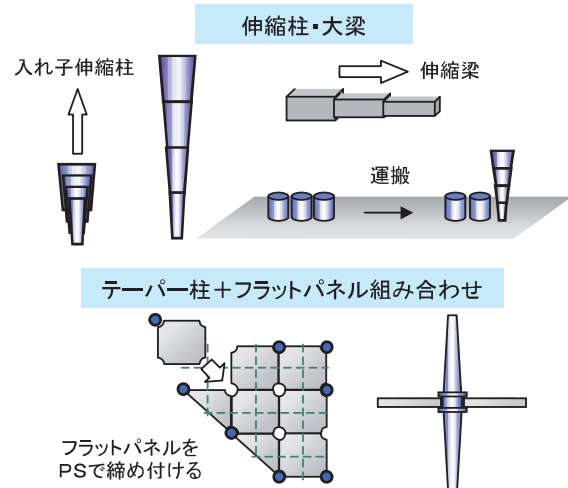


図4 応用提案

3. まとめ

- ・地球環境対応に伴い、建築物に対する社会概念の変化(可変性、持続性)に対応する、新しく進化した鉄骨架構の提案を試みた。
- ・着脱方式となる接合方式に着目し、自由な架構形態が構成でき、単位部材によるシステム架構となる「NUS架構」が提案できた。

3.3 21世紀鋼構造フォーラムCグループ提案—解き放たれた鋼構造

①解き放たれた鋼構造 — スティール・メゾンリー

②産業用建築物ユニットのケーススタディ

2つの意味で「解き放たれた」鋼構造を模索した。1つは「市民に」解き放たれたであり、他の一つは鋼構造の「常識から」解き放たれた、である。

建築物は、元々人間にとって身近な天然材料を自ら加工し、組み立てることによってシェルターとすることから発展してきた。より強い材料、より合理的な工法を追求することにより20世紀までの鋼構造は目覚ましい発展を遂げたわけであるが、一方で、鋼構造建築物を生産するためには、設計者・ファブリケータ・施工者等の高度な専門家の存在が不可欠となり、市民は純然たる利用者としてしか鋼構造建築物と関わるができなくなってしまった。そこで、丸太を組み合わせるが如く、レンガを組み上げるが如くに、自らの手で建築物を作るための鋼構造「要素」を模索した。スティール・メゾンリーは、市民に解き放たれた鋼構造建築物であり、単なる懐古趣味に留まらず新世紀に向けた高性能を秘めた、答えである。

鋼構造建築物には、解き放たれるべき3つの常識＝呪縛があるのではないか。すなわち、

- (1) 常識的な姿
- (2) 常識的な付加的構築システム
- (3) 常識的な規格概念

である。これらを解き放つとは、質素であっても粗末ではない鋼構造建築の新しい姿を探求すること、骨組構造という多段階の構築システムを単純化した新しい構築システムを構想すること、新しい規格構造を考え、それを活用した新しい産業構造の在り方を構想することが必要となる。これらに関して、産業用建築物ユニットのスタディを試みた。

なお、産業用建築物ユニットのスタディについては、作品の形で提案を行っている。

解き放たれた鋼構造 — スティール・メーソンリー

21世紀鋼構造フォーラムグループC
メーソンリー ユニット構造 標準化
生産システム 流通体制 リユース

1. はじめに

20世紀は、人類が技術により多くの不可能を可能とし、世界の多くの市民がその恩恵に授かることが可能になった最初の世紀といえるかもしれない。鋼構造建築もその例外ではない。素材・部材が構造材として高性能化されただけでなく、設計から施工まで高度な建設技術が確立されてきた。これにより、木造や組石造では想像できないような摩天楼や大空間建築を出現させた。経済的かつ大量生産を可能とする生産・流通システムを構築してきたことも見のがせない。鋼構造建築は、今や、国内全着工面積の3分の1を占めるにまで至っている。

しかし、鋼構造を含めた20世紀の建設技術は、一面では華々しい実績を収めたものの、他方ではその技術の進歩に伴い、高度な技能者に限られた＝市民から遠ざかったものとなっているのではないだろうか。

本論で提案する小型鋼ユニット＝スティール・メーソンリーは、鋼構造建築を極限られた技能者から市民の手の届くものへと解き放つことを目指すものである。この小型鋼ユニット＝スティール・メーソンリーは、しかし、レンガに代表される伝統的なメーソンリーとはまったく異なる。後者が勘と経験に基づいた手作業を前提とした建築「要素」であるのに対して、スティール・メーソンリーは、高度な工業プロセスにより生産され、また高度な設計技術に裏打ちされた高性能な「要素」であり、技術が昇華して市民に舞い戻った、手に届く「要素」である。

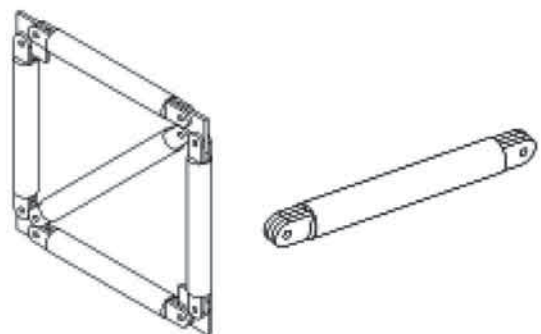
2. スティール・メーソンリー

スティール・メーソンリー構造では、建設および建替えニーズの多い低層住宅や倉庫、工場などを主な対象と

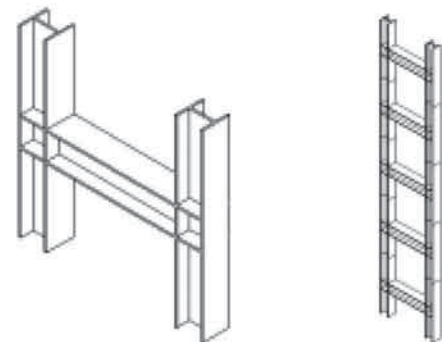
する。大量生産のメリットを活かすために、部材種類は最小限に留める。

2種類のスティール・メーソンリー案を図1、図2に示す。

・案1(図1):システムトラス型。部材はパイプで構成し、接合部はピン接合とする。耐力や剛性はパイプの断面積で調整する。斜材をダンパーとすることにより、ダンパー機能付きメーソンリーとすることも可能である。



(a) 基本モジュール (b) 標準部材
図1 システムトラス型メーソンリー



(a) 基本モジュール (b) 組立図
図2 ファイアーレディールトラス型メーソンリー

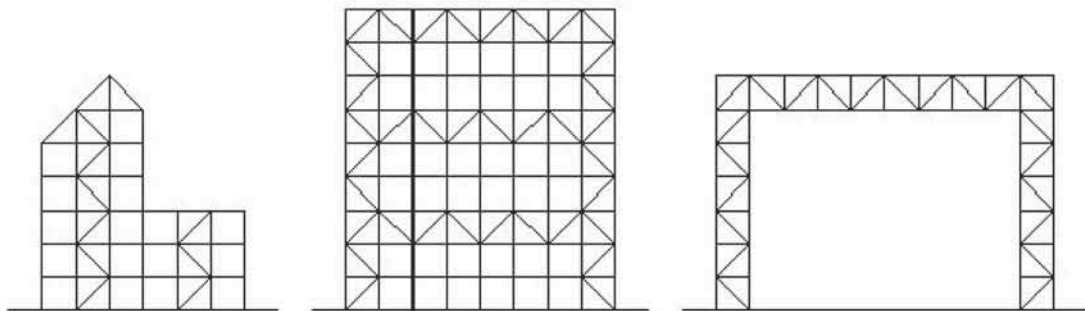


図3 スティール・メーソンリーを用いた骨組

A new structure using Steel Masonry

・案2 (図2) : フィーレンディールトラス型。外力に対しては部材の曲げで抵抗させる。メーソソリーの接合部は反曲点位置とする。

いずれの場合も、意匠設計の自由度や汎用性を高めるために小さなモジュールを採用する。対象とする建物規模にもよるが、スチール・メーソソリーの基本寸法は、200mm、500mm、1000mm程度の3～4種類揃えればよいであろう。接合部は組立て、解体の容易なメカニカル接合とする。また、メカニカル接合とすることで、施主自らによる増改築、部分的な補強も容易とできる。

構造形式 (図3) としては、スチール・メーソソリーの組立てによるトラス構造、壁式構造、ラーメン構造など、種々の形式が考えられる。スチール・メーソソリーの組合せにより提供できるのは骨組だけであり、バリエーション豊かな内・外装材を取り揃え、これらもユニット化することが望ましい。

3. 生産・流通のプロトタイプ

現状の鋼構造建築の生産流通システムは、素材・部材製造、加工、設計、施工のそれぞれは、メーカーやファブリケーター、設計事務所、工務店などにより、ほぼ完全な分業体制となっている (図4)。高品質かつ高性能なスチール・メーソソリーを提供していくためには、標準設計ソフト、施工マニュアルは、メーカーと設計事務所がタイアップして作成する必要がある (図5)。またスチール・メーソソリー骨組を施主＝市民による設計・施工が容易にするために、徹底した仕様規定とすること

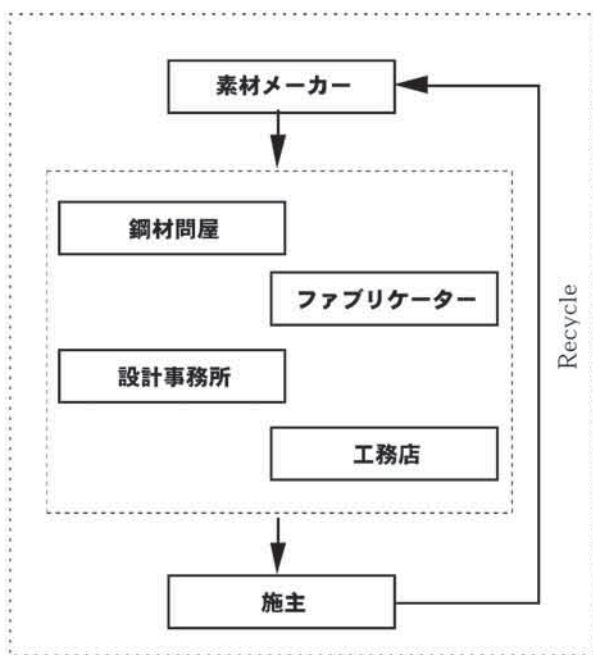


図4 現状の流通体系

が望ましいであろう。仕様規定の方向性としては、例えばラーメン構造の梁として用いる場合はスパン制約を設ける、壁式構造の場合は壁倍率を設定する等が考えられる。

メーカーはスチール・メーソソリーを構成する部材を製造し、スチール・メーソソリーの組立てはファブリケーターで行う。ホームセンターに代表されるD. I. Y. 店や工務店では、スチール・メーソソリーの販売に加え、施主自らが設計・施工するにあたってのアドバイスを行うことが必要であろう。

なおスチール・メーソソリー骨組の解体後は、スチール・メーソソリーのリユースが可能であり、環境に優しい骨組とできるだけでなく、骨組の資産価値を高めることも可能である。

4. まとめ

本論では、鋼構造建築を限られた技能者から市民の手の届くものへと解き放つことを可能とする構造として、スチール・メーソソリー骨組を提案した。実現にあたっては、スチール・メーソソリーの基本モジュールの検討から生産・流通体制の整備まで多くの課題があり、業界を横断した取組みや新規格制定などが必要となる。しかし、鋼構造の建設技術を、今一度、市民の手元に引き戻すことは、ややもすれば無機質で人間味の少なくなりがちな建築空間を、より優しく、豊かにできるはずである。本論における提案は、有効な一手法であると考えられる。

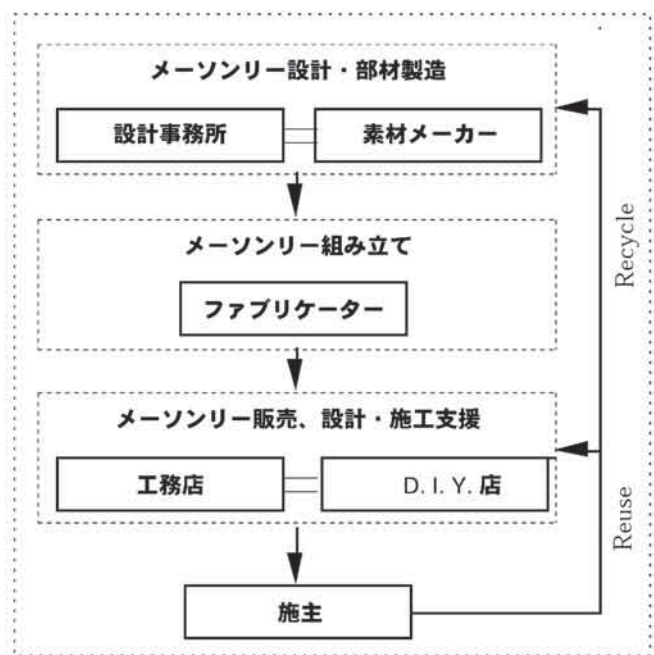
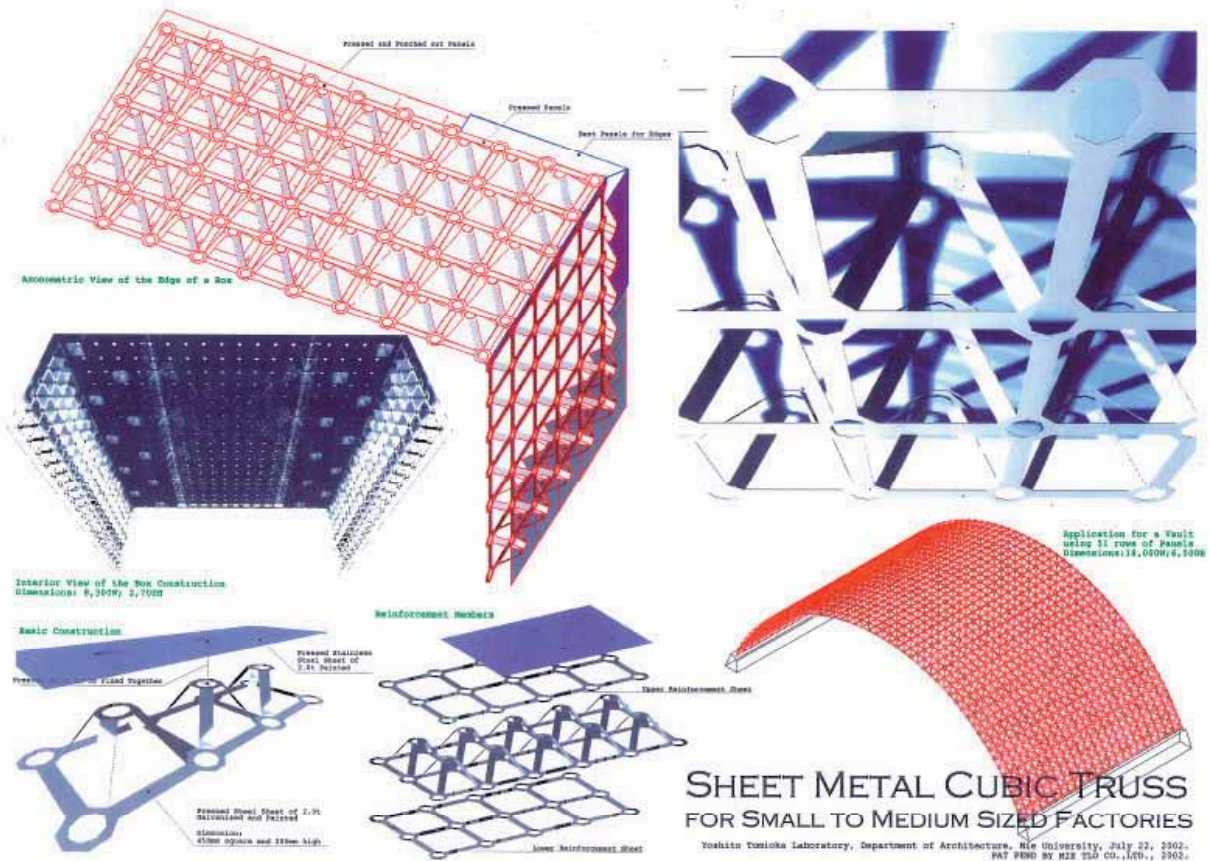
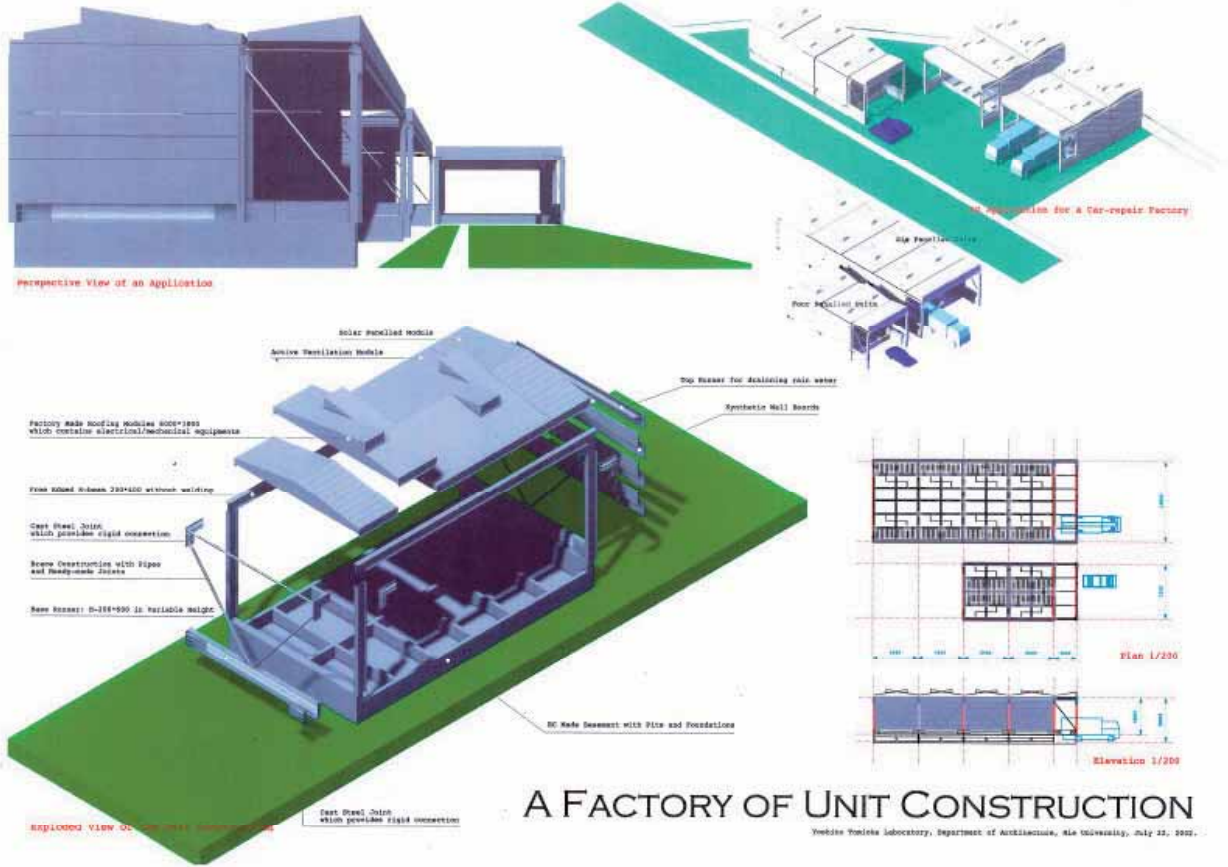
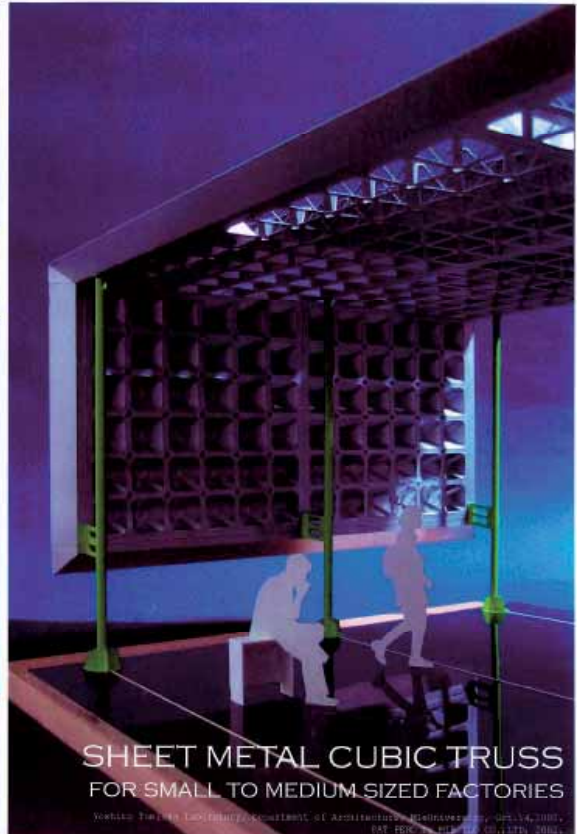
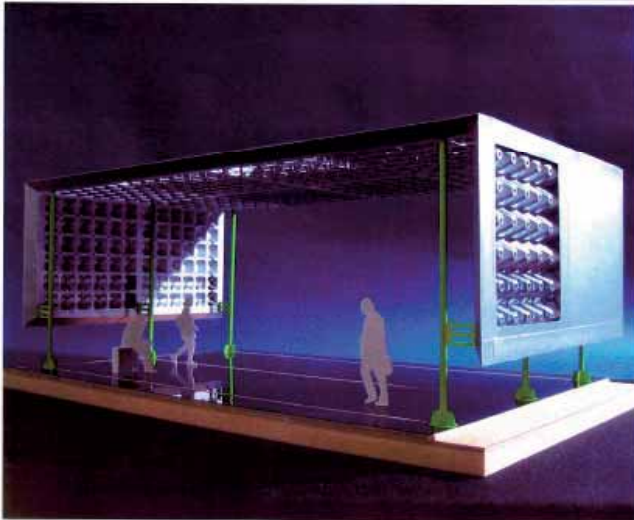


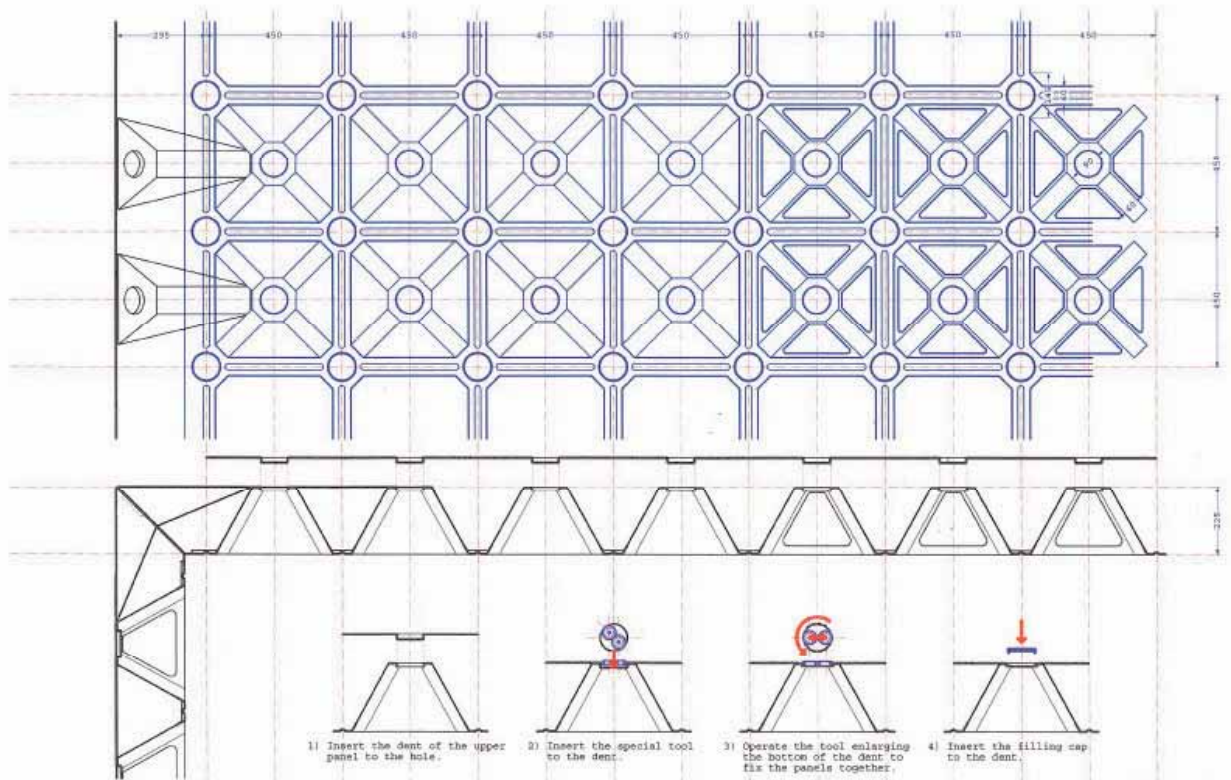
図5 スチール・メーソソリーの流通体系プロトタイプ





SHEET METAL CUBIC TRUSS FOR SMALL TO MEDIUM SIZED FACTORIES

Yoshito Tanihira Laboratory, Department of Architecture, Mie University, July 27, 2002. PAT. PEND. BY NIKI ILO CO., LTD., 2002.



SHEET METAL CUBIC TRUSS FOR SMALL TO MEDIUM SIZED FACTORIES

Yoshito Tanihira Laboratory, Department of Architecture, Mie University, July 27, 2002. PAT. PEND. BY NIKI ILO CO., LTD., 2002.

3.4 公募作品部門入賞作品・論文

シンポジウム「21世紀、鋼構造技術は何ができるか」では、フォーラムからの提案に加えて、一般から広くアイデアを募集することとした。

募集は、アイデア部門（図面で提出）および論文部門とし、各々、アイデア：27編、論文：16編の応募を得た。

審査は、アイデア部門では、高梨晃一東大名誉教授を委員長に、招待講演をお願いした隈研吾氏に加えて、佐々木睦朗、手塚貴晴、西沢立衛、馬場樟造の各氏を審査員とし、審査委員会を構成した。審査員各氏は、いずれも、現在、建築デザインのトップにある方々で、これにより、多くのアイデアの応募を得ることが出来た。審査は、審査委員会による一次審査で選出した6点について、シンポジウム当日、応募者のプレゼンテーションによる公開審査を行い、最優秀、優秀、各1点、佳作4点を決定した。

論文部門は、同じく、高梨晃一東大名誉教授を委員長に、フォーラムを構成する3団体の代表、すなわち、(独)建築研究所からは、山内泰之理事長（フォーラム主査）、(社)日本鋼構造協会からは、藤盛紀明構造委員長（フォーラム副主査）、そして、(社)日本鉄鋼連盟からは、私（フォーラム幹事）を審査委員とした。

この結果、(社)日本鋼構造協会の会員会社などからの応募が多く得られた。

論文部門の審査は、審査委員会による審査で、最優秀、優秀、各1点、佳作4点を選出した。入選した6点は、シンポジウムでプレゼンテーションを行った。

3.4.1 アイデア部門入賞作品

最優秀賞（建築研究所理事長賞）

「折版構造空間の探求」（管 正太郎氏）

本作品は、柱、梁を用いず、折版（デッキプレート）のみを構造材として、住宅（自宅）を設計したもので、鋼材の使い方の斬新さが高く評価された。

優秀賞（日本鉄鋼連盟会長賞）

「Acrylics Structure」（武蔵工業大学）

本作品は、アクリル版とワイヤーを組み合わせることにより、自由な空間を創造するもので、武蔵工業大学の女子学生チームの応募である。この提案が、すぐに実現する、あるいは、大きな鉄需を生み出すとは考えられないが、その自由な発想が評価された。

佳作（審査委員会委員長賞）

「曖庵～鉄を使った新しい空間・機能を持った建築の提案」（芝川構造設計室）

本作品は、有孔耐震壁を組み合わせ、ある種、透明で、光と影が織り成す空間を提案したもので、「鉄」を積極的にデザインに利用する姿勢が印象深かった。

佳作（審査委員会委員長賞）

「鉄を使った新しい空間」（佐伯力建築設計事務所）

本作品は、一種の空中浮揚体で、正直、審査員にもその意図するところが理解出来ないものであったが、その発想の大胆さが注目された。

佳作（審査委員会委員長賞）

「HP防音シェルのあるスタジオ住宅」EDH遠藤設計室）

本作品は、軽量H形鋼とキーストンプレートを組み合わせた建築で、屋根・壁全体が

一体的なシェルになっている。完成建物であり、鋼材の使い方の面白さが評価された。

佳作（審査委員会委員長賞）

「Punching Metal Structure」佐々木暁生（東京工業大学）

本作品は、パンチングメタルを間仕切りに利用し半透明で陰影のある空間を演出したもので、鉄を軽快に使うアイデアが注目された。

なお、アイデア部門受賞作品を、新建築 2003 年 1 月号 No. 78、p210-212 に掲載した。また、これらの作品は、次項で解説する論文とともに、次項のうしろに掲載している。ここで、作品の作者名については、作品中に示されている。

3. 4. 2 論文部門入賞論文

最優秀賞（建築研究所理事長賞）

「トリプル・スケルトン構造システムによる空間可変な長寿命鉄骨建築」

（真瀬伸治他）

本論文は、鉄骨の架構を、解体時まで継続使用する第 1 スケルトンと、大規模、あるいは小規模の改修が出来る第 2、第 3 スケルトンの、3 つの部分に区分けし、リユースと空間可変が可能な架構を提案したもので、従来のスケルトン・インフィルの考え方を拡張したものとして、高い評価を得た。

優秀賞（日本鉄鋼連盟会長賞）

「鉄がこれからも主役であり続けるために」（鈴木直幹）

本論文では、躍進著しい RC 造に対して、鉄の競争力を維持するために、材料、架構、接合の各項目に数多くの提案が行われており、鉄のシンパとの印象が強く、注目された。

佳作（審査委員会委員長賞）

「再利用可能な粘弾性接合部をもつクモの巣状空間構造システムの開発」（武藤至）

本論文は、システムトラス分野で、「生物生態学」に基づくクモの巣状空間構造システムにリユースの考え方をもち込んだもので、そのユニークさが注目された。

佳作（審査委員会委員長賞）

「解体鉄骨の商品化とそれを利用した環境負荷低減建築構法」（田中直樹）

本論文は、建築鉄骨のリユースを体系的に進めるため、解体鉄骨に IC タグを取り付け、トレーサビリティを確保した上で、例えば、解体時に切断したボックスコラムを繋ぎ合わせてコラムとする、あるいは縦割りにし床のデッキに利用するなど、従来のリユースの提案には見られない具体性が評価された。

佳作（審査委員会委員長賞）

「鋼の高比強度を活かした環境適応型無柱空間構造：スケルトンシェルシステム」

（杉崎健一）

本論文は、単層ラチスシェルシステムに上下の弦材を取り付け面外の構造安定性を強化するとともに、ケーブルと圧縮材の比強度を利用し軽量化を図った、スケルトンシェルシステムの提案で、その斬新さが評価された。

佳作（審査委員会委員長賞）

「鉄を身近に」（山田耕司）

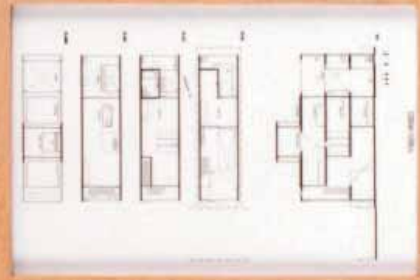
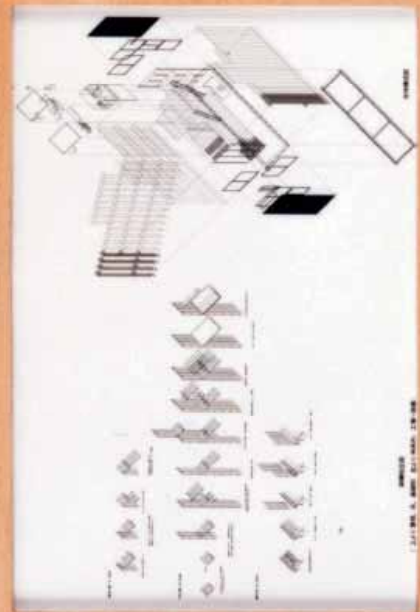
本論文は、鋼構造建築のさらなる発展には、一般の人々が簡単に扱えるような「鉄」

があるべきだと言う持論を展開したものである。

例えば、人々が愛着を感じている「木材」と同じように、軽量で簡便に加工（切断、孔開けが出来るような「鉄」を提案するなど、応募者の「鉄」への思い入れが感じられ、注目された。

なお、優秀賞および優秀論文を、建築技術 2003 年 1 月号 No. 636、p189-197 に掲載した。これらの論文については、前項で解説した作品と併せて本項のうしろに掲載している。ここで、論文の著者名については、論文中に示されている。

折板フレーム構造空間の探求/菅 正太郎 (s/a)



折板フレーム構造空間の探求
菅 正太郎 (s/a)



Acrylics Steel Structure



+

糸状のステール
- 用によって簡単に編むことができる
- 繊維のような柔らかさをもつ
- 使用に優しい



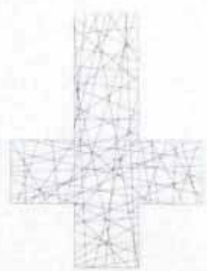
↑

アクリル板
用によって変化する
- 厚みは自由に設定できる
- 構造も変化する



↑

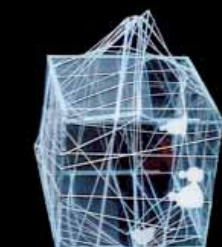
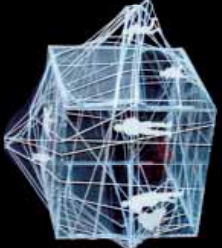
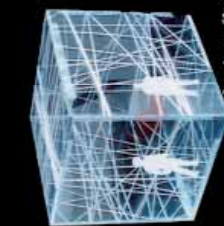
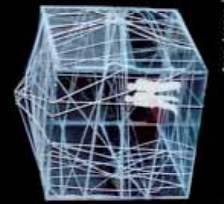
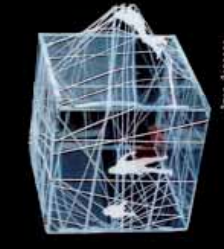
2つの素材を組み合わせることによって自由な形に対応する
- アクリルはステールの強度の弱さを補うだけでなく、剛性を高めることができる
- 1つの面だけでなく、複数の面を自由に作ることもできる



CUBE

基本となる空間をつくる
- 正方形のステールの両面に
- 透明なアクリル板を組み合わせることで、空間の広がりや奥行きを表現することができる
- ステールは、アクリル板の強度を補うだけでなく、剛性を高めることができる
- 1つの面だけでなく、複数の面を自由に作ることもできる

Acrylics Steel Structure
- ステールとアクリル板の組み合わせによって、自由な空間を表現することができる
- 1つの面だけでなく、複数の面を自由に作ることもできる
- ステールは、アクリル板の強度を補うだけでなく、剛性を高めることができる
- 1つの面だけでなく、複数の面を自由に作ることもできる



暖庵

他の構造素材と比較して、強度、剛性とともに関与する「鉄」で造られた建築は、元来シアーブナフレーションで可憐なシルエットを映し出していた。それは、相図にまで取り込まれた細い木材で巧みな手法により接合し、美しい姿を構築していた。

しかし、数多くの試案、いや、むしろそれを背景としたシステム化された評価基準により、それは強く強い壁へと変わってしまっているのではないだろうか。

一方、強度が高いということ、更にそれが断面という問題を引きおこすため、鋼構造は鋼材として用いられることが多かったが、鉄筋コンクリート構造と同様、剛性という面材としての応用が注目されている。比較的新しい技術である鋼製組立壁は、変形能力の問題からスリットや孔を設け、曲げ応へと変形を促す事により使用されている。

しかしながらその活用も、「面」で構成されているという建築的な特質が、美しく表現されていない。

それらを踏まえ、われわれが提案する建物は、ありふれた材料を、ありふれた構造で、さりげなく使うことを主題とする。

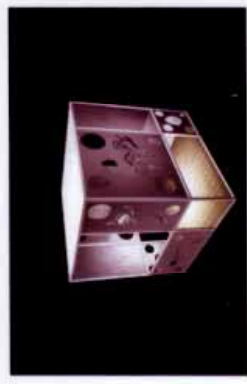
先に前記の通りではなく、「鉄」を使った建物が、技術論でないところで「できること」を探求し、成熟することになることの可能性を見いだすものとしたら、

そこでわれわれは、一つの領域を通し、限りなく強い耐力のみを受けるフレームと、耐力、剛性とも巧みに制御できる有孔鋼板を用いて、壁やかに、そしてしなやかな、建築の可能性を提案する。

21世紀の美しい鋼構造を求めて...

観客が ... それはいつもにも異様に見える様子
曲りを受けない、もっぱら耐力のみを受け持つ支持部材
そこに無限の開口オーバーゲージがある

しなやかに ... それは、やわらかくたわむ様子
借りつめた引張の場だけでなくまた扉田の生じない代わりに
そこに隠れてきたかさを感にさせるからくり物がある



作り過ぎない技術 作り過ぎない技術
作り過ぎない技術 作り過ぎない技術

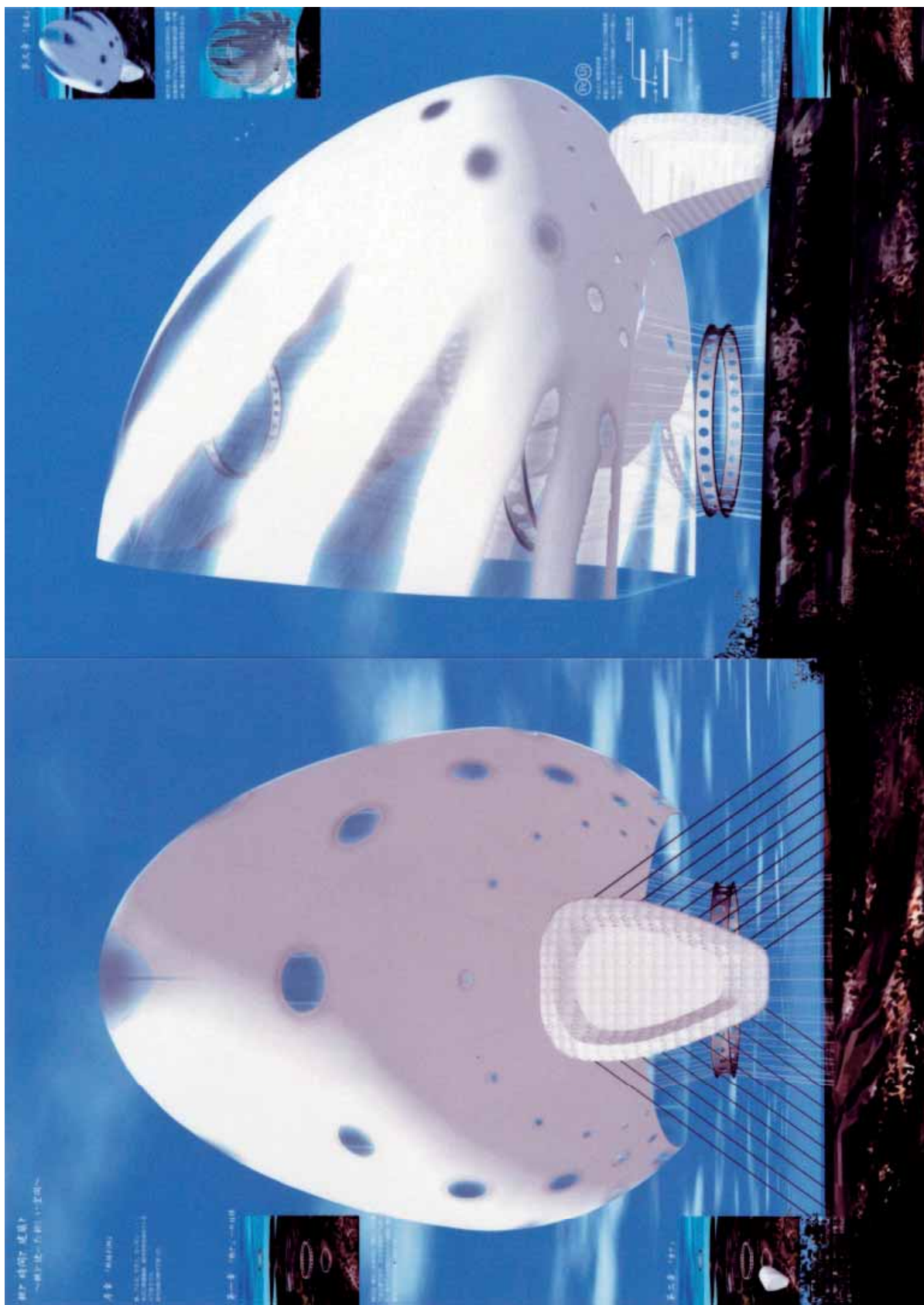
さてどうも、自然現象の前では何も及ばない人間が作り出している技術。

今ある技術で手が出せる、考に入れられる物が、
“建築”の中にはあるような気がしてならない。

まぐそここにある価値ある物のためには、この技術で挑みたい...

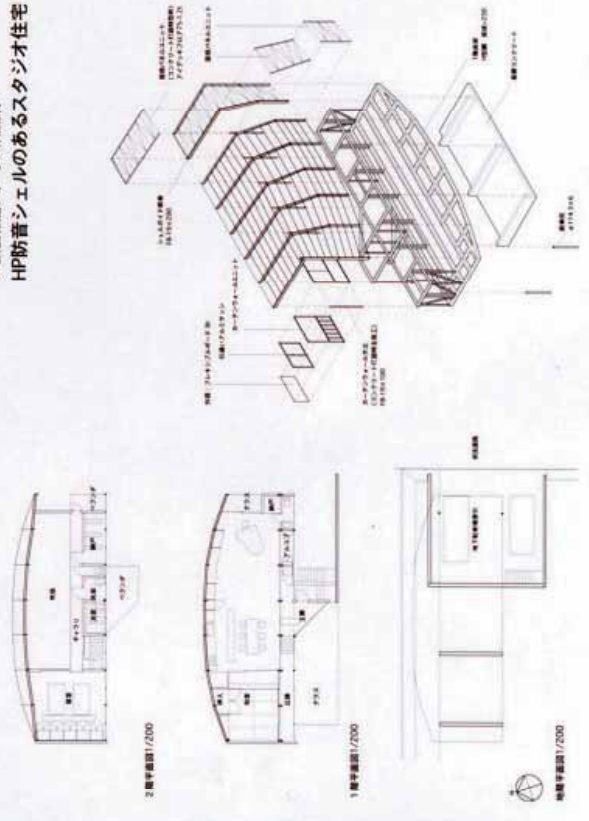
「2」参照、鋼構造技術は何ができるのか
鉄を使った新しい空間・機能を持った建築の提案

鉄と時間と建築と～鉄を使った新しい空間/佐伯 力 (佐伯力建築設計事務所)





21世紀建築語フォーラム作品部門
HP防音シェルのあるスタジオ住宅



この建物は、住宅地に建つ新しい実験のための住宅事業スタジオである。本は建築界の専門家として経験を積み、海外ではアジアの先進地で建設が得意な、彼らの日本生息地とは異なる。そこで、住まいの中に小さなコンクリートの防音室を設けるのではなく、主要空間そのものを防音室や防音室に設計した実験的な一室型としてスタジオ化することを考える。

具体的には、防音上有利なコンクリートとスチール素材とを併用することによって、HP防音シェルを構築する。HP-防音室防音室という概念は材料の厚さを少しづつ増やしていくことで完成される。その断面は平家に類似してはいない。防音室であるため、屋外のものはあがなくても気体の密度で外方に伝わりやすくなることである。また防音室は音響的に集中させない構造も持っているため、内部の音場において極めて優れた状況であるといえる。

24m幅に達する連続的なスチール素材は19x200mm基本構造とし、その間を内側は上げ、横型材を並べたアイブレットを打ち出し、鉄筋プレートでつなぎ、その上に防音上必要な100mmのコンクリートを打設する。この構造とすることで、スチールとコンクリートとが一体となった一枚の板状構造がつけられる。

また、HPシェルが立ち上がる際の先駆者は19x180mmで高さを代えている。これはコンクリート打設時の変換工として機能し、硬化後はコンクリートの圧縮力によって、このようにコンクリートの防音性能と可塑性を兼ね備える。加えて高層工といった種類の建築を一切断り、かつ構造内にも音響的にも有利な状況にHP防音シェルを近づけることで、建築が可能になっているのである。



Punching Metal Structure(PMS) Sectional Flexibility/佐々木暁生 (東京工業大学)

Technical drawings illustrating the PMS (Punching Metal Structure) system. The top left shows a 3D exploded view of the system components. The top right shows a grid of circular holes. The middle section shows various cross-sections and details of the system, including a section labeled 'sectional flexibility' and a section labeled 'sectional rigidity'. The bottom section shows a detailed view of the system components, including a section labeled 'sectional flexibility' and a section labeled 'sectional rigidity'.

Technical specifications and details:

- scale: 1/110 (structural detail)
- scale: 1/250 (sectional detail)
- sectional flexibility (plate+1500 ~3500 ~4500)
- sectional rigidity (plate+1500 ~3500 ~4500)

Legend:

component	flexible	rigid	flexible	rigid	flexible	rigid
equipment	flexible	rigid	flexible	rigid	flexible	rigid

Sectional Flexibility=鋼構造による新しい空間システム～



トリプル・スケルトン構造システムによる空間可変な長寿命鉄骨建築

○真瀬 伸治^{*} 寺田岳彦^{*} 坂本真一^{*} 田村和夫^{*}
 構造システム 長寿命 スケルトン・インフィル
 可変空間 リユース 無溶接接合

1. はじめに

21世紀においては、前世紀の負の遺産である地球規模の環境破壊に対する反省から、地球環境に配慮した持続可能な循環型社会システムの構築が緊急課題であり、建築分野も例外ではない。建築構造の分野では、建設時、使用時ならびに解体時における環境負荷の低減が課題となる。一方、自然災害や人災に対する安全・安心は、建物に根源的に要求される機能である。さらに、現在の生活水準を低下させることなく、時代とともに変遷する多様な価値観に基づく快適性も満足させなければならない。

本論では、図1に示すように21世紀の社会に適合できる機能を満足する建築構造システムとして、長寿命で柔軟な空間を提供する「トリプル・スケルトン構造システム」を提案する。

2. トリプル・スケルトン構造システム

本システムのコンセプトを図2に示す。トリプル・スケルトン構造システムは、第1、第2および第3の各スケルトンにより構成される。主要な構造材として、長期にわたる品質の安定性や、大きな空間を構成できるという観点から鉄骨部材を用いる。第1スケルトン部は、建物全体を解体時まで継続して使用できる高い耐久性と、地震や台風などの外力に対して建物全体の機能を損ねることがないような高い安全性を備える。一方、第2および第3スケルトン部は、それぞれ社会の要求に伴う大規模な改修および小規模な改修時に、内部空間の再構築を容易に実現できる機能を有する。さらに、改修時や解体時に不要となった部材は、他の建物でリユースできるように、部材の加工が少なく解体が容易な接合工法を採用する。

架構の構成を図3に示す。本システムは、種々の用途や規模を有

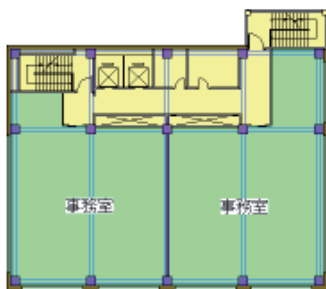
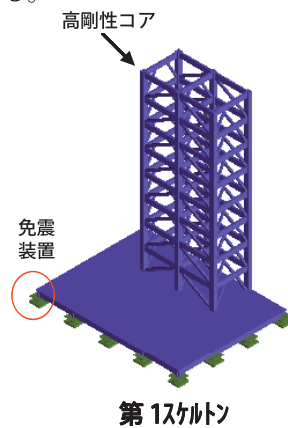


図4 対象とした建物プラン



第1スケルトン

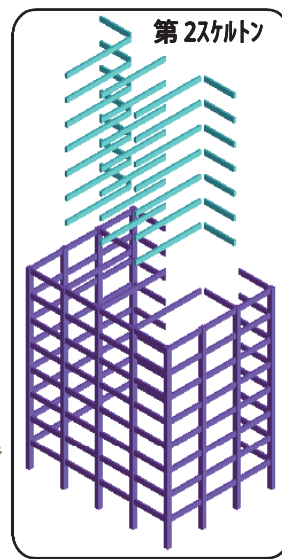
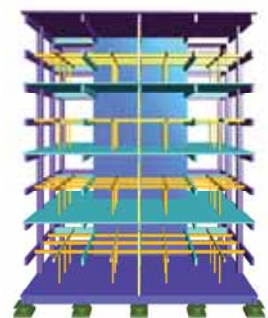


図3 架構の構成



第3スケルトン
 (軽量鉄骨構造)
 (木質構造)
 * 図中の黄色部分

する建物に適用可能なものであるが、部材リユースの実現性を考慮し、図3に示すような市場規模の大きな中低層の事務所ビル(図4に平面図を示す。)に適用した場合を一例として示す。

第1スケルトンは、免震装置に支えられたコンク

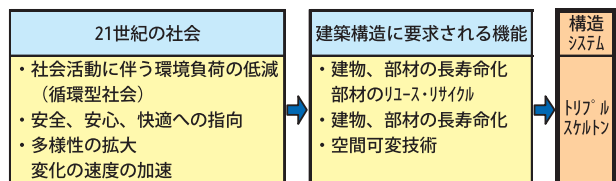


図1 21世紀の社会に適合できる建築構造の機能

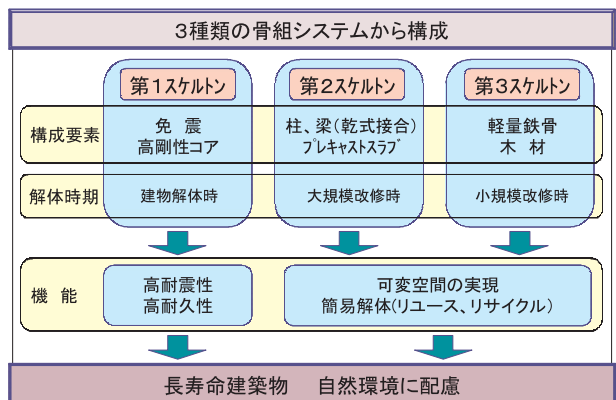


図2 本システムのコンセプト

リートスラブと高剛性のコアから構成される。基礎免震構造は、建物の上部構造への地震水平力を大幅に低減し、高い耐震性能を実現する。高剛性のコアは、地震や風などの非常時水平荷重を受け持つ。これにより、第2・第3スケルトンは非常時水平力から解放される。

第2スケルトンは、複数の第3スケルトンを内包できるような大きな立体空間を支えるものであり、柱・梁の外郭と床スラブで構成される。構造的には、固定荷重と積載荷重のみを支持できる性能を満足すれば良い。ただし、第3スケルトンの変化を見込んだ余裕度を持たせる。各部の接合部には乾式工法を採用し、大きな社会的ニーズの変化に応じた大規模な立体空間の再構成を容易に実現できる。

第3スケルトンは、複数の単位空間を構成するための構造である。構成部材には、小規模な改修に対応できるように組立・解体が容易な軽量鉄骨を用いる。ただし、ぬくもり感、快適感や炭酸ガスの固定化のために、木質構造とすることもできる。

このように、本システムは、スケルトンを階層化することによって、短期および中期の空間へのニーズの変化に対して柔軟に対応でき、建物全体を長期にわたって維持することを可能としたものであり、環境負荷を最小限に抑えながら持続可能な社会に適応したものである。

3. 要素技術

本システムを支える要素技術のうち、主なものを詳述する。

図5に、第1スケルトン部の杭頭免震構造を示す。免震構造を採用することで、従来の骨組に比べて地震時の入力を1/5に低減できる。また、免震層の下の部

分のつなぎ梁を省略し、地下部分の掘削土量を減らすことで建設時のCO₂排出量を抑えることができる。

図6に、第2スケルトン部で採用する各部の乾式接合工法を示す。柱と梁は、リングパネルと言うピースを介して剛接合される²⁾。梁とリングパネルは高力ボルトによって、柱とリングパネルは粘弾性体やモルタル等を充填することで剛接合される。また、スラブにはプレキャストコンクリートスラブを用い、ボルトで鉄骨梁に接合する。両工法も、部材を傷めず簡単に取り外しでき、リユースできる技術である。

これらの技術を採用することによって、第3スケルトンの変更のみならず、第2スケルトンの梁やスラブを一部撤去して大きな空間を再構成することも可能となる。

4. おわりに

循環型社会に適合する建物として、内部空間の再構築を可能としたトリプル・スケルトン構造システムを提案し、そのシステムを支える技術について紹介した。今後、部材のリユースを実現するためには、ハード面の技術のみならず、図7に示すような社会的なシステムを社会全体で進めていく必要がある。

<参考文献>

- 1) 日本建築学会：LCCO₂30%削減、耐用年数3倍延伸をめざす建築設計、フリースペース・ビルディングの提案、2001
- 2) 塚越、坂本、神野：混合構造におけるリングパネルを用いた接合部の開発、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅲ、2002.8
- 3) 鋼材倶楽部：サステナブル建築とスチール、シンポジウム資料、2001.10

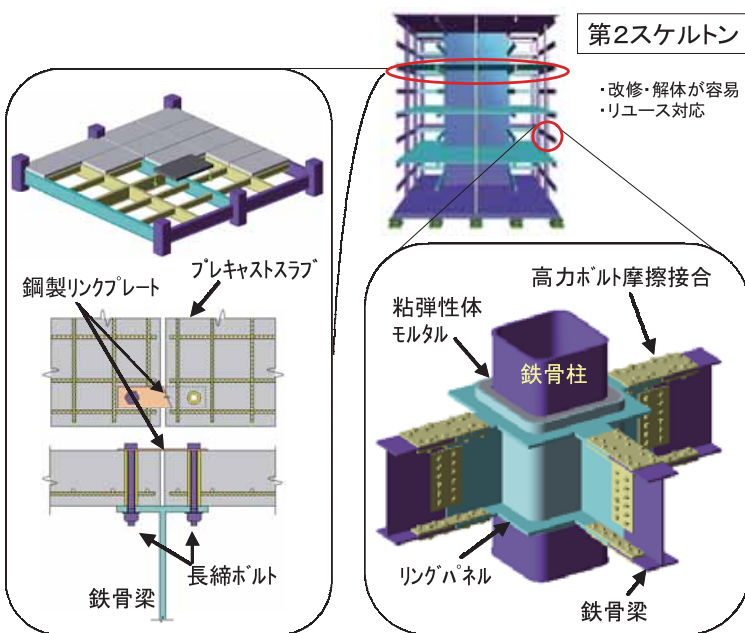


図6 各部の乾式接合工法

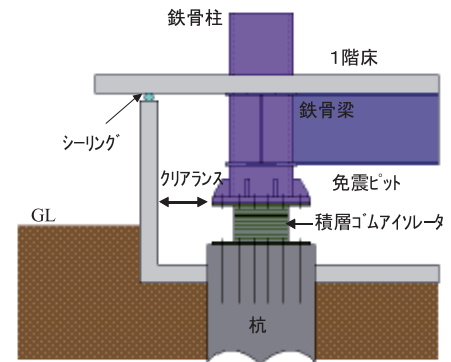


図5 免震システム

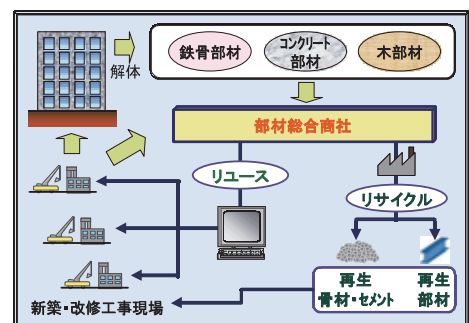


図7 部材リユースシステム

*)清水建設(株) 技術研究所構造研究開発部

鉄がこれからも主役であり続けるために

21 世紀 主役	鈴木 直幹 ^{*)} 構造設計者 ブレインストーミング	既成概念 ブレイクスルー
-------------	--	-----------------

1. はじめに

20 世紀、鉄はコンクリートやガラスと共に建築を支える主要な材料であり続けた。特に超高層建築や大空間建築では鉄を用いた数々の名作が生み出され、この分野において鋼構造が主役であったことに異論はないだろう。

翻って 21 世紀の現在、鋼構造の現状はどうであろうか？ 20 世紀、主役でありつづけた超高層の分野においては RC 造の躍進が著しい。現在、超高層住宅が大量供給されているが、この分野においてはほぼ RC 造の独壇場と言っても過言ではない。また、阪神大震災では今まであまり問題にされなかった鋼構造の弱点（溶接部の脆性的破断など）が露呈し一般社会における鉄に対する信頼が低下した問題や、過当競争によるファブリケーターの体力消耗など、むしろ 21 世紀に鋼構造が衰退していくような要因の方が多く感じられる状況である。（もちろん震災を契機に数々の鋼製ダンパーや溶接部の脆性的破断防止の研究が精力的に行われ、研究者や技術者の努力により良好な社会的ストックの形成が進められていることは言うまでもないが。）

本論ではこのような状況を踏まえ、鋼構造が今世紀においても建築分野の主役であり続けることを願う技術者の 1 人として、今後の鋼構造技術の方向性を個別の技術に特定するのではなく、大きな方向性として提案し、論じていきたい。

2. 今後の鋼構造に求められるものとは

2. 1 既成概念をブレイクスルーするために

筆者は、建築構造設計を専門とする技術者である。日常業務では鋼構造だけでなく RC 造、SRC 造、木構造など様々な構造形式に携わっている。日頃から鉄の長所である軽量・高靱性・加工性や、短所である溶接施工の大変さ、座屈の問題などを学びながら構造設計を行っている。

ここでは既成概念をブレイクスルーするために筆者を含む 20 代後半～30 代後半の比較的若年層の技術者（15 名）により鋼構造に今後何を求めていくかブレインストーミングを行った。

2. 2 ブレインストーミングの結果

ブレインストーミングの結果得られた提案を以下に列挙する。なお既成概念をブレイクスルーするためにまったく技術的裏付けのない荒唐無稽な提案や筆者の調査不足で既に存在する技術も含まれる恐れ

もあるが本論の主旨をご理解のうえ批判はご容赦願いたい。

2. 2. 1 材料に関する提案

- ①形状記憶鉄骨骨組
外力を受けて変形しても熱を加えることで元に戻る修復性に優れた鋼構造。
- ②超高強度鉄骨
靱性はまったく期待せず強度だけを追求する。制震部材との組み合わせでスレンダーな超高層を実現する。
- ③耐火鋼の反対
きわめて熱に弱く熱を加えることで容易に倒壊する解体性に優れた鋼構造。
- ④発泡鋼板
無数の気泡を鋼材内発生させより軽量の鋼構造を可能にする。
- ⑤ヤング率調整鋼
ヤング率を自由に設定することで建物剛性は長期荷重と無関係に設定できるようになる。完全なる制震建物も可能となる。
- ⑥損傷自己修復性鋼材
地震時に生じた主架構の軽微な損傷を自己修復するような成分を開発し地震後の補修を不要とする。
- ⑦高減衰鋼材
鋼構造の弱点である居住性の問題を解決し、RC 造の独壇場である高層集合住宅に鋼構造を採用できるようにする。
- ⑧電炉のトランプエレメント抽出技術
リサイクル時代の今、電炉鋼は鋼構造に欠かせない存在である。トランプエレメントは現在希釈により対応しているが抽出技術があれば電炉鋼の活躍の場は飛躍的に広がると考えられる。
- ⑥電流により剛性が変化する鉄
電圧の強弱により鉄骨骨組の剛性が変化。地震や風等の大きさにより電圧を変化させ、骨組を最適な剛性にして応答を低減する。

2. 2. 2 架構形式に関する提案

- ①磁気浮上鋼構造物
磁気で浮上させた完全免震構造。地震力は完全にゼロとなる。
- ②ローコスト可変剛性架構
鉄の利点は磁性があることである。この性質を利用して地震時に様々な剛性をもてるようにブレイ

スを設置しておき普段は主架構と縁を切っておく。地震が発生したら即時に地震の特性を解析し最適な剛性になるように設置したブレースを選び電磁石を作動させるシステム。

③配管構造

柱梁を全て□か○にして中に配管として利用する。配管スペース用のスペースが不要。

④伝統工法鋼構造

伝統木組みのように、鉄にほぞなどを用いて、架構を形成する。

⑤鋼製ブロック壁構造

鍛造製のSB（スチールブロック）をCBのように積み上げて鋼製壁を構築する。各段はボルトまたは溶接で接合する。

2. 2. 3 接合や施工法に関する提案

①鉄骨接着接合

鉄骨用接着材を開発し溶接やボルト接合をなくす。

②全体溶接建物

仮ボルトで組立てて最後に1階の足元から大電流を流して建物の接合部を溶接するシステム

③鉄骨現場打ちシステム

低溶融点鋼を開発し、鋼製型枠に現場で打設する。コンクリートではないと難しい形態も鉄で可能になる。

2. 2. 4 解体やリサイクルに関する提案

①鉄骨オークション

インターネットのオークションで解体予定の鉄骨を安く収集し新築のS造をつくる。鉄骨のサイズと接合部の状況の情報が必要。

②解体用バクテリア

鉄を瞬時に激しく腐食させるバクテリアを育成し、解体に使う。

3. 設計者が夢見る鋼構造技術

構造設計は様々な制約条件を統合して建築空間を創造する行為である。最近では経済状況を反映してますます低コスト・短工期で安全性の高い建築を求められる場面が増加している。前章で列記した提案はその制約条件の中で「鉄にこのような性能があればもっと鋼構造を採用する場面が増えるのではないだろうか？」という構造設計者の素朴な夢と解釈することができる。

材料を生かした設計をする役目は構造設計者にある。鉄という材料の特性が大きく変わらない限り構造設計者は架構形式で革新し続けていく必要がある。しかしながらこの革新を架構形式だけで行っていくにも前世紀である意味あらゆるバリエーションが模索されているため、限界があるとも考えがちである。設計者の夢で材料に関するものが多いのはそのためではないだろうか。

建物を設計する側からは荒唐無稽ではあるが新材料（新鉄骨）が必要であるというのが結論であろう。一方、材料を供給する側のミルメーカーの技術者や研究者の方々、実際に鉄骨を製作するファブリケーターの方々には上記の提案をどう捉えられるのであろうか？「素人が荒唐無稽なことを」となるのか「なるほどやってみよう」となるのか。

いずれにせよ個々の技術者がそれぞれの業界や会社の枠組みの中で考えるよりも「今世紀も建築の主役は鉄で」と思う技術者が枠を超えて集まる場をつくり議論の中から開発の方向性を決定するべきであろう。大袈裟に言えばそこに鉄の未来がかかっている。本論では技術提案ではなくこの技術を生み出す土壌をこの日本に生み出すことを提案する。

多くの偉大な先輩技術者・研究者達が鉄の発展を支えてきた。我々はその恩恵にあずかり設計をしている。身近なところにもはじまりは誰も相手にしないような提案があったのではないだろうか。FR鋼や耐候性鋼など現在普通に使われている材料にも先輩達の苦勞がしのばれるのである。我々は停滞したこの国の状況から図-1の点線に示すような技術の限界を勝手に考えているのではないだろうか？先輩達が常に技術は向上していくものだと思つたように我々も図-1の実線のような技術の未来に希望をもって進んでいく必要があると考えている。鋼構造に関わる技術者達がこう考えて進めば21世紀鉄は引き続き建築の主役であり続けるだろう。

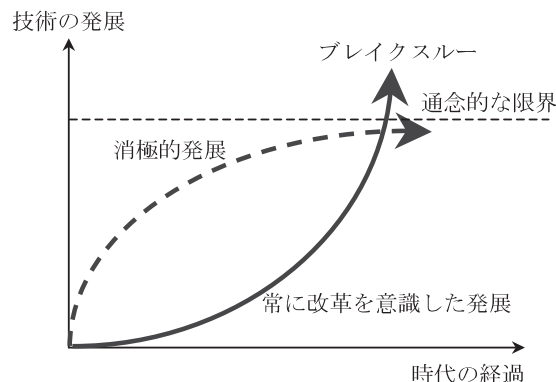


図-1 技術の発展と時代の関係

4. おわりに

状況の厳しさから鋼構造は現在衰退の危機にあると思われる場面に遭遇することが増えてきている。しかしながら鋼構造に関わる技術者が協力し、真摯に鋼構造の未来を見据えた議論を行い、新たな材料や架構に挑戦していくことで前世紀末と同様に今世紀末においても建築分野の主役であり続けると確信している。やはり鉄ほど素晴らしい材料はないと信じるからである。本論における提案がその一助となり研究者・技術者・一般市民の議論が行われるようになれば幸いである。

再利用可能な粘弾性接合部をもつクモの巣状空間構造システムの開発

空間構造 再利用(リユース)	武藤 至*) 粘弾性接合 擬自己建て方	クモの巣 可動性
-------------------	---------------------------	-------------

1 はじめに

空間構造システムは、20世紀に急速に研究開発され「システムトラス」と呼ばれる優れた手法が多用されてきている。一方で、サステイナブルな環境負荷低減のニーズが問われ¹⁾、同時に全地球レベルでのエコロジー問題から資源の再利用²⁾も現実の建設行為で議論が始まってきている。

提案する空間構造システムは、両者を考慮した次世代の建設に貢献できるものと考えられる。すなわち、(1)空間構造の形態デザインの多様化のなかで、ある意味ルネッサンスとして「クモの巣の建設プロセスおよび、素材特性」に着目する、(2)接合部の新たな開発方針として「粘弾性」あるいは、「ガタ」の論理をメカニカルジョイントシステムへ導入する、(3)部材要素レベルでの再利用、すなわち「ディスジョイント」の概念の実用化、を提案するものである。

2 空間構造形態のデザイン

自然物の形態を模倣し、例えば「シェル」構造が有名である。ケーブル、膜およびネット構造は、クモの巣の模倣による場合が多い。つまり、自然物から何らかの形態生成アルゴリズムを考察し(空間)構造形態のデザインを実現する研究がコンピュータ利用下で研究する分野が「Structural Morphology」として台頭してきている。

3 クモの巣の建設プロセスと素材特性

クモの巣を直接「生物生態学」として従来から研究され、クモの巣の巣づくりのメカニズム、クモの糸そのものの材料特性と風を受けるときの挙動分析、巣づくりの修正と餌の確保など具体的な研究成果が報告されている。基本は、素材が粘性(粘着性)を有しつつ、断面強度が寸法の割に高いとか、縦糸横糸のスパイラルの形成メカニズムとその機能などが研究されてきた。構造工学の分野でも、この事に着目し1990年代から2000年代に再考されつつある。本研究は、クモの巣の製作プロセスと糸の組合せにおける「接合部」の意味と、支持材に対する糸の配置など通常のネット、ラチス構造物の網目パターンと基本的な構造特性(接合部特性を反映した)について検討してきている。特に、クモの巣の建設過程を模倣、模擬してどのような、網目状空間骨組が可能なのかを考察した。結局、実構造物(人工物)との違いが、根本的な設計概念の相違によって明白である事が分かってきた³⁾。そこで、クモの巣のメカニズム(網目生成アルゴリズムを含む)をフラクタル幾何学で修正して、人工物の形態デザインアルゴリズムへ還元する手法が有効であろうと確認し

ている。素材レベルでは、単位強度(断面積、部材長さあたり)を同程度に確保でき、接合部のあらたな限界をも実現可能なモデルを構築する必要があるとの結論に達した。

4 粘弾性ジョイントとディスジョイントのメカニズム

以上の、構想を実現する時「接合部のモデル化」と最終形状をどのようにして初期形状から発展させるのかが、重大なテーマであると判断される。まず、接合部は「粘弾性特性」を有し、かなりの幾何学的非線形挙動が許容されるジョイントシステムの開発が急務である。また、それぞれの接合部と部材の単位構造要素が、十分フレキシブルかつ、可動性を期待できる施工、建設技術の開発も重要な課題⁴⁾となろう。ひいては、ディスジョイントのメカニズムと完成形状からの部分構造(不完全形状、不安定構造系の意味)へのリダクションと、あわせて、要素に分解してから、再構築(部材と接合部の再利用の意味)のプロセスと、実現技術を今後開発研究することが必要と考えられる。

5 実現の可能性と問題点

以下に、現時点までに想定される可能性について、考察している。なお、既存の建設、施工手法からみても、かなり新しい技術を必要とする事もあって以下に述べる展望は、相容れない部分もあろう。

ご存知のように、既存構造物(空間構造系)の部材データや構造データおよび基本的な挙動データ(座屈特性、耐力特性など)が、予め「ドナーバンク」に類似のデータベースに登録されている事⁵⁾が前提となる。また、経年効果を考慮し強度低減に関するデータも共存している事が不可欠である。なお、本論では、いわゆる「使い古しの感情論」は、考慮していない。

既に「コンバージョン」の考え方から、主に躯体以外の部分：内装、家具など、を転用して室内の利用方法が変更になる建物の使い方が進められている。もちろん、再利用において元の用途を変更する事は当然であるが、本論では、躯体構造自体も含めて組替えてきな転用が主眼であり、その際思慕の変更、形状の変更をも可能にするリユースを提案している。次頁には、本論の発想に関連する研究と最近のプロジェクト及び実施例(既存建物の用途変更に伴う屋根架構の新築例)を使い可能性と問題点を概略する。

Reusable Spatial Structure System like Cob Web with Visco-Elastic Joint Connections

Fig. A クモの巣の例（上に凸の実現例）

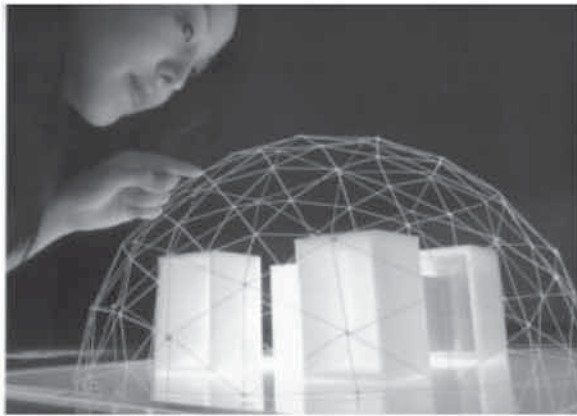
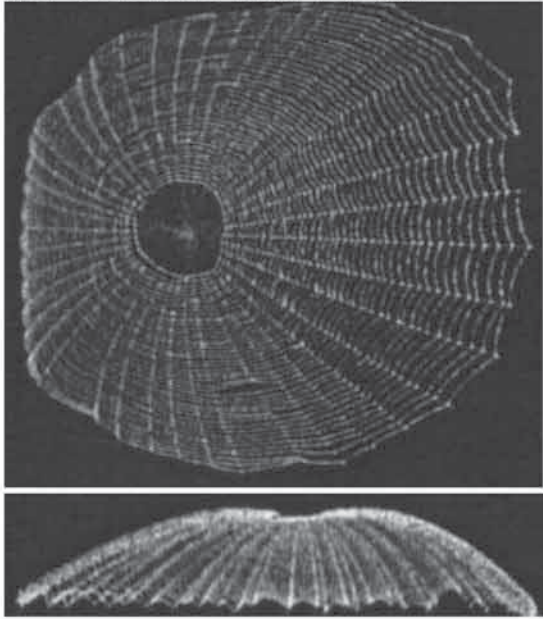


Fig. B ドームを月へプロジェクト (引用)



Fig. C 再利用 (屋根架構の施工例)

具体的な提案例を以下に概説する。

Fig. A は、クモの巣が風によってむくみを持っているシミュレーション例である。本論では、念男性

*)岐阜工業高等専門学校

ジョイントの遊びを利用して、吊り下がっている状態から自己可動により、「タグ」を閉めるような周方向へのポストテンションを導入する事で粘弾性メカニズムが調整される^{b)}。もちろん、網目パターンは、多様であり Fig. B にあるドーム状の構造形態が実現できる。

Fig. B では、地球上での製作を粘弾性ジョイントで実現する時必要なら、「折り畳み」可能なファブリケーションののち、月面まで搬送していける。また、規模など仕様に応じて形態変化が可能となろう。

Fig. C は、実際に施工されたものであり、もちろんリユースではないが、既存のガスタンクを通常の集合住宅に再利用する為、屋根架構をラチスシェルで作り変えたものである。本論で提案する手法では、この屋根架構に既存の構造物をなんらかの形状、規模変更の後、再利用する事になる。すわなち、粘弾性ジョイントの一部をディスジョイントして調整し搬送してクレーンで組み立てる事が可能となる。

ここで、最近提案されている「ドナーバンク」データベースへ登録されている既存のラチスシェルが、再利用できると考える。なお、ディスジョイントの論理と技術が実現できれば、溶接接合と本論の粘弾性ジョイントとを複合して新たな、構造形態の創生が要求された場合の再利用も十分可能となると考えられる。さらに、クモの巣の建設プロセスで素材そのものがねばねばなものも必要があれば開発されよう。そのとき、さらに複雑かつ自由な屋根架構形態が議論できるものと考えられる。

課題など

上記より、「ディスジョイント」のメカニカルモデルと「粘弾性ジョイント」の開発技術の実現が、本論の提案の基本的な克服事項であるため、今後具体的に検討する必要がある。

参考文献

- 0) 河村研究室：リカレント建築・都市研究会ニュースレタ、No. 1 創刊号、1999. 11
- 1) 2nd Int. Seminar on Environmentally Compatible Structures & Structural Materials, Czech Tech. Univ., Prague, Oct. 2001, 220p.
- 2) 河村廣：建築構造に求められるものは何か、Structure No. 72, 1999. 10, 21-24
- 3) 河村・谷他 2 名：GA を用いた鉄骨建築物解体順序の最適化、AIJ 近畿支部研究報告集、H13, 289-292

* 現在研究発表中の論文など

a) クモの巣のメカニズム

Space Structures 5 @ University of Surrey, Aug. 2002

b) 再利用関係

3rd Int. Prague Seminar on Environmentally Compatible Structures & structural Materials (IASS WG18), JUNE 2002

解体鉄骨の商品化とそれを利用した環境負荷低減建築構法

田中 直樹*

キーワード1：古鉄骨 キーワード2：環境負荷低減 キーワード3：柱材
キーワード4：床材 キーワード5：リユース キーワード6：コンクリート塊

1. 危機に瀕したRC系部材

鉄骨建物は着工建築面積から言えばRC建物より多く、ここ2、3年は木造を抜いて首位である。短工期を武器として低層建築(工場、倉庫、店舗)で圧倒的なシェアを誇る。しかし、中高層住宅や高層事務所の花形部門では、高層RC建築や鋼管コンクリートにコスト競争で破れ、これが全体的な鉄骨衰退の感をあおっている。だが、悲観することはない。図1に建設副産物排出量(発生土は除く)の推移を示す¹⁾。2002年度は全体で1億8200万トン、土木工事が55%、建築(新築、解体)工事が45%である。種類別ではコンクリート塊(コン塊)やアスファルト系コンクリート(アスコン塊)が約1億4000万トン占める。これらは、2010年には1970年代RC系建築物が更年期に達するため2~3倍(約2~3億トン)に膨張する。コン塊やアスコン塊は、従来路盤材、路床材として処理されてきたが、その年間需要2億トンは飽和状態に近い。今年5月に始まった建設リサイクル法は、これら溢れ出るコン塊等処理のための技術開発費用としてRC系構造物のコストを確実に押し上げる。一方、ほぼ100%リサイクルに到達した鉄骨にはこの危惧がなく、未来は比較的明るい。但し、人類に突き付けられた環境負荷低減は生易しいものではない。

本論文は、鉄を資産蓄積の面からみてその積極的な利用を促すと共に、解体鉄骨の商品化を図りそれを再利用することで資産を更に有効利用し、最終的に環境負荷の少ない建築を提案するものである。

2. 資産としての鉄骨の積極的な利用

自動車、造船、機械等を含めた我が国の年間鉄鋼生産量は約7400万トン、その内建築は2100万トンである²⁾。図2は、建築の内鉄筋や薄鋼板を除く鉄骨の需要で、平均的に年間800万トン前後で推移している³⁾。図中の累積需要量は、1970年以前は、1959年のH形鋼生産開始

を起点として1969年度の600万トンまで直線補完し、2002年度以降は年間一律700万トンとして求めたものである。2002年度現在、累積需要量は約3億トンに達し、トン当たり10万円とすると約30兆円の資産を有することになる。これは、ここ2、3年の民間建設投資額に相当し将来も確実に増加する。RC系部材が今後確実に負の資産(負債)を蓄積していくことを考えると、早急に土木・建築とも鉄系部材へ移行することが望ましい。

3. 解体鉄骨の商品化と環境負荷低減

鉄骨建物の建設に際し、部材のリユースは魅力的である。しかし、これには数十年先の見通しや一品注文生産における建築のモジュール化の難しさ等が立ちはだかる。また、用途変更や増改築は何ら脈絡なく突発的に発生する。建物が玩具のレゴブロック等で構成されていない限り、解体・建て替えは避けられない。現時点では、「必要に応じ解体し使える部材を次に使う」との発想が、我々が慣れ親しんだものであり現実的である。先の図2には、新築は30年で解体するとして求めた解体鉄骨の累積量を示してある。2002年度では既に5000万トンにも達し、年間鉄骨需要の6倍に相当する。現段階ではこれらは全てスクラップとして回収され電炉や転炉により再生されている。ここでは、これら解体鉄骨を利用した建材並びにその商品化、そして試みとして大半をリユース、リサイクル材で賄った環境負荷低減構法を示す。

図3は再利用可能な建築解体部位とその商品流通のためのインターネット(IT)化を示したものである。解体部位として、梁は設備配管のための貫通孔、鉛直スタフナ、床との合成のためのスタッド等が再利用を阻む。また接合部は溶接が密集し健全部分が期待できない。従って、通常のラーメン骨組からは、残念なことに柱だけしか利用できない。しかし、これが使用鉄骨量の20%程度としても、2002年度でも1000万トンの量となる。この

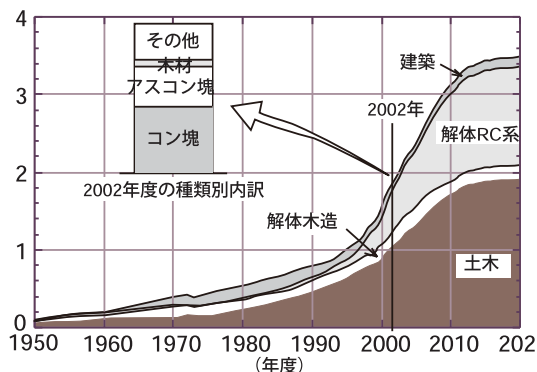


図1 建設副産物排出量の推移¹⁾

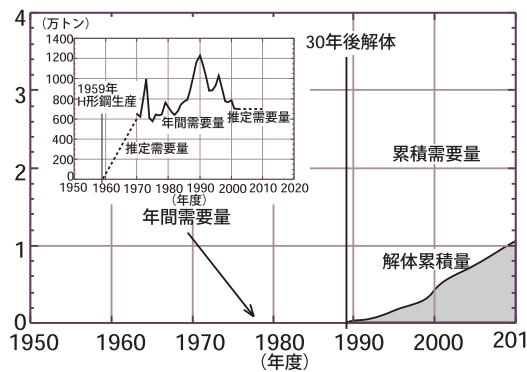


図2 鉄骨累積量と解体累積量の推移

Merchandising of scrapped steel members and its use for environmental-friendly buildings

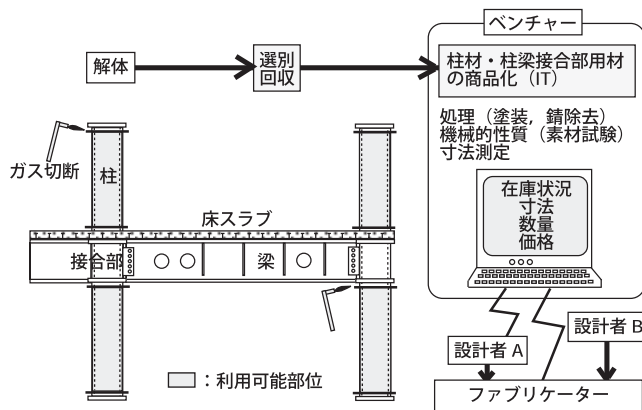


図3 解体部位と商品IT化

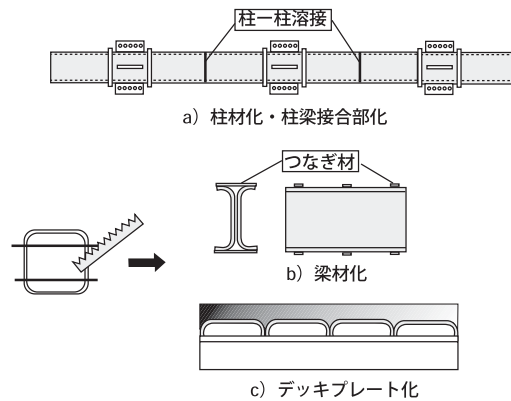


図4 解体鉄骨柱からの建材再生

表1 解体ビジネスの成立性

(万円/トン)				
	回収・保管	材料費	加工費	合計
新品	—	10	5	15
古品	1*1	2*2	4*3	7

(注記) *1: ガス切断費用は通常解体行為として含めない
 *2: くず鉄0.5万円/トンを基準
 *3: 曲げ加工費低減

解体鉄骨は素材試験により機械的性質が明かされ、塗装や錆が除去され、寸法が測定される。これらは、保管されると共に在庫状況としてITにより発信される。設計者は在庫部材を利用した設計を行い、ファブリケーターは部材を取り寄せ、それを図4のように柱材、梁材、デッキプレート材に加工する。このビジネスの成立性をコストの観点から見たものが表1である。算定根拠が幾分恣意的ではあるが、解体鉄骨利用品(古品)は新品の50%程度となり十分競合できる。

図5は解体鉄骨及びコン塊から再生された部材を床版に使用し、環境負荷低減を極力意図した建築である。デッキプレートのみで十分床荷重と剛性が確保できると考えると、歩行感触としてのコンクリートが必要となるが、これにコン塊を利用した長尺でしかも相互連結を考慮した床材を使用する(現状技術で可能と判断)。勿論、両者の間には防水、防音、固定等の機能を有したシーリング層が必要である。梁はダブルウェブなので設備開孔のための補強は不要となる可能性もある。なお、解体鉄骨利用は初めてのことであるから、以下のような配慮が必要である。

- 建築基準法の緩和：使用済み鉄骨材の追加
- 用途制限：工場、倉庫、事務所、店舗
- 層数制限：3層以下
- 応力制限：部材弾性
- 寿命制限：5～10年程度
- グリーン購入法による法的支援

これらを眺めると、飽き易く短絡的な世の中に適合しする。更に、このビジネスを展開させて行くためには以下の事が必要である。

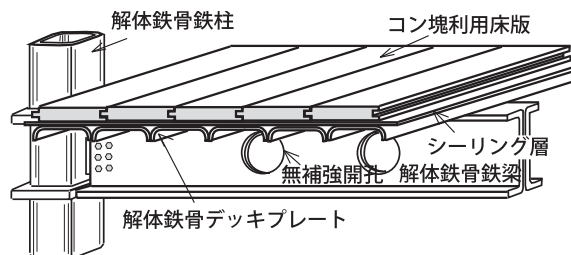


図5 解体鉄骨材とコン塊利用床版による建築構法

- 鉄骨の積極的な使用：地下に着目した桑村等のスチールファウンデーション⁴⁾は良い例である。
- 分離しやすく再利用しやすい部材：鉄骨でも梁は無開孔、無スタッドボルト、無補強スチフナが望ましい。
- 分離しやすい構法：SRC、CFT、RCなどの断面合成構造から異種部材分離構造への転換し、選別を用意にする。
- 鉄骨材のアイデンティティ：マイクロITタグ等による使用履歴自動認識は有効である。

4. まとめ

建設副産物発生 の面からRC系構造物の危惧的状況を鑑み、積極的な鉄骨の利用を推奨した。また、緊急な環境負荷低減要請に対し、解体鉄骨の再利用を図りそれを商品化することで資産を有効利用するとともに、コン塊も利用した構法を提案した。目先の利益を自制し将来に思いを馳せれば、鉄骨ひいては建築界の未来は明るい。

参考文献

- 竹ヶ原啓介, 佐藤明子: 建設リサイクル法とリサイクルビジネス, 建設物価5月号, pp.29-35, 2002年
- 千田光: 鋼材の資源循環環境負荷, 日本建築学会鋼構造運営委員会PD資料, 2002年8月, pp.15-24
- 鉄構技術: 平成2年までの着工面積と鉄骨需要, 1991年3月, p.93, 2001年度の着工面積と鉄骨需要量, 2002年6月, p.87
- 桑村仁, 伊山潤, 宮澤秀明: スチール・ファウンデーション(鋼製基礎), 建築雑誌 vol.117, No.1488, 2002年5号, pp.81-82

*) 鹿島技術研究所 建築技術研究部

鋼の高比強度を活かした環境適応型無柱空間構造：スケルトンシェルシステム

単層ラチスシェル構造
可変空間

杉崎 健一*)
ケーブル構造
新素材

リユース
省力化工法

1. はじめに

大きな空間を構築することは、建築の原点である。鋼は比強度の高さを活かし、多くの大空間・大スパン構造建築に利用されてきた。また、空間構造には、常に、最先端の鋼構造技術が使われ、同技術の発展に大きく寄与してきた。これまでの空間構造技術の開発は、「無柱空間をいかに合理的に構築するか」に注がれてきた。近年の社会情勢を考えると、21世紀には、さらに次の技術が求められる。

- (1) 質の高い構造
- (2) 社会環境の変化に適応する構造
- (3) 自然環境の変化に適応する構造
- (4) 合理的な生産
- (5) 新技術分野への展開

本論文では、上記5項目の技術を導入した新しい空間構造「スケルトンシェルシステム」(図1)についての概要と21世紀における可能性を述べる。

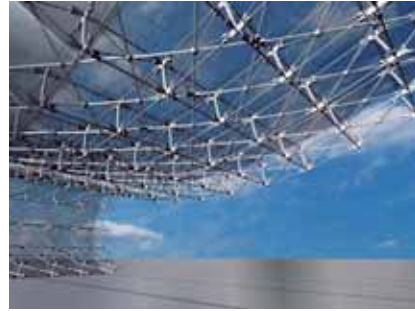


図1 スケルトンシェルシステムのイメージ

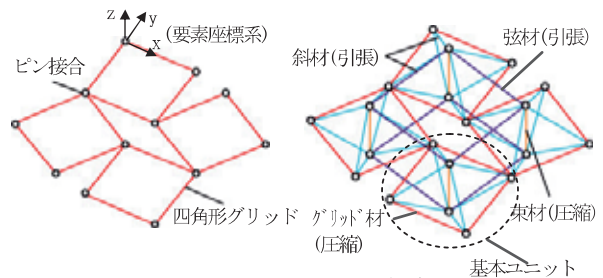


図2 構造システムの基本

2. 構造システムの概要

図2に本構造の構造システムの基本¹⁾を、図3に基本的な力の抵抗方法を、図4に接合部詳細例を示す。本構造は、構造的に不安定な四角形グリッドで構成するピン接合単層ラチスシェル構造の上下に細い引張材(以下、弦材という)を配置し、一般的にピン接合の単層ラチスシェル構造にはほとんどない面外曲げ剛性(xあるいはy軸回りの曲げ)を付加した構造である。面外曲げ剛性を付加することによって、任意の形状でも全体座屈を生じ難くし、形態抵抗を利用せず自由な形状の屋根、壁あるいは床を構成できる。弦材とグリッド材間は、斜材と束材によって接続し、形状を保持させる。図2に示すように、初期に、弦材と斜材に引張軸力を、束材とグリッド材に圧縮軸力を導入することによって、構造全体を部材の軸力のみで抵抗する自己釣り合い型構造とし、形態を保持する。また、適切な初期軸力の導入によって、外力に対して常に、弦材と斜材は引張軸力のみを、束材とグリッド材は圧縮軸力のみを発生させることができる。各構成部材の応力的な役割分担の明確化によって、引張材に鋼ケーブル、圧縮材に鋼管等のように、各種鋼材の特性を十分活かすことができ、鋼の高比強度を十二分に活かした軽量化と経済設計を可能にする。

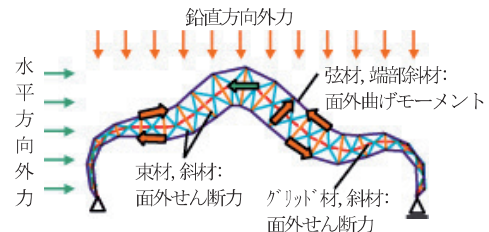


図3 構造システムの基本

3. 質の高い構造

空間構造は、不特定多数が利用する建物や地震災害時等の防災拠点に利用されることが多く、さらに、社会資本のストック化が進む中、質の高い構造が要求される。本構造

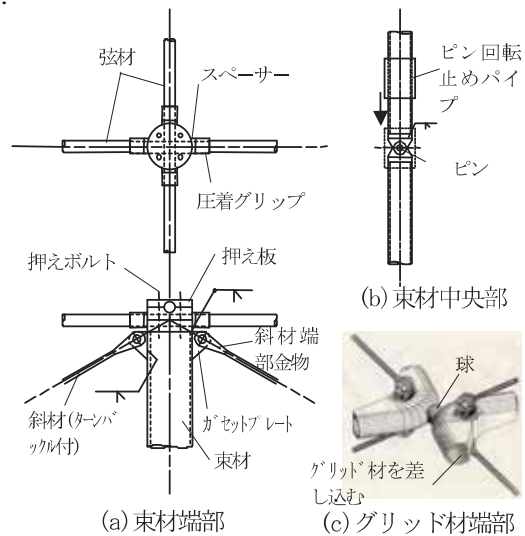


図4 接合部詳細(例)

は、軽量であるため耐震性能に優れ、地震国のわが国に適した構造である。一方、軽量でありながら、高い耐力、高い剛性および高い冗長性を有している。以上の本構造の構造性能は、構造実験および構造解析によって検証している¹⁾。また、弦材にアクチュエーター等を設け、荷重時の軸力変動を制御する知的適応構造物も構築可能である。

4. 社会環境の変化に適応する構造

経済活動の成熟に伴い、都市を含めた地域性が重視されるようになり、個人生活や企業活動も多様化してきた。空間構造においても、社会環境の変化と多様化に適応する必要がある。本構造は、軽量かつ弦材の長さのみを変化させることによって図2に示す基本ユニットの組み合わせのみで任意の形状を構成できる。従って、既存建物に屋根を架ける、増改築、建物形状の変化(図5)等、社会環境変化に伴うニーズに柔軟に対応できる。

5. 自然環境の変化に適応する構造

地球温暖化が国際的な問題になっている。現在、鋼は100%リサイクル可能であるが、今後、100%リユースが課題である。本構造は、同一基本ユニットの構成のみで任意形状の空間を構成できる。また、各構成部材の応力的な役割分担を明確にすることによって、接合部を簡易にし、溶接を最小限にした乾式接合としている。この部材構成と簡易接合部によって、基本ユニットあるいは構成部材をそのまま再利用して、別の異なる形状建物を構築することができる(図5)。本構造は、ほぼ100%リユース可能であり、自然環境に極めて優しい構造である。

6. 合理的な生産

少子高齢化に伴い、今後、労働人口の減少が予想されている。労働集約型産業である建設業においては、機械化等

を含め、革新的な生産合理化が必要である。本構造は、地組した基本ユニットを弦材で接合し、束材の伸長あるいは屈伸のみのワンタッチで初期軸力を導入する(図6)。また、軽量であるため、大ブロックのプレアッセンブルが容易である。よって、機械化等による労務低減を可能にする。

7. 新技術分野への展開

アルミニウム合金²⁾やCFRP³⁾等、建築においても新しい材料が用いられるようになった。本構造は、鋼管製グリッド材をアルミニウム合金やCFRP製管に置き換え、鋼構造分野において発展した技術を他の材料技術に応用可能である。また、図7に示すように展開構造を構築し、地上構造物だけでなく、宇宙構造物にも適用できる。

8. まとめ

本論文では、スケルトンシェルシステムが21世紀に求められる5つの技術(第1章参照)を有していることを示した。鋼構造技術は、鋼材料建築に適用するだけでなく、新しい材料や建築以外の構造物にも応用可能である。この応用は鋼構造技術発展への1つの手掛かりとなり、本システムは、その1例として有用である。

参考文献

- 1) 兼光知巳他:引張材で補剛したピン接合単層ラチスシェル構造に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 561, 2002年11月(掲載予定)
- 2) 杉崎健一他:アルミニウム単層トラスの構造挙動に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 480, pp. 113-122, 1996年2月
- 3) 米丸啓介他:CFRPトラス部材の圧縮特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 556, pp. 197-204, 2002年6月

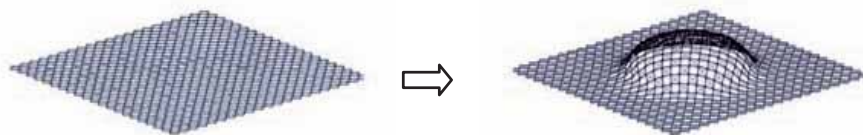


図5 社会環境の変化に伴う形状変化(平板からドームへ)

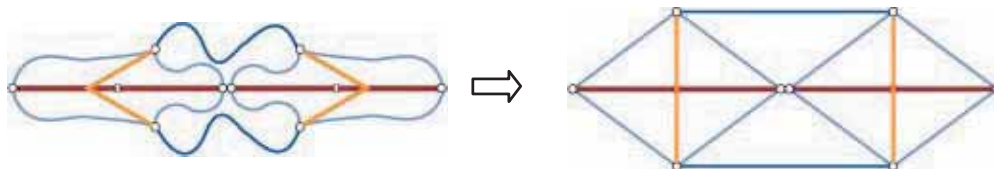


図6 束材屈伸による初期軸力導入



図7 展開構造への応用

*)清水建設(株) 技術研究所建築研究開発部兼構造研究開発部

鉄を身近に

山田 耕司^{*)}
道具
一般市民

日曜大工
簡単な技術

材料として鋼材
普及活動

1. 序

日常生活の中で見かける鉄は、ほとんどが工業製品となっている。鋼構造で用いる鉄もファブリーケーターで作成した鉄骨（半製品）を現場に搬入して組み立てる。一方、下地材として用いる軽量鉄骨は素材で現場に搬入され、現場で加工・組立が行われる。

さて、「21 世紀、鋼構造技術は何ができるか」、「鉄を使った新しい空間・機能をもった建築を支える技術」を考える前置きとして、鋼材の性質を考える。建築構造材料として見た鋼材は、物理的品質が安定している、耐火性が低い、酸化・腐食する、接合法が主に 2 種類存在する、などがある。この内、耐火性に対しては耐火鋼の開発、耐火被覆材の改良が行われている。腐食に対しては耐候性鋼が開発されている。また、さらに高強度の鋼鉄の開発も行われている。「鋼構造技術は何ができるか」という問いに対して、答えは「(お金をかければ)ほとんどのことが技術的には可能である」となるだろう。また、リサイクル材の品質を一般材程度の品質に保証するのは大変な手間を必要とし、低性能材料の有効利用策を検討する必要もあるだろう。リサイクル材の活用を考えると図 1 のように安価な材料としての普及、一般民生材料としての普及、木材代替品としての普及の 3 つが考えられる。

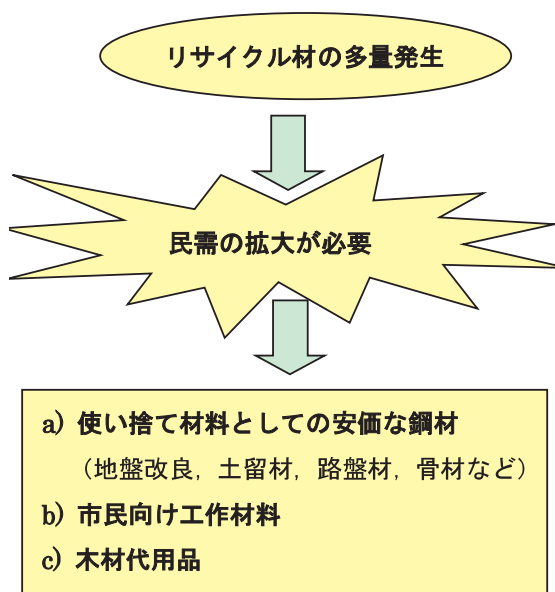


図 1 リサイクル材の活用に向けて

一方、技術者にのみ扱える材料は、製品としてしか市場に流れない。リサイクルを意図して一般に普及させるには、鋼材を一般市民が扱える身近な材料とすることが「21 世紀」の課題と考える。つまり、図 1 中の b), c) を目的とした材料開発が必要となる。

2. 身近な材料

一般市民が扱える身近な材料として、木材がある。我々は小学校から木工に親しみ、木を肌で感じ、木を自らの手で加工してきた。それ故、木材を加工するための道具、加工方法、注意点などを把握している。しかし、鋼材に関して同様の経験を持つ者は非常に少ない。図 2 に鋼材の一般市民への普及を阻害する負の連鎖を示す。この負の連鎖が回転することで、一般市民が日曜大工感覚で鋼材を使用する機会を奪っている。そのため、本来生ずるはずの市場も活性化していない。一方、木材の場合は図 2 の“ない”が消え、正の連鎖が生じ、民生材料としての市場が発生している。つまり、鋼材の一般人への普及を計るためには、木材と同レベルで一般人にも加工可能な鋼材、加工器具、接合用具の開発と学校における教育活動、一般への普及キャンペーン（啓蒙活動）が必要と考える。

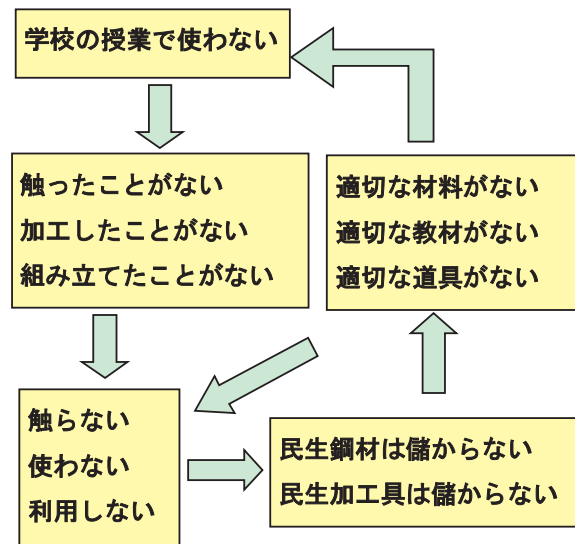


図 2 鉄鋼になぜ親しまないか

3. 商品開発目標

これまで、軽量型鋼を用いたスティールハウスの開発は行われているものの、鉄を木材と同レベルにまで身近にする研究開発は行われていないようである。そこで図3に示すように、木材および木材用加工具の代替品となる鋼材、加工器具、接合用具の開発が必要である。

鋼材の一般的普及を計るためには、木材と同等レベルの長さ当たり重量、加工性、接合性を有する必要がある。ここで定義する加工性、接合性とは、木造軸組構法住宅の木造部分を構法・施工法をそのまま鋼材に置き換えることのできるレベルを指す。従って、1人の人間が扱える重さの材料、施工道具である必要がある。

そこで次の商品開発目標を設定する。

- ・木材と同等の重量の鉄骨（柱で 7.2kg/m、梁で 30kg/m 以下）
- ・上記の鋼材専用の梁柱仕口部品
- ・上記の鋼材に簡単に取り付けられる2次部材接合具（2次部材は既製品の軽量型鋼等を利用、簡易なものは接着、機械的接合で取り付け）
- ・上記の鋼材の切断、孔あけ、を容易に行える電動工具（木造用市販レベルの価格で）
- ・上記の鋼材専用の安価なトルクレンチ
- ・スタッド溶接程度の簡易な溶接法およびその機材（家庭用品市販レベルの価格で）
- ・以上の利用ガイド（一般的ガイドとマンガ）

以上が商品開発目標となる。

また商品開発と並行して、次節で取り上げる普及活動サンプル品として、学校用教材、小学生の夏休み課題用キット、犬小屋キットなどを開発する必要がある。

4. 普及活動

普及活動には、2つの主軸が考えられる。1つは学校教育での利用、もう1つはホームセンター、東急ハンズなどでの一般市民へのデモンストレーションである。

学校教育に対しては、小学校4年～中学校3年間の教材開発と教育研究会でのデモンストレーション。学校への教材貸し出し、が必要となる。教材例として、表1の例が考えられる。また、小中学校への出張授業を大学などとタイアップして行う方法もある

一般市民への普及拠点として、各地に存在するホームセンターは有効と考える。しかし、商品化初期における一般市民へのデモンストレーションとして、東急ハンズでのデモンストレーション、モノ・マガジン（文林堂）などの特集記事、広告が必要となる。広告方針として、本田技研工業が米国でオートバイを売り出した時のキャンペーン「You meet the

nicest people on a Honda」のように利用法、入手法などを分かりやすくした広告を行う必要がある。また、当面は、工具の利用方法などを説明できる販売代理店（できれば金物屋程度）などを展開する必要がある。

5. 型式認定

以上に述べた鋼材は、木造軸組構法住宅用木材を目標として開発するので、できれば簡易な構造設計法を確立し、型式認定を取ると良い。型式認定を取り、誰でも計算可能な簡単な構造設計法（もしくは設計ツール）が存在し、木造と同等の重量、加工性を有するならば、木造と並ぶ構法になる可能性がある。

6. 結語

本報では、鋼材のリサイクル性を生かし、鋼材の利用促進を図る方策として、鋼材の一般市民への普及を提案し、その具体的対策を述べた。鋼材の利用を促進するためには、高付加価値の鋼材の開発、新たな需要の喚起が一般的手段であるが、リサイクル性を十分に生かすには、需要の喚起が必要と考える。本提案はその1つに過ぎず、時間と初期（教育・啓蒙）投資を必要とする。しかし、鋼材の有効利用を図る上では良い手段と考える。

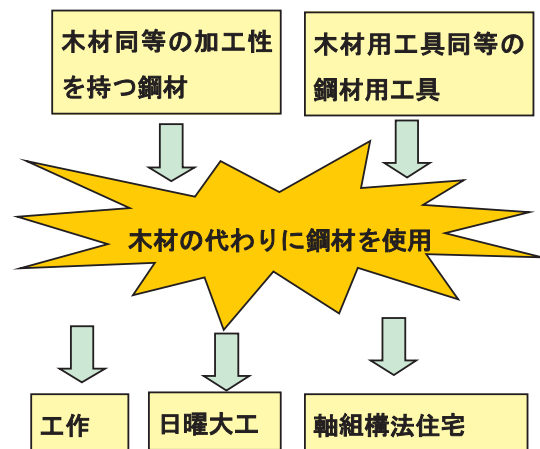


図3 商品開発と普及

表1 教材例

小学校4年	ボルト接合トラス橋キットの作成
小学校5年	ベルトドライブによる4輪車組立キットの作成
小学校6年	ボルト接合によるイスの作成
中学校1年	ボルト接合による小屋キットの作成
中学校2年	ボルト接合による犬小屋の作成
中学校3年	板金加工と溶接による工具箱作成

*)豊田工業高等専門学校

第4章 第二期の活動成果

4.1 21世紀鋼構造フォーラムWG1の活動

- ①高性能要素の建築分野への適用
- ②ユニットセル構造システムの提案
- ③地震エネルギー集中型人工地盤を用いた地域防災構造システム

本WGでは、資源循環社会を構築するための新たな要素技術や計測技術に基づき、図4.1に示すエネルギー集中型人工地盤と再利用可能な簡易ユニット建築による地域防災制御システムの提案を目指し、以下の3領域の研究を行った。

領域1)：高性能要素との複合化による鋼部材の高機能化：高性能材と鋼材とを複合化した新たな要素技術の可能性検討、及び高性能材を接合部材やセンサーとして機能させる新しい利用法の提案を行った。

領域2)：ボックス型立体フレームによる積層建物：角形鋼管を三方向に溶接した単一ユニット同士を、着脱可能な機械式継ぎ手により3.3m角の立方体フレームに組み立て、さらにこの立方体フレームを連結・積層することで建築物を構築する架構システムの提案を行った。

領域3)：地震エネルギー集中型人工地盤：人工地盤に地震エネルギー吸収のための鋼材ダンパーを設け、大地震時にも人工地盤上の建物をほとんど無被害にできるような人工地盤について検討を行った。

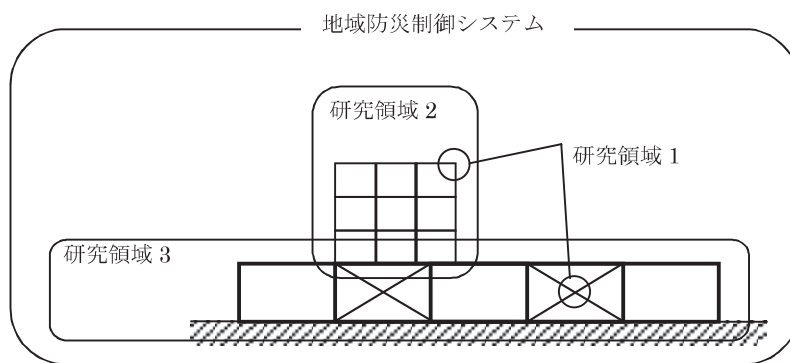


図4.1 地域防災制御システム

本研究の成果を以下にまとめる。

- ・高性能材料の力学挙動と損傷検出に関する検討を行い、その特性を明らかにした。
- ・ボックス型立体フレームを積層して構成する多段免震構造の耐震性能を、基礎免震構造と比較して明らかにした。
- ・人工地盤層で建物への入力地震動を低減することを目的とした地震エネルギー集中型人工地盤の構造設計法、及びその有効性を明らかにした。

高性能要素の建築分野への適用

21世紀鋼構造フォーラム WG1

自己増強
劣化診断

高 靱 性
繊維補強

リユース
複合部材

1. はじめに

部材の高性能化には、①素材そのものが優れた特性を有するものと、②異なる素材との複合化により優れた特性を有するものがある。①については、高強度・高靱性材料、自己修復材料や形状記憶合金等が、一方②については、繊維強化した複合材料等が挙げられる。これら高性能要素の現状技術を紹介し、建築分野への適用方法について述べる。

2. TRIP 鋼

2.1 TRIP 鋼の特徴

特定部分に使用される自動車用鋼板や一部のオーステナイト系ステンレス鋼には、図1に示すように応力がかかり、あるひずみに達すると原子の結晶構造として準安定のオーステナイト（面心立方格子）が、加工誘起マルテンサイト（体心立方格子）に変態し、強度、延性が増加する性質がある。このような変態現象の起こる鋼材は「変態誘起塑性鋼」、通称「TRIP (Transformation Induced Plasticity) 鋼」と呼ばれている¹⁾。

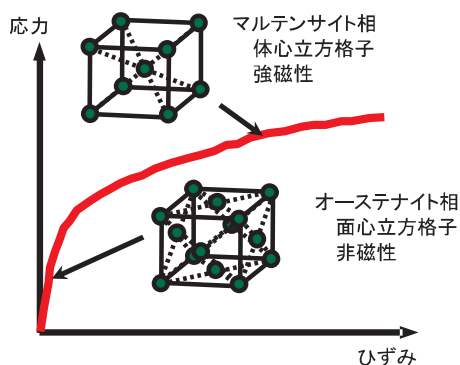


図1 応力-ひずみ関係と結晶構造²⁾

したがって、図2に示すように例えば通常の鋼材が引張力を受けると応力の最も大きい部分から塑性化してくびれが生じ、その場所から破断するのに対し、TRIP 鋼の場合は、応力の最も大きい部分からオーステナイトの一部が硬質で強度の高いマルテンサイトに変態していく。つまり、局部的に弱点となる部分を自ら変態することで増強するので、塑性範囲が次第に広がっていき、結果的に、部材全体として50%以上の大きな均一伸びが得られるのである。

さらに TRIP 鋼には、ひずみを受けるに従い磁性が強くなる性質がある。これはオーステナイトが非

磁性でマルテンサイトが強磁性であることに起因する。そして一旦変態した結晶構造は荷重を取り除いても元の結晶構造には戻らない。

つまり鋼材の塑性の程度は変態したマルテンサイト量すなわち磁性の強さとよい相関を示す²⁾。

以上より、TRIP 鋼には、①高靱性（高延性）の材料で、破断強度も高く、②過去に受けた最大ひずみが磁性の強さとして記憶されるという特徴がある。さらに一部のオーステナイト系ステンレス鋼の TRIP 鋼の場合には、③さびにくいという特徴も付加される。

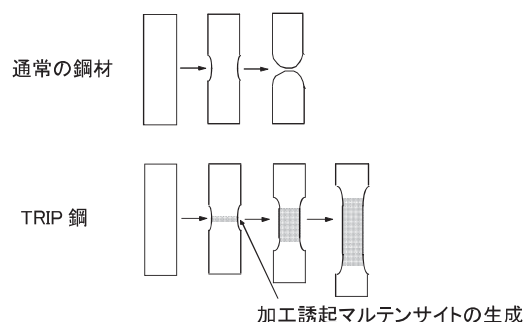


図2 高靱性（高延性）のメカニズム³⁾

2.2 自動車分野への適用

自動車の分野では、「燃費の向上」と「安全性の向上」の両立が社会的なニーズとなっている。自動車部材用鋼板を高強度化することは、鋼板の薄肉化すなわち車体の軽量化につながり、これらの要求を満たすための手段となる。

また一方では、強度特性以外に種々の複雑な形状に対する「造形性（加工性）」も強く要求される。自動車の鋼板は、プレス加工によって最終的な部材形状に成形されるので、一般に強度上昇にともない低下する鋼板の延性が重要となる。

そこで、図3に示すように円盤状の鋼板を円筒カップ状に成形する深絞り成形において、同一強度の従来鋼ではある伸びで壁部に亀裂が入ってしまうのに対し、「自動車鋼板用の TRIP 鋼（低合金 TRIP 鋼：フェライト+ベイナイト+準安定の残留オーステナイト）」では十分な延性（加工性）に優れている。

また、加工後の強度が高く、衝撃エネルギー吸収能力および疲労耐久性にも優れるという特徴をもつことからバンパーをはじめとする衝突安全部品等に適した高強度鋼板であるといえる⁴⁾。

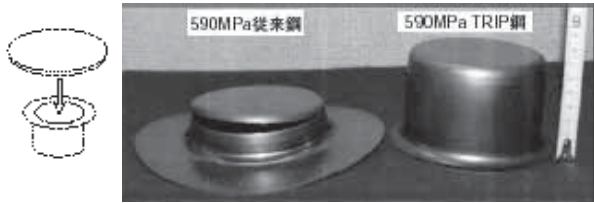


図3 深絞り成形性（プレス加工性）⁴⁾

2.3 センサー分野への適用

過去に受けた最大ひずみが磁性の強さとして残る、という性質を利用して、TRIP 鋼と磁気測定装置を組み合わせることで最大ひずみセンサーとして利用する方法が確立されている。

ここで用いられている TRIP 鋼は、計測を主目的としているため、規格化されたオーステナイト系ステンレス鋼の代表である SUS304 鋼に対し、磁性測定の安定性および信頼性を高めるべく成分調整した特殊なステンレス合金である²⁾。

また、図4は両サイドに切欠きを入れた SUS304 鋼の試料を引張った時の磁性の強さをガリウム・ヒ素の薄膜を使った半導体素子による磁気センサーを用いて測定し、ビジュアル表現したものである⁵⁾。

このように、磁気像を可視化する技術も研究されており、今後、疲労や劣化も含めた非破壊診断システムの実用化が期待される。

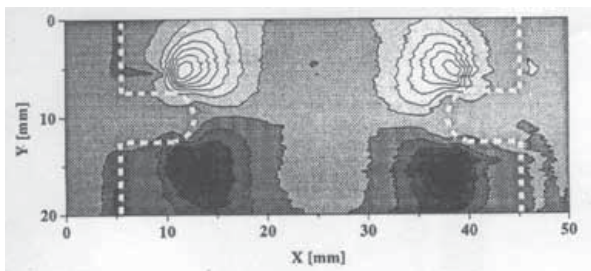


図4 SUS304 鋼の応力による磁気像⁵⁾

2.4 建築構造部材への適用

自動車分野やセンサー分野で用いる TRIP 鋼は、ステンレス鋼（SUS304 鋼）に近い機械的特性を示すものと考えられる。したがって、「ステンレス建築構造設計施工基準・同解説⁶⁾」に準拠すれば、規模に制限が設けられているものの技術的にはある程度は設計可能である。

今後は、普通鋼よりも高強度・高靱性であるという特徴を大いに生かして、靱性能を期待する部位への積極的な適用を可能にしていくことや大規模建築にまで対象枠を拡大していくことへの対応が望まれる。

図5～9に適用例を示す。図5は、RC 部材の端部鉄筋に TRIP 鋼を用いたもので、部材端部の曲げ強度が上昇し、塑性領域の広がり期待される。図6は、強度上昇と靱性能向上を考慮してアンカーボ

ルト径を小さくすることが可能となる。図7は、ダンパー鋼板へ利用したもので、TRIP 鋼の場合はモーメント勾配に合わせた束部分の形状となるような配慮が不要となる。図8は強度上昇と靱性能向上を考慮してスプライスプレートの厚さやボルト孔部の縁空きを小さくすることでプレートサイズを小さくできる。また、高靱性なので HTB 接合部を梁端部に配置することも考えられる。図9は梁端部の鋼材として適用したものである。母材の強度上昇により相対的に弱点とならないよう溶着金属の強度を上昇することで梁端部の靱性能を十分に期待することが可能となる。

また、自動車用鋼板のようにプレス加工後の材料強度を重視する薄板構造や折板構造、冷間成形形鋼管等にも適した鋼材であるといえる。

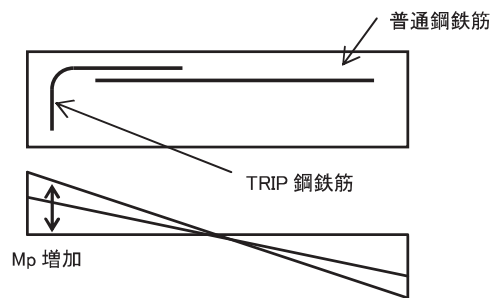


図5 RC 部材の端部鉄筋への適用

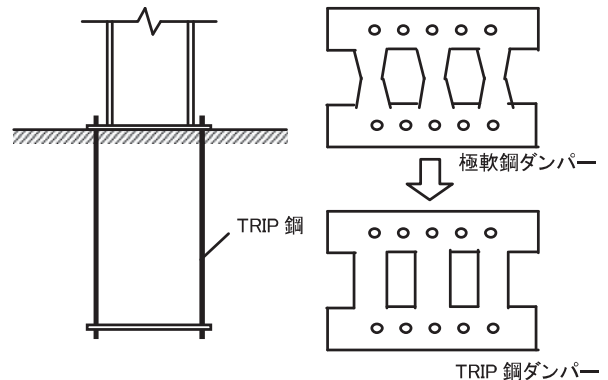


図6 アンカーボルト利用 図7 ダンパー鋼板利用

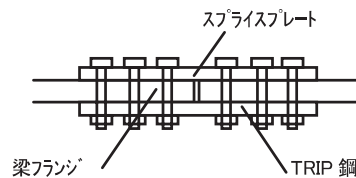


図8 HTB 接合のスプライスプレートへの適用

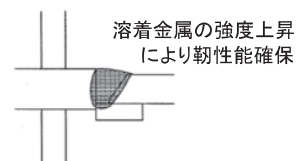


図9 梁端部の鋼材への適用

2.5 リユース市場への展開

資源循環社会へのニーズが高まる中で、建築構造部材をユニット化し、再利用をはかるリユース市場の確立が模索されている。そしてこの市場ではリユース部材の損傷評価が重要な項目となる。

現在の評価方法としては、目視検査の他、放射線や超音波等を用いた非破壊検査が主であるが、材料に実際にクラック等が発生した後でないとは異常を検出できない。しかし、クラック発生以前の劣化損傷により変化する磁場を測定し、かつこれを定量化することで材料の劣化損傷の程度が評価できる。

したがって、TRIP 鋼を用いたリユース部材であれば、磁気測定結果および損傷の程度を IC タグに記録していくことで、履歴付きのリユース部材が比較的容易に作る事が可能である。

2.6 自己診断システムに向けて

TRIP 鋼を用いた柱、梁、床、壁といった構造体の疲労度や損傷度を検知するシステムができれば、たとえ人がいけない場所であっても、超音波探傷検査のように長い時間をかけずに、迅速かつ精度の高い検査が可能となる。これにより、大事故になる前に検知した状況に応じた補強措置や適切な安全対策を施すことができる。

土木分野では RC 梁に TRIP 鋼の主筋を用いた自己診断型インテリジェント構造が提案されている²⁾。

2.7 TRIP 鋼に関するまとめ

図 10 に TRIP 鋼の特徴を活かした適用別分類を示す。

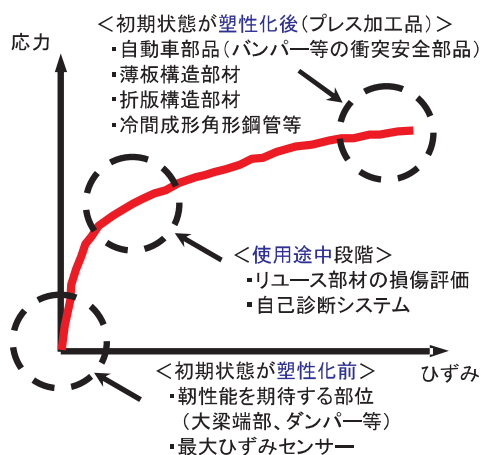


図 10 TRIP 鋼の適用別分類

ユニット化されたリユース部材としての TRIP 鋼材を普通鋼よりも優れた防錆効果や高靱性能を必要とする部位に採用し、磁性測定による劣化損傷自己診断機能を発展させたモニタリングシステムと組み

合わせることで資源循環型でかつ安全性の高い建築物の実現が期待される。

なお、TRIP 鋼の磁気特性について、細径の鋼棒に一樣引張応力が作用する状態でのセンサー利用が主であったため、圧縮応力が作用した場合のデータが不足している。そのため、一方向および交番繰り返し載荷時の素材実験により、磁気特性を把握することや SUS304 との材料特性の比較を行うことは、実用化に向けて重要な研究課題である。

3. 繊維強化金属

3.1 繊維強化金属とは

高い強度と剛性、導電性、電気絶縁性、耐摩耗性、耐熱性、耐浸食性、放射線吸収性等々といった様々な性質をもつ材料を複合化することで単独材料では得られないような特性を持った新材料をつくる事が可能である。

特にプラスチックの特性は繊維との複合化によりその効果が発揮され、FRP（繊維強化プラスチック：Fiber Reinforced Plastics）として航空宇宙分野や医療分野、スポーツ・レジャー分野へと既に身の回りに幅広く利用されている状況である。

一方、金属についても繊維との複合化が実用化されており、FRM（繊維強化金属：Fiber Reinforced Metals）と呼ばれている。特に繊維を包み込むマトリクス（基盤）の材料を金属とした場合には、FRP に比べ高温下での特性に優れる点の特徴であり、軽量化と高い強度の確保が重要な条件となる航空宇宙分野等で利用されている⁷⁾。

3.2 繊維強化金属の適用

3.2.1 アルミナ繊維

高電波透過性、高電気絶縁性、耐摩耗性、耐熱性に優れた繊維で、レーダー保護用ドームや高圧送電線、砥石等に利用されている。また、マグネシウムをマトリクスとした FRM は、耐熱性を活かして自動車エンジン用プッシュロッドとして製品化されている。1000 度以上の耐高温クリープ性は構造材の強化繊維として有効である⁸⁾。

3.2.2 ボロン繊維

高強度、低熱膨張率、高硬度、耐疲労性、振動減衰性、中性子吸収能力等に優れた繊維である。特に圧縮強度が引張強度の 2 倍もある繊維材料は他に類を見ない。

航空宇宙分野では主に製品化された FRP シートが利用されている。またアルミニウムをマトリクスとした FRM 複合管材はスペースシャトルの主要構造部品として標準使用されている。基本的に非常に高い

剛性と一定の熱膨張率が要求されるような過酷な条件に適した繊維材料であるといえる。

スポーツ・レジャー分野では、優れた振動減衰性と高い圧縮強度からゴルフシャフトや釣竿、スキー板等に炭素繊維と組み合わせて用いられている。正の熱膨張率をもつボロン繊維と負の熱膨張率をもつ炭素繊維のハイブリッド使用で熱膨張率をゼロにすることも可能である。その他、高い硬度を必要とする工業製品や中性子吸収能力を活かした核燃料廃棄物の貯蔵施設等への適用が期待される。

図 11 にアルミニウムをマトリクスとした FRM の拡散接合による成形方法を示す。拡散接合とは、2 つ以上の金属板に一定の加圧・加熱を加える事により、接触部分で原子や分子がお互いに行き来して二つの物体が一体化する熱圧着接合法である。ここでは、ボロン繊維を特殊なアクリル樹脂によって仮接着したプリフォームシートが利用されている。なお、アクリル樹脂は予備加熱の段階で完全に蒸発する⁸⁾。

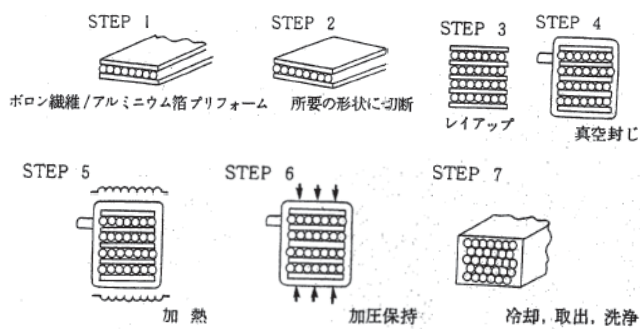


図 11 ボロン／アルミニウムの拡散接合⁸⁾

3.2.3 炭素繊維

高強度（鉄の 5～10 倍）、高弾性率（鉄の 2～3 倍）、低比重（鉄の 1/4.6 倍）、耐疲労性、導電性、低熱膨張率（寸法安定性）、耐熱性、電磁波遮蔽特性、化学安定性（耐腐食性）等に優れた繊維で、繊維補強材として「軽くて、強く、腐食しない」といった優れた機械的性質をもつ材料である。

航空宇宙分野では、人工衛星のソーラーパネルやアンテナ、ロケットノズル等、スポーツ・レジャー分野では、ゴルフシャフトや釣竿、ヨットのマスト等、土木・建築分野では、トラス部材や柱・梁・床の補強等に幅広く利用されている。

しかしこれらは、FRP としての利用がほとんどで、金属材料との複合化においてもエポキシ樹脂を含浸させた炭素繊維ストランドまたは炭素繊維シートをエポキシ樹脂系接着剤で貼り付ける方法等が用いられている⁸⁾。

金属をマトリクスとする場合については、アルミニウム系またはマグネシウム系の合金によるプリフォームワイヤを並べてホットプレスする方法が主で

あるが、様々な種類の存在する炭素繊維全般にわたっての有効性は確かめられていない⁷⁾。

したがって、鋼材との主な複合化としては、引張力のみを受ける部位に製品化された FRP の炭素繊維シートを取り付ける方法が考えられる。図 12 は曲げ応力を受ける小梁や間柱の中央下端（引張側）フランジ面に炭素繊維シートを配置した例である⁹⁾。図 13 は格子梁の接合部を「ピン接合ディテール＋炭素繊維シート」としたものである。図 14 は軸力がメタルタッチにて、せん断力がシアキー等にて伝達できるピン接合形式の柱（梁）接合部の鋼材表面に炭素繊維シートを配置することで曲げ応力も伝達できる剛接合形式としたものである。

これら FRP の炭素繊維シートの代わりにアルミニウム合金等による FRM の炭素繊維プレートを着着剤で貼り付けたり、スプライスプレートとして高力摩擦ボルト接合することも考えられる。

その他、張弦梁のテンション材としての利用も考えられる。

炭素繊維シート等を鋼材に貼る場合には、接着剤が比較的低い温度から耐力低下を起こすため、長期鉛直荷重を受ける部材に関しては、耐火性能について十分な注意が必要である。

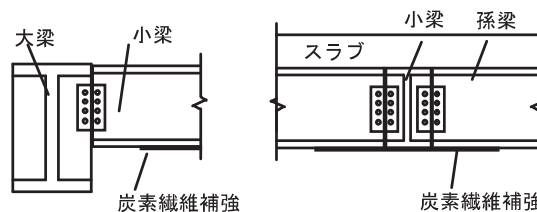


図 12 小梁（間柱）への適用

図 13 格子梁への適用

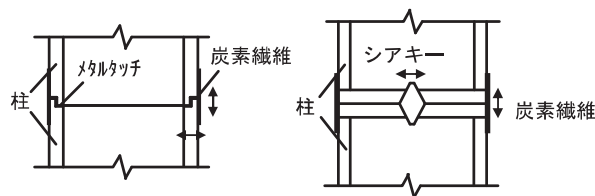


図 14 柱（梁）への適用

3.2.4 SiC 繊維

高強度、高弾性率、耐熱性、耐熱衝撃性、耐酸化性、電波吸収性に優れた繊維である。航空宇宙分野では、FRP として航空機の機体構造体に実用化されている。また、SiC 繊維をホットプレスして製造される超耐熱・高靱性セラミックスを用いた部材の開発が行われている⁸⁾。

3.2.5 アラミド繊維

高強度、高弾性率、耐熱性、耐摩耗性、振動減衰性に優れた繊維で、コードやホース等の繊維強化ゴ

ムの用途に多く使用されているが、それ以上に利用されているのがFRP用途である。非導電性、非磁性の性質を活かして鉄道関係や高速道路の橋脚耐震補強等に適用されている。また、図15に示すように鉄筋の替わりとしてパラ系アラミド繊維を組紐状に編み、エポキシ樹脂で固めた棒材（AFRP ロッド）が製品化されており、超高層住宅の電波障害対策として外装プレキャスト板の補強筋に使用された実績がある⁸⁾。

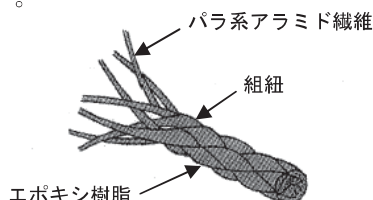


図15 AFRP ロッド (フィブラロッド)⁸⁾

3.2.6 PBO 繊維

高強度、高弾性、クリープ特性、耐熱性、難燃性、耐衝撃特性、振動減衰性に優れた繊維である。図16にPBO 繊維（ザイロン）と炭素繊維、アラミド繊維の振動減衰挙動を示す。PBO 繊維は炭素繊維と同等の高い弾性率でありながら減衰性が良い。

膜材利用以外ではテニスラケットやヘルメット等にもFRPとして利用されているが、その優れた特性をさらに活かすよう応用開発が進められている⁸⁾。

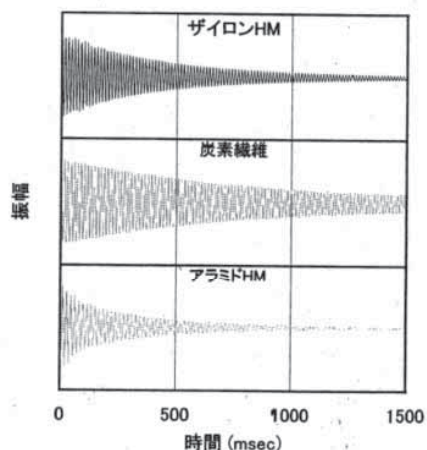


図16 一方向強化複合材料の減衰挙動⁸⁾

3.3 繊維強化金属のまとめ

繊維強化金属として、FRPと鋼材の複合化については接着剤の性能、特に耐熱性が課題であり、長期鉛直荷重を受ける部位への適用には十分な注意を要する。また、マトリクス金属としてはアルミニウムやマグネシウム等が適しており、鋼材をマトリクスとしたFRMは製造が困難である。

しかし、繊維は単に強度面の強化だけでなく、そ

の種類によって低熱膨張率や電波吸収性、耐熱性、振動減衰性といった様々な特性を合わせもっており、要求性能に応じて適切な繊維を選択することによる効果は多岐にわたる。

また、繊維シートに代表されるように非常に薄い層状であるため、母材を含めて複数のシートを積層させることによる複合化が可能である。

1種類の繊維に限らず複数の繊維からなる複合材の組み合わせは数限りなく存在し、今後の可能性に期待したい。

4. まとめ

TRIP 鋼および繊維強化金属の特徴と利用方法の紹介およびその将来性について示した。

両者とも建築分野に限らず様々な分野での活用の可能性をもった高性能材料であることから、1つの分野に規制されずに、その特徴を有効に活かした利用方法を今後も提案していきたいと考えている。

[謝辞]

TRIP 鋼の情報提供および実験に向けての試験体製作等に対しJFE テクノリサーチ(株)の大坪宏氏、TRIP 鋼の計測センサー製作等に対し(株)光電製作所の流郷繁氏には多大なるご協力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

[参考文献]

- 1) 藤田利夫他訳：「鉄鋼材料の設計と理論」、pp. 177-179、丸善株式会社
- 2) 足立幸郎他：「自己診断機能を有する構造材料を用いたインテリジェント耐震構造に関する研究」、土木学会第55回年次学術講演会、pp. 506-507、2000.9
- 3) 生きる建築へのアプローチ (その2) 鋼構造への適用と技術的検証、21世紀鋼構造フォーラム シンポジウム「21世紀、鋼構造技術は何ができるか」、独立行政法人建築研究所、pp. 11-12、2002.11
- 4) 高橋 学：「自動車用高強度鋼板の開発」、新日鉄技報 第378号、pp. 2-6、2003
- 5) 日刊工業新聞、1999.9.22、豊橋科学技術大学 太田研究室
- 6) 「ステンレス建築構造設計施工基準・同解説」、ステンレス構造建築協会、1995.7
- 7) 香川 豊著：「繊維強化複合金属の基礎」、シーエムシー出版
- 8) 「繊維強化材と複合材料への応用特集」、強化プラスチック Vol. 47 No. 8、2003.8
- 9) 服部明生他：「連続繊維プレートによる鋼構造建物の長寿命化に関する基礎的研究 (その1-3)」、日本建築学会中国支部研究報告集 第27巻、pp. 217-228、2004.3

ユニットセル構造システムの提案

21世紀鋼構造フォーラムWG1

リユース
積層構造

ユニット化
着脱容易な接合

ボックスフレーム
多段免震構造

1. はじめに

現在、資源循環型社会を目指す途上において、建設行為が果たす役割が益々重要となってきている。特に従来のようなスクラップ&ビルトから脱却する、新しい性能と技術を持った建設システムが要求されてきている。

実際、博覧会のイベント施設の仮設建築物に、解体・リユース・移築を前提とする接合部をもった構造物や、仮設建築物以外でも、ある低層ホテルでは、建物全体の移築、部分保管可能なシステムを採用している事例も見られるようになり、社会的ニーズだけでなくビジネスニーズも十分高まってきている。

本論文では、そのニーズに答え、従来技術を使い実現性を高めながらかつ、斬新な鉄骨架構体とその接合及び新材料を取り込んだ、「ユニットセル構造システム」の提案、またこのシステムならではの応用となる「多段免震構造」のスタディーを試みたので報告する。

2. 提案

2.1 要求されるシステム

さて、全章で述べた要求される、新しい性能・技術を持った建設システムとは何か。以下の項目を満たすものが考えられる。

- ・プラン可変性
- ・リユース性
- ・施工・解体・運搬・保管の容易性
- ・耐震性
- ・経済性

上記の要求される性能に対応するためには、現在の建物の構築方法を見直す必要がある。すなわち、構築の全体性、現場施工性、建物の1回性、地震リスクの担保方法、非履歴性である。解決するには、以下の方法が考えられる。

- ・建物の構成単位のブロック化
- ・単位部材の構成によるユニット化
- ・接合部の着脱容易化
- ・軽量化
- ・主架構保護、地震応答低減容易化
- ・材料履歴保証化

満足する回答としては、様々に考えられるが、現在の技術及び最近の新技术を組み合わせる1つの回答として次に示す。

2.2 提案システム概要

提案するユニットセル構造システムを図1、2に示す。このシステムの特徴を以下に示す。

- ①BOX型の積層構造物
- ②3.3m角のモジュールを採用
- ③材中央で接合部をもつエレメントで構成
- ④エレメントの主要接合方法はシアーキー
- ⑤部材は、角型鋼管（150角～200角）
- ⑥極稀地震で弾性設計
- ⑦ユニット間にデバイス装置挿入可能

(1) 積層構造

建物の全体を部分の集積と捉え、構成している部分をユニット化とすることが、リユースを可能とする早道である。但し、ユニットとする場合、可変性に対応するユニット単位が重要となる。本提案では、ユニットの構成は2段階とし、1つは、BOX型フレームを1ユニットとし、1ユニットはさらに基本的に8つのエレメントで構成する。エレメントは既に製作されている。建物はユニットを平面に隣接、あるいは積層して構築する。本提案では、5階程度の建物を想定している。

(2) モジュール

1ユニットは、3.3mの立方体とした。通常の住宅、事務所の建物階高は3m～3.5m程度であること、1ユニット10m²程度すなわち3坪（6畳）であり、身近な空間単位であること、3X3ユニットが10mX10mの大きさになることから、このモジュールを採用した。

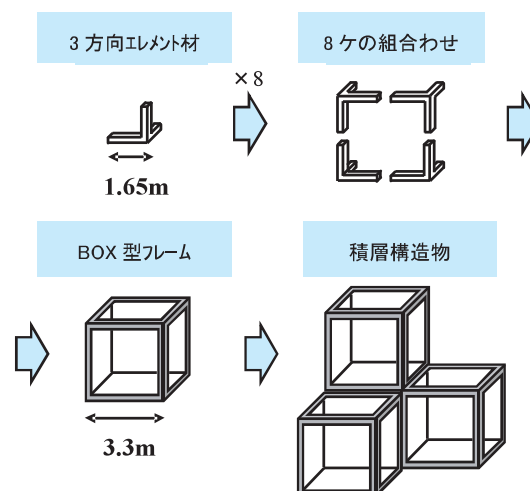


図1：ユニットセル構造システム

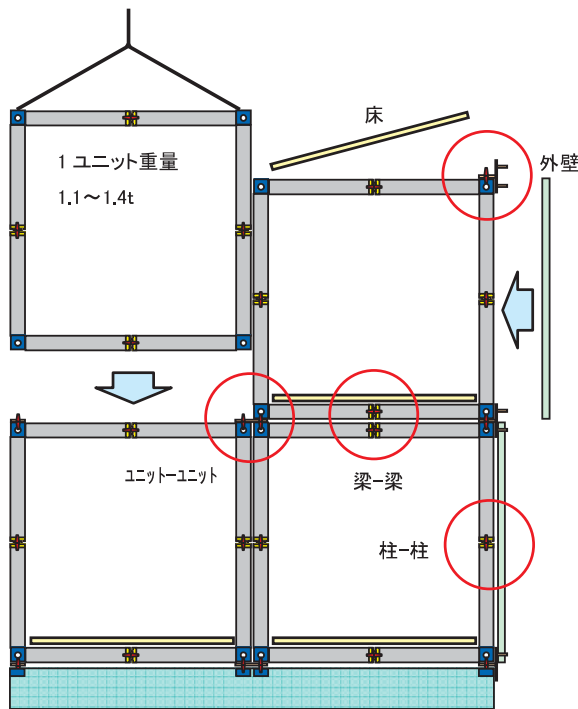


図2：ユニット積層図

(3) 3方向エレメント材

BOX型ユニットを構成するエレメントをどのように分割すれば最良になるか。応力条件、簡易な接合、コストを満足する必要がある。1つの方法として、直線材とその接合部に分けることが考えられる。しかし、最大の問題は、部材の集まる接合部を剛にするため着脱可能な簡易な接合の実現が難しい。本提案は、部材の中央にエレメントの接合を設け、3方向に向けた角型鋼管部材を接合した単位を1エレメント「3方向エレメント材」としたことを特徴とする。このエレメントは、どの方向でも柱梁に使用でき、また、地震時曲げ応力が中央部で0となることから、エレメント接合がピン接合となる利点がある。

(4) 接合方法と建物構成

接合方法を各部位毎に述べる。

①柱-柱

柱と柱は図3にあるように、テーパ付きシアーキーとリング状鋼板を用いる。シアーキーは取り外しができ、せん断力のみ伝達する。リング鋼板により接合部のスムーズな回転ができる。上下方向の離間にも対応できる。

②梁-梁

梁と梁は、基本的に柱間と同じ機構としている。但し、エレメントの離間に対応するため、「炭素繊維補強バンド」により端部の孔明どうしを締め付ける、あるいは、端部の溝をシアーとして、鋼板をあてがい、炭素繊維で巻きつける方法を考えている。

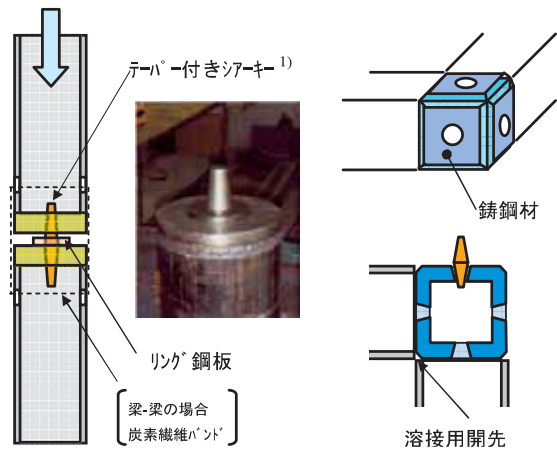


図3：柱-柱接合部

図4：鋳鋼造接合パネル

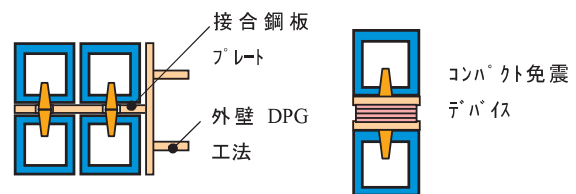


図5：ユニット間接合部

図6：免震デバイス

③柱梁-接合パネル

接合パネルは、図4に示す、立方体の鋳鋼材とする。鋳鋼体は、内部を空洞とし、3面にシアーキーが差し込める円径孔、3面に角型鋼管部材溶接用の開先形状を造る。角型鋼管部材はあらかじめ鋳鋼体と工場溶接で一体化する。

④ユニット間

ユニット間は、図5に示す、上下方向をシアーキー、隣接方向は鋼板プレートを挟んで結合する。ユニット隣接パターンによって3種類のプレートで結合できる。また、防振ゴムを挟むことも可能である。

⑤床・外壁

床材は、既存のALCもしくは、サンドイッチパネルを四隅を切り欠いたもので対応可能とする。

外壁材は、図5に示すように、ユニット間鋼板プレートを外壁側にT型となるような鋼板プレートにDPG方式で支持する方式とする。

⑥免震デバイス

本提案は、ユニット間に免震デバイスを挟むことができるシステムであり、後述する「多段免震構造」による地震応答低減が可能となる。本システムが積層になっていることを利用し、従来構造にはない免震システムに拡張ができる。免震デバイスは、図6に示すような上下フランジにシアーキーがついたもので良い。多段免震構造の場合、各層の変形は小さいため、従来のような径の大きなものは必要なく、10cm程度のコンパクトな装置で十分であることが分かっており、部材内に上手く納まる。

(5) 部材断面

部材の大きさは、架構解析及び地震応答解析から、免震デバイスがない場合、□-200 X 200 X 6 程度である。また、免震デバイスがある場合は□-150 X 150 X 6 程度としている。一般角型鋼管を使用することで、市場性、低コストを考えた。

(6) 設計法

耐震性は、極稀地震において弾性に留まるような部材とした。損傷履歴を残さないリユース材としての利用が前提だからである。なお、後述するように、最近の新材料として注目を集める「トリップ鋼材」は、損傷履歴計測が可能であり、部材の取替えができることから、弾性設計によらない方法も可能である。従って部材の縮小化、軽量化が図れる。

2. 3 システムの運用

本システムは下記の想定範囲の適用において、容易な施工と解体、低コストを実現できる。

(1) 適用範囲

本システムは、用途として住宅、事務所、ホテル、コンビニエンスストア、ファミリーレストラン、イベントでの仮設小屋、海の家等の季節小屋、災害時の避難施設等を想定、階数は、5階以下の低層建物を想定している。急施工、解体、移築頻度が比較的多い建築物を狙いとしている。但し、BOXフレームをスケルトンインフィルの人工地盤上構造物として、適用することも十分可能である。

(2) 施工方法

リユース製品となる、3方向エレメント材、シアーキーを用いて、BOX型フレームを現場で組み立てる。なお、1単位当りの重量については、鋼管断面により、3方向エレメント材は175kg~140kg/個、BOX型フレームは、1,400kg~1,100kg/ユニットである。エレメント材は小型フォークリフト程度の運搬で、ユニット材の吊り上げは小型クレーン車で十分可能である。

(3) 建設コスト

上記鉄骨重量より、面積当たり鉄骨量は130kg/m²~100kg/m²となり、床材と合わせて1ユニット当たりく体工事コストは10万/坪程度と想定される。但し、リユースによる転用回数を5回と見込むと、2万/坪程度のく体工事コストとなり、十分安い価格で提供できる。

(4) 解体・保管・移築

接合部がシアーキー接合のため、解体は容易である。また、1エレメントまで分解すれば、トラックによる運搬も容易である。防錆は溶融亜鉛メッキあるいは塗装を施し、保管はエレメントを重ね



最小ブロックで運搬・保管

あわせることができるため、場所をとらない。ビジネスに合わせて、移築も容易である。

2. 4 システムの応用

(1) 階高変更

柱-柱間はシアーキーでのみ接合しているため、この部分のかさ上げにより、階高を大きくすることも可能である。用途変更や、テナント誘致のために天井高を大きくする必要があるときに有効である。

(2) 二重床の活用

ユニット上下間のスペースを、設備配管スペースとして活用したり、住宅の収納スペースにも活用でき、マンション、ホテルに有効である。

(2) 損傷履歴

リユース材にとって損傷の履歴（特に地震時）が何らかの方法で記録され、後で読み取れば、さらに確実な材料管理ができる。例えば、本システムの柱-柱間のシアーキーを、「トリップ鋼材」に置き換えると、地震時に加わる変形によって磁力場が形成され、柱周辺の磁力を計測することで、入力地震情報が得られ、部材の損傷度合いを推測することも可能である。

(3) 多段免震構造

本システムの拡張として、ユニット間に免震デバイスをはさみ、多段免震構造が可能となる。従来の基礎免震と異なる最大の利点は、1階床レベルで免震の逃げ寸法（約30~50cm）を大きく必要とせず、5cm以下程度で済む点である。各階でエネルギー吸収し、ユニットは損傷を受けないようにできる。多段免震による応答低減効果のイメージは、3章で詳しく述べる。



多段免震構造

(4) 人工地盤免震上の構造物として

地震応答を低減できる人工地盤によって、街区全体の安全を確保する地域防災型都市システムが提案されている。本提案システムも、人工地盤面上に構築することで、免震デバイスを組み込むことなく、耐震安全性の向上、軽量化が可能となる。

2. 5 予測される効果

- ①簡易建物のユニット化によって、資源の有効活用、CO₂の排出低減が図れる。
- ②経済変化に合わせ、建物の増床、縮小、移築ができるため、効果的なビジネスを展開できる可能性があり、経済活性化の誘引となりうる。
- ③リユースシステムの新たな市場が形成できると共に、建設コストの低減で、新たな需要が掘り起こせる。
- ④自由なアレンジによるプラン変更ができる個人住宅に応用でき、造る人=使う人の「住宅の原点」

に戻れる。

3. 多段免震構造による応答低減効果

3.1 多段免震構造

ユニットセルフフレームを積層する際に、各ユニット間に水平方向に柔軟な免震装置を挿入することで、多段免震構造とすることができる。多段免震構造は、高層建築物を対象とする免震構造形式の一種として近年提案されたもの²⁾であり、免震層や免震装置に通常の免震構造ほどは大きな許容変形を必要とせず、通常の免震構造と同等の免震効果が得られるという利点がある。ところが、通常の施工形式をとる架構システムでは、建物内に複数の免震層を設置する多段免震構造は、施工に要する手数の問題から、実際に採用された事例は存在しない。一方、本研究で提案するような積層型の施工方法をとる架構システムでは、各層のユニットを設置する際に免震装置を挿入すればよいので、施工上の手数はほとんど増えない。

本章では、各ユニット間をシアキーを介した剛せん断接続とした場合と、免震装置を介して柔せん断接続した場合とを比較して、ユニットセルフフレーム架構に多段免震構造を導入することの有効性を示す³⁾。

3.2 解析モデル

ここでは3層ユニットセルフフレーム架構について、多段免震構造を導入したモデル（多段免震モデル）、基礎免震構造を導入したモデル（基礎免震モデル）、免震構造を導入しないモデル（非免震モデル）のそれぞれについての地震応答解析結果を比較する。

構造物モデルは、各層の質量を床面レベルと天井面レベルに2分して集中させ、その間をユニットセルフフレーム剛性および免震装置剛性を表現した弾性バネ要素で接続したせん断質点系を用い、解析モデルの諸元は次のとおりとした。各層のユニットセルフフレームの層剛性 k_j は278kN/cm、質量 m_j は30tonとした。これは、各層が6個のユニットセルフフレームで構成されている場合に相当している。ユニットセルフフレーム自身の構造減衰は、免震構造を導入しないときに1次の減衰定数が2%となるように、各ユニットセルフフレームの減衰係数を決定した。多段免震モデルおよび基礎免震モデルにおける免震装置は高減衰積層ゴムを想定して、水平変形に対する層剛性 k_j と減衰係数 c_j の比率は $c_j/k_j = 0.09\text{sec}$ とした。多段免震モデルでの免震装置層剛性 k_j は、以下の4ケースを設定した：470kN/cm (Case1)、235kN/cm (Case2)、118kN/cm (Case3)、58.8kN/cm (Case4)。また、基礎免震モデルでの免震装置層剛性 k_1 は以下の2ケースを設定した：39.4kN/cm (Case5)、19.4kN/cm (Case6)。なお、これにならって非免震モデルはCase0と呼ぶこととする。

地震入力には、El Centro 1940 NS、Taft 1953 EW、

JMA Kobe 1995 NS の各記録地震波および、Newmark and Hall の Design Spectrum⁴⁾に適合するように作成した模擬地震波の合計4種を、地動最大速度が25cm/secとなるように振幅を調整して用いた。この地震入力に対する最大応答評価は、時刻歴応答解析により実行し、解析アルゴリズムにはNewmark β 法を採用した。

3.3 免震層剛性の影響

図1には、模擬地震波とEl Centro波に対する最大層間変位を、図2には同波に対する最大絶対加速度分布を示す。図3には多段免震モデルについて、免震装置の層剛性をパラメタとしたときの最下ユニットセルフフレーム層間変位、最下免震層層間変位、建物頂部水平変位、建物頂部絶対加速度の最大値の変化を示す。なお、図3において横軸の値ゼロでの縦軸の値は、非免震モデルでの値を示している。

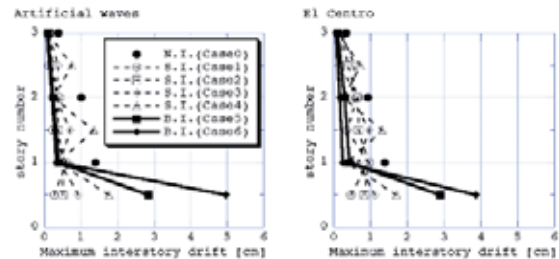


図1 層間変位分布

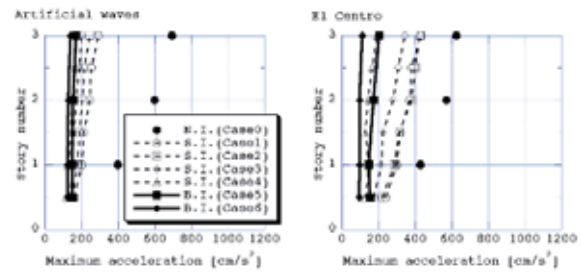


図2 絶対加速度分布

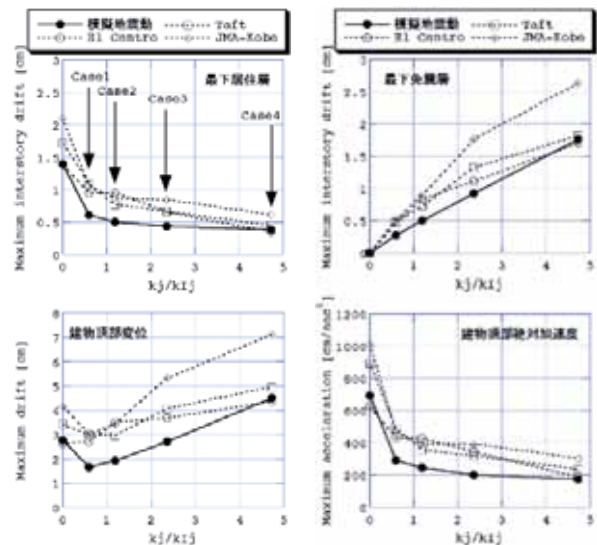


図3 免震層剛性の変化に対する各種応答量の変化

図より以下のことが観察される。

(1)多段免震モデルでは、ユニットセルフフレーム層剛性と免震層層剛性の比 k_j/k_{Lj} が1付近までは、 k_j/k_{Lj} の増加（すなわち免震層剛性の低下）とともに急激にユニットセルフフレームの層間変位は減少するが、 k_j/k_{Lj} が1を越えると、その割合は小さくなる。建物頂部の絶対加速度でも同様の傾向がある。一方、免震層の層間変位は、 k_j/k_{Lj} にほぼ比例して増加する。

(2)多段免震モデルの建物頂部の最大変位は、 k_j/k_{Lj} が0.5付近で最小となる。また、 k_j/k_{Lj} が0から2程度の範囲では、非免震モデルでの頂部最大変位よりも小さな値を示す。しかしながら k_j/k_{Lj} が2を越えるあたりから、 k_j/k_{Lj} の増加の割合にほぼ比例して、多段免震モデルの頂部最大変位は非免震構造のそれに比べて増加するようになる。

(3)ユニットセルフフレームの層間変位分布がほぼ同等な、基礎免震モデル（Case5 および Case6）と多段免震モデル（Case4）の免震層最大層間変位を比較すると、同じ地震動に対しては後者は前者の2分の1～数分の1程度に収まっている。

なお、ここで数値例を示した以外の諸元を持つモデルについても、上記と同様の観察が得られた。

3. 4 免震層減衰の影響

図4に、多段免震モデルのCase2とCase3について、免震装置の減衰係数を変化させたときの、最下ユニットセルフフレームおよび最下免震装置に生じる最大層間変位の変化を示す。なお、横軸は、免震装置の減衰係数 c_{Lj} と剛性 k_j の比 c_{Lj}/k_j であり、X.3.節で示した解析例はこの値が0.09の場合のものである。

図より以下のことが観察される。

(1) c_{Lj}/k_j を大きくすると、ユニットセルフフレームの層間変位、免震装置の層間変位とも小さくなる傾向がある。ただし、ユニットセルフフレームの層間変位は、 $c_{Lj}/k_j=0.06$ （固有周期2.0sec時の等価減衰定数で10%に相当）あたりから停留、あるいは増加に転じる。一方、免震装置の層間変位は、 $c_{Lj}/k_j=0.12$ （固有周期2.0sec時の等価減衰定数で20%に相当）を越えてもまだ減少している。

(2)免震装置の剛性 k_j がユニットセルフフレームの層剛性 k_j に比べて十分に小さくなく（ k_j/k_{Lj} が1以下）、かつ、免震装置の減衰係数が十分確保されない場合には、多段免震構造の導入による応答低減効果がほとんど得られない、あるいは、逆に応答が増大することもありうる。ただし、高減衰積層ゴムのように十分な減衰性能を有する免震装置を用いた場合には、 k_j/k_{Lj} がかなり小さな領域から、多段免震構造による応答低減効果が発揮される。

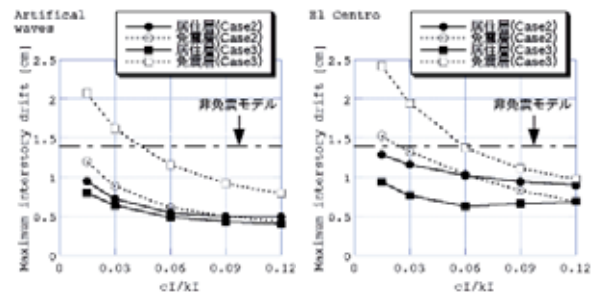


図4 免震層減衰の変化に対する各種応答量の変化

3. 5 多段免震構造による応答低減効果のまとめ

ユニットセルフフレーム架構に、高い減衰性能を有する免震装置を用いた多段免震構造を導入することで、建物頂部での水平変形を増加させることなく、各ユニットセルフフレームに生じる地震時層間変位を半減以下とすることが可能である。したがって、多段免震構造を導入することを前提としてユニットセルフフレームの設計を行えば、導入しないときに比べていっそうの軽量化を実現することができる。

4. まとめ

- ①資源循環型社会に対応する、積層型鉄骨架構となる「ユニットセル構造システム」の提案を行い、その適用範囲、応用方法を提示した。
- ②モジュール構成、各接合方法の検討を行い、特に部材中央のピン接合方法を利用したフレーム構成の方法を提示した。
- ③ユニットセル構造システムの利点を活かす「多段免震構造」の提案と、地震時の挙動を検討し、基礎免震構造と比較しても十分応答低減効果があることを確認した。

参考文献

- 1) 21世紀鋼構造フォーラム研究成果「リユース可能な新しい鋼構造骨組みシステム」, 鋼構造シンポジウム2004 特別セッション1
- 2) Tso-Chien Pan, et al. : Seismic Response of Segmental Buildings, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, 24, pp.1039-1048 (1995)
- 3) 辻, 関 : 各層間に免震装置を有する多段免震構造物の地震挙動, 構造工学論文集, Vol. 51B (2004)
- 4) N. M. Newmark and W. J. Hall : *Earthquake Spectra and Design*, Earthquake Engineering Research Institute, Berkeley, CA (1982)

地震エネルギー集中型人工地盤を用いた地域防災構造システム

21世紀鋼構造フォーラム WG1

人工地盤 地域防災 地震エネルギー
履歴型ダンパー 半剛接合 構造システム

1. はじめに

都市の中心市街地において、道路、駐車場、公園等の公共空地を整備し、その上空に人工地盤を設け、そこに住宅、商業、業務等の用途に供する建築物を建てて立体利用することは、中心市街地の活性化や都市再開発のための有効な手段となる可能性がある¹⁾。また、人工地盤層で大地震時の入力地震動を低減することができれば、人工地盤上に建つ建物の耐震性能を相対的に向上させることになり、地域単位で地震被害を軽減できるため²⁾、住宅密集地域や都市中心部での地震による災害の拡大を防止するための1つの有効な手段になると考えられる。

人工地盤層での入力地震動の低減のためには、免震人工地盤とすることが有効であると考えられるが、本研究では、免震人工地盤よりも安価になると考えられる構造システムとして、半剛接合による鉄骨造フレームと履歴型ダンパーを組み合わせた人工地盤（地震エネルギー集中型人工地盤）を提案し、それが、免震人工地盤に近い応答となるか等の有効性や実現可能性を地震応答解析により検討する。

本報告では、まず、通常の地盤上の建物と人工地盤上の建物への地震入力の大きさ等の地震層せん断力の違いや応答変形等、人工地盤を有する建物の基本的な地震応答特性について、人工地盤を有する試設計建物を対象にした地震応答解析により明らかにする。次に、人工地盤上の建物への入力地震動を低減することを目的とした半剛接合による鉄骨造フレームと履歴型ダンパーを組み合わせた人工地盤（地震エネルギー集中型人工地盤）の提案を行い、一般的なラーメン人工地盤や免震人工地盤との地震応答の比較を行い、その有効性を検討した結果を示す。

2. 試設計の概要

2.1 骨組形状と試設計の目的

図1に、本研究で検討の対象にした人工地盤を有

する試設計建物の床伏図及び軸組図を示す。人工地盤層は駐車場としての用途を持つものとし、車路及び車室に対応した柱配置を設定している。人工地盤上には自由な位置に建物を建設できることが望ましいが、ここでは、人工地盤層の柱芯と上部の建物の柱芯が一致することを条件とする。

表1に示すように、ここでは、検討目的に応じて設計条件が異なる2種類の試設計を行っている。試設計Aは、人工地盤を有する骨組の基本的な地震応答特性を明らかにするための設計であり、この建物を有して、人工地盤を有する骨組の地震層せん断力の検討やラーメン人工地盤とダンパー付人工地盤の地震応答の比較、上部建物の設計ベースシャー

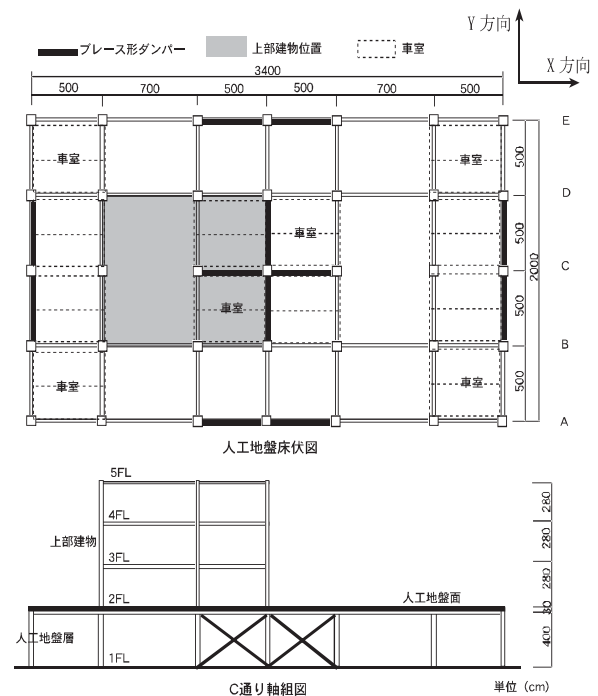


図1 試設計建物の床伏図及び軸組図

表1 試設計の目的と設計条件

設計種別	目的と検討項目	人工地盤		上部建物			
		構造	設計荷重	構造	設計ベースシャー	層数	人工地盤上の棟数
試設計A	人工地盤を有する骨組の一般的な地震応答特性の把握 1) 地盤上と人工地盤上の建物への地震入力の相違 2) ラーメン人工地盤とダンパー付き人工地盤の地震応答比較 3) 上部建物の設計ベースシャーの影響	ラーメン人工地盤、ダンパー付人工地盤の2種類	30kN/m ²	ラーメン骨組	0.20及び0.45	3層	1棟
試設計B	エネルギー集中型人工地盤の有効性の検討 1) ラーメン人工地盤、エネルギー集中型人工地盤、免震人工地盤の地震応答比較 2) 人工地盤上の重量変化の影響	ラーメン人工地盤、エネルギー集中型人工地盤、免震人工地盤の3種類	5kN/m ²	ブレース骨組	0.30	3層及び2層	1棟及び2棟

の影響等の検討を行う。

試設計 B は、建物への入力地震動の低減を目的としたエネルギー集中型人工地盤の有効性を明らかにするための試設計である。この建物を用いた地震応答解析によって、ラーメン人工地盤、エネルギー集中型人工地盤、免震人工地盤を有する骨組の地震応答を比較する。また、人工地盤上に建設される建物の層数や棟数等の変化による重量変化が応答に及ぼす影響を検討する。

2.2 試設計 A の設計方法

試設計 A では、人工地盤上のどの位置にも 4 層程度の鉄骨造事務所、住宅、店舗等が建設できることを想定して、人工地盤上の積載荷重として 30kN/m^2 を設定し、この荷重の配分として、 15kN/m^2 を床均し荷重とし、残り半分を柱の集中荷重とする。また、人工地盤層のフレーム用荷重、地震用荷重を、それぞれ、 12kN/m^2 、 10kN/m^2 とする。人工地盤面のスラブ厚は、植栽等を考慮してコンクリー厚 300mm とする。人工地盤の構造形式として履歴型ダンパーを用いるものと、純ラーメン構造の 2 種類とする。履歴型ダンパーは、図 1 の床伏図に示す位置に配置する。

人工地盤上の建物として、ラーメン構造の 3 層の共同住宅を設定し、図 1 の床伏図に示す位置に建設されるものとする。この 3 層建物の設計ベースシャー係数 (C_0) を 0.20 と 0.45 の 2 種類で設計する。 $C_0=0.20$ は、通常の地盤上に建つ建物の設計ベースシャー係数である。一方、ここで扱うような人工地盤層の重量比が上部建物に比べて極端に大きい場合には、人工地盤を含む建物全体について、基準法の A_i 分布を計算すると、人工地盤上の建物の地震層せん断力が、通常の地盤上に建設される場合の 2.5 倍程度の値となる(図 2 参照)。そこで、ここでは、 $C_0=0.45$ で設計される建物についても試設計し、比較検討する。

このような設計条件で試設計されたラーメン人工地盤、ダンパー付人工地盤及び $C_0=0.20$ 、 0.45 の上部建物の部材断面とその組み合わせを表 2 に示す。ダンパー付人工地盤のダンパー断面積は、降伏点 235N/mm^2 で設計しているが、ダンパーの降伏点を 100N/mm^2 として、ダンパーを早期に塑性化させる場合についても設定している。骨組名称は、

$C_0=0.20$ 、 0.45 の上部建物(ラーメン骨組)をそれぞれ、R020、R045 で表し、ラーメン人工地盤を R、ダンパー付人工地盤を D100(降伏点 100N/mm^2)、D235(降伏点 235N/mm^2) で表す。例えば、R020-D100 は、 $C_0=0.20$ の上部建物がダンパー降伏点 100N/mm^2 のダンパー付人工地盤上にある場合の骨組名称である。

3. 地震層せん断力係数の検討

3.1 A_i 分布及び SRSS による分布

図 2 は、試設計 A で設計した骨組について、基準法 A_i で計算される層せん断力係数分布 (α_i/α_1) を比較したものである。 α_i は i 層の層せん断力係数である。図中の 3) は、ここで設計した人工地盤層の重量を上部建物と同程度にした場合である。表 3 に、この A_i 分布の計算に用いた各層の重量比 (m_i/M) 及び階高を示す。ここで、 m_i は i 層の重量、 M は骨組全重量である。なお、試設計 A の骨組の解析では、人工地盤上には最大の積載荷重 30kN/m^2 の重量が掲載されているものとしている。この計算結果から、ここで対象としたような人工地盤を有する骨組では、骨組全質量 (M) に対する第 1 層の質量 (m_1) の比が大きいため、図 2 の 1) の上部建物(2-4 層)の層せん断力係数は、2) や 3) の結果に比べて 2.5 倍程度になっている。

これらの骨組の地震時の層せん断力係数分布がどの程度であるか確かめるため、ラーメン人工地盤骨組 R045-R とダンパー付人工地盤骨組 R045-D100 を対象にして、3 地震波 (EL Centro NS、Hachinohe EW、JMA Kobe NS) を用いて、入力速度 10cm/sec として、質点系モデルの地震応答解析を行う。各層の復元力特性は、図 1 の X 方向の骨組の静的漸増載荷から得られる荷重-変形関係に基づいてバイリニア型とした。これらの解析では R045-R と R045-D100 骨組ともに、弾性挙動であった。得られた結果を図 3(a)、(b) に示す。ラーメン人工地盤の方が、ダンパー付人工地盤よりも 2 層以上のせん断力係数がやや大きいのがわかる。これは、ラーメン人工地盤の方が、ダンパー付き人工地盤に比べて、人工地盤層の剛性が小さいためと考えられる。

図 4 は、R045-R と D045-D100 骨組について固有

表 2 試設計 A の建物部材断面一覧

骨組名称	R020-R			R020-D100, R020-D235				R045-R			R045-D100, R045-D235				
	梁(SN400)		柱 (BCR295)	梁(SN400)		柱 (BCR295)	ダンパー (LY100, SN400)	梁(SN400)		柱 (BCR295)	梁(SN400)		柱 (BCR295)	ダンパー (LY100, SN400)	
	5mスパン	7mスパン		5mスパン	7mスパン			5mスパン	7mスパン		5mスパン	7mスパン			
上部 建物	4/5	H-350×150 ×6×9	H-350×175× 7×11	□-250×9	H-350×150 ×6×9	H-350×175 ×7×11	□-250×9	—	H-350×150× 6×9	H-350×175× 7×11	□-300×9	H-350×150× 6×9	H-350×175× 7×11	□-300×9	—
	3/4	H-350×150 ×6×9	H-350×175× 7×11	□-250×9	H-350×150 ×6×9	H-350×175 ×7×11	□-250×9	—	H-400×175× 9×12	H-400×200× 8×13	□-300×12	H-400×175× 9×12	H-400×200× 8×13	□-300×12	—
	2/3	H-350×150 ×6×9	H-350×175× 7×11	□-250×9	H-350×150 ×6×9	H-350×175 ×7×11	□-250×9	—	H-400×175× 9×12	H-400×200× 8×13	□-300×12	H-400×175× 9×12	H-400×200× 8×13	□-300×12	—
人工 地盤	1/2	H-500×200 ×10×16	H-488×300× 11×18	□-400×16	H-450×200 ×9×14	H-600×200 ×11×17	□-400×12	断面積47.5cm ²	H-500×200× 10×16	H-488×300× 11×18	□-400×16	H-450×200× 9×14	H-600×200× 11×17	□-400×12	断面積47.5cm ²

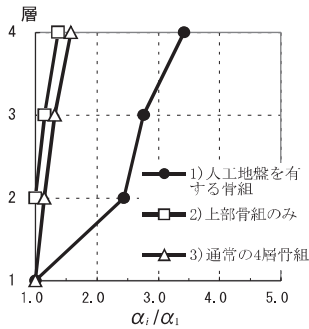


図2 基準法Aiで計算される層せん断力分布

表3 骨組の重量分布

階	階高 (m)	重量分布 (mi/N)		
		1) 人工地盤を有する骨組	2) 上部骨組のみ	3) 通常規模の4層骨組
4	2.8	0.028	0.365	0.272
3	2.8	0.024	0.312	0.232
2	2.8	0.025	0.322	0.240
1	1.0	0.921	0.322	0.256

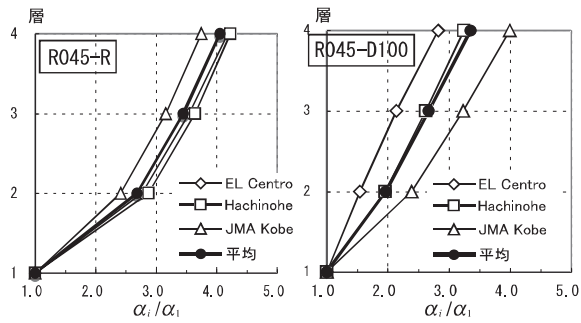


図3(a) 応答解析から得られる層せん断力分布 (R045-R)

図3(b) 応答解析から得られる層せん断力分布 (R045-D100)

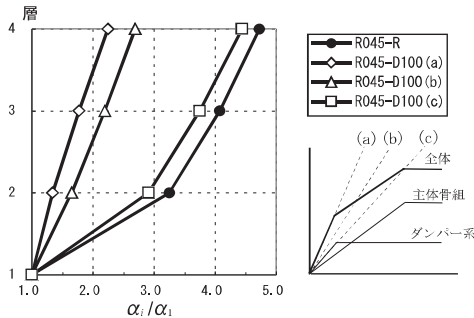


図4 SRSSで計算される層せん断力分布

値解析を行い、SRSS (2乗和平方) によって計算した層せん断力係数分布である。R045-D100 骨組については、ダンパー付き人工地盤層の剛性の評価として、図中に示す (a) ~ (c) の3種類の剛性を設定して固有値計算している。ダンパー付き人工地盤骨組の人工地盤層の剛性を高く評価するほど、2層以上の層せん断力係数が小さくなっている。

図2~4の結果を比較すると、ラーメン人工地盤骨組については、図3(a)の応答解析から得られる層せん断力係数分布は、SRSSで計算される値よりも小さく、基準法Aiの計算よりやや大きくなっている。ダンパー付き人工地盤骨組については、図3(b)の応答解析から得られる分布は、基準法Aiの計算より小さく、初期剛性と降伏耐力点割線剛性の平均の剛性を用いてSRSSで計算した値よりも、や

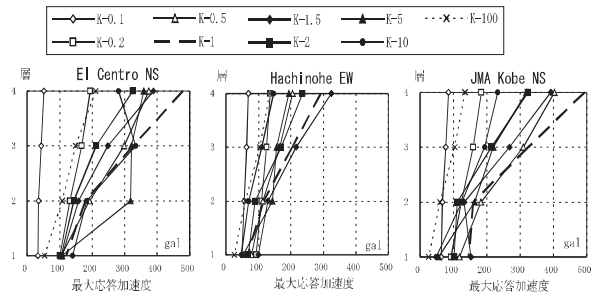


図5 各層の最大応答加速度の比較

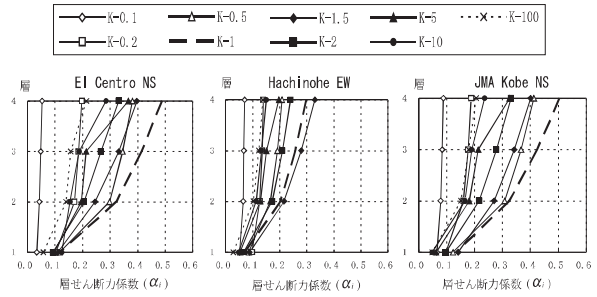


図6 各層の層せん断力係数の比較

や大きい結果となっている。

3.2 人工地盤層の剛性が地震応答に及ぼす影響

前節での検討から、人工地盤上の建物の地震層せん断力の大きさは、人工地盤層の剛性が影響を及ぼす可能性があることが示された。そこで、ここでは、人工地盤層の剛性を変化させた地震応答解析を実施し、骨組各層の最大応答加速度、各層の層せん断力がどのように変化するか明らかにする。

解析対象骨組は、R045-Rで、この骨組の人工地盤層の剛性を0.1倍 (K=0.1) ~ 100倍 (K=100) に変化させ、質点系モデルによる弾性地震応答解析を行う。入力地震動は、5cm/secの入力速度とし、EL Centro NS (51cm/sec²)、Hachinohe EW (25cm/sec²)、JMA Kobe NS (45cm/sec²) の3波とした。

図5に、応答解析の結果得られた各層の最大応答加速度分布を地震波毎に示す。人工地盤層の剛性を0.1倍~100倍まで変化させた9ケースについて比較している。この図から、人工地盤層の剛性を小さくすると、上部建物の応答加速度は小さくなり、K=0.1では、他に比べて応答が小さく、50~80cm/sec²程度となる。剛性を大きくしていった場合にも、応答加速度は小さくなる傾向があるが、K=1.5~K=10までは、大きな差はない。K=100では、人工地盤層の応答加速度は入力地震動の加速度とほぼ等しくなり、人工地盤層が地盤と一体で応答している。

図6に、各層の層せん断力係数 (α_i) を地震波毎に示す。各層の層せん断力係数は、上記の加速度分布と同様の傾向が見られ、人工地盤層の剛性が大きくなっても、小さくなくても、上部建物のせん断力

係数は小さくなる傾向があり、剛性が0.1倍の場合(K=0.1)は、せん断力係数は極端に小さくなる。一方、人工地盤層自体のせん断力係数は、上部建物に比べれば、変化が小さい。

これらの結果から、人工地盤層の剛性を小さくする方が、より効率的に上部建物の層せん断力を低減できるものと考えられる。また、人工地盤層が地盤と一体として挙動する程度に人工地盤層の剛性を大きく（このケースでは100倍）できるならば、上部建物は地盤上に建設されるものとして設計できると考えられる。

4. 人工地盤を有する建物の大地震時の応答

4.1 解析の目的

試設計Aで設計した骨組について、部材レベルの解析モデルを用いた地震応答解析を行い、通常地盤上の建物の地震応答とラーメン人工地盤上での応答、ダンパー付人工地盤上での応答の比較を行う。また、上部建物の設計ベースシヤール係数が応答に及ぼす影響を明らかにする。

4.2 解析方法

地震応答解析は、図1のX方向の骨組を対象とする。図7に例として、ダンパー付人工地盤骨組の解析モデルを示す。ここでは文献3)の非線形解析プログラムを用いて、平面骨組モデルによる擬似立体解析を行う。図1に示すように、X方向骨組は全5構面のうち履歴型ダンパー付構面が3構面、ラーメン構面が2構面である。そこで、履歴型ダンパー付構面のA、C構面、ラーメン構面のB構面を取り出し、C構面の各層重量とヤング係数および鋼材強度を1/2にして擬似立体解析を行う。擬似立体解析では、剛床仮定を用い対応する節点の変位を等値する拘束条件を課している。

応答解析における柱、梁、履歴型ダンパーの復元力特性は歪硬化2%のバイリニア型とする。接合パネル部は弾性とする。減衰は1次減衰定数2%の剛性比例型とする。数値積分はNewmark β 法、時間刻みは1/200秒とする。入力地震動にはEl Centro NS、Hachinohe EW、Taft EW（継続時間20秒）を用いる。入力地震動の大きさは、各解析骨組毎に、建物への損傷に寄与するエネルギー⁴⁾が、文献4)のS_vスペクトルの値になるように最大加速度を調整する⁵⁾。

表4に、本報で対象にした7つの解析骨組の弾性固有周期及びダンパー付人工地盤のダンパー耐力分担率、剛性比及びダンパー適正分担率⁶⁾、分担率上限値を示す。R020-D100及びR045-D100では履歴型ダンパーの耐力分担率はほぼ適正分担率となっているが、D235の履歴型ダンパー付人工地盤では適正値の上限を上回っており、履歴減衰効果がD100ほど期待できないと予想される。

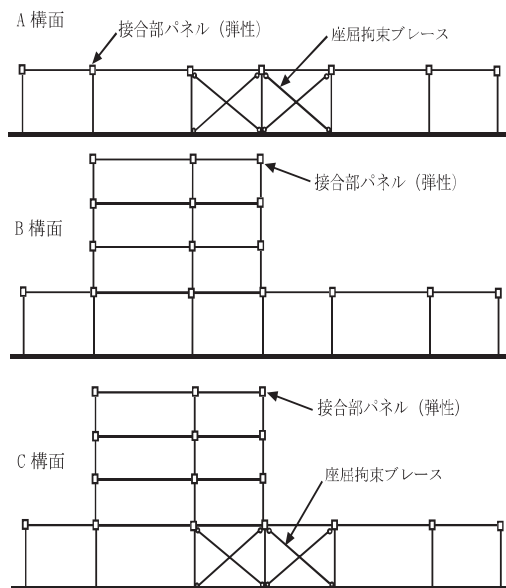


図7 ダンパー付人工地盤骨組の解析モデル

表4 解析骨組の周期等

モデル名称	上部骨組のみ		ラーメン人工地盤	ダンパー付き人工地盤			
	R020	R045	R045-R	R020-D235	R020-D100	R045-D235	R045-D100
弾性固有周期 (秒)	0.76	0.45	0.51	0.77	0.77	0.46	0.46
ダンパー耐力分担率 β	—	—	—	0.71	0.36	0.74	0.37
ダンパー/フレーム剛性比 k	—	—	—	2.41		2.63	
ダンパー適正分担率	—	—	—	0.34		0.35	
ダンパー分担率上限	—	—	—	0.46		0.48	

4.3 地震応答解析の結果

図8に、R045骨組（設計ベースシヤール係数0.45）の各層の最大層間変形角について、単独の解析結果（R045）と、100N/mm²級と235N/mm²級のダンパー付人工地盤上の結果（R045-D100、R045-D235）及びラーメン人工地盤上の結果（R045-R）を地震波毎に比較して示す。R045単独解析では、各層の最大層間変形角は、0.01rad程度である。この骨組がラーメン人工地盤上にある場合の応答変形が最も大きく、235N/mm²級ダンパー、100N/mm²級ダンパーの順に、上部骨組の応答変形は小さくなる。

図9は、骨組各層の損傷としての平均累積塑性変形倍率 ($\bar{\eta}$) の値について、R045、R045-D100、R045-Rを比較したものである。単独の解析では骨組の損傷 ($\bar{\eta}$) は0.2程度でほとんど塑性化していないが、ラーメン人工地盤上になると4~5程度の大きな損傷になっていることがわかる。100N/mm²のダンパー付人工地盤上では、損傷は1以下であり、比較的小さな値と言える。

図10に、R020骨組（設計ベースシヤール係数0.20）の各層の最大層間変形角について、単独の解析結果（R020）と、100N/mm²級のダンパー付人工地盤上

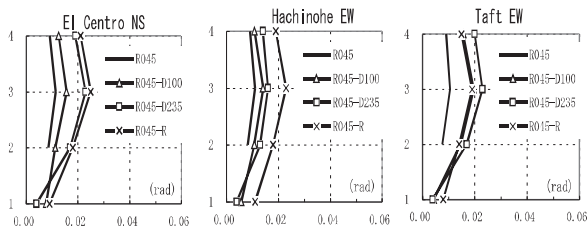


図 8 R045 骨組の最大層間変形角の比較

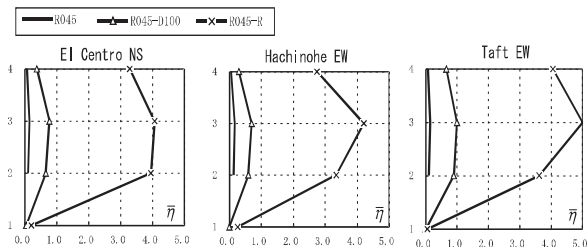


図 9 R045 骨組の各層の平均累積塑性変形倍率の比較

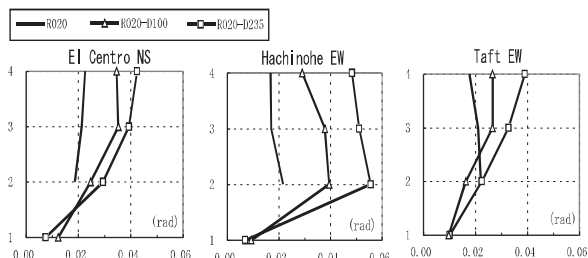


図 10 R020 骨組の最大層間変形角の比較

の結果 (R020-D100)、235N/mm² 級のダンパー付人工地盤上の結果 (R020-D235) を地震波毎に比較して示す。R020 骨組単独の応答解析では、各層の最大層間変形角はおおよそ 0.02rad であり、図 8 の R045 に比べて大きくなっている。この骨組が D100 及び D235 の人工地盤上にある場合には、地震波によるばらつきはあるが、変形がかなり大きくなり、D235 のダンパー付人工地盤上では 0.05rad 程度に達する場合がある。D100 の応答と D235 の応答を比較すると、D100 の方が上部建物の応答変形を小さくできることがわかる。これは、D100 はダンパーを早期に降伏させてダンパーでの履歴減衰効果を高めているからと考えられる。

これらの解析結果から、上部骨組の設計ベースシヤ係数を 0.20 で設計した骨組では、ダンパー付人工地盤上でも、0.04rad 程度の大きな変形になる可能性がある。そのため、通常のラーメン骨組による人工地盤上の建物の設計ベースシヤ係数は通常建物の 2-3 倍程度にする必要があると考えられる。また、ダンパー付人工地盤を採用することによって、ラーメン人工地盤に比べて人工地盤上の建物の損傷をかなり小さくできる。

5. 地震エネルギー集中型人工地盤骨組の地震応答

5.1 試設計 B の目的と設計

試設計 A の地震応答解析から、ラーメン人工地盤上に建設される建物は、通常の建物の 2-3 倍程度に設計地震力を割り増す必要があり、ダンパー付人工地盤にした場合でも、地盤上に建設される場合よりも応答変形や損傷が大きくなることがわかった。人工地盤層で入力地震動を低減することができれば、人工地盤上に建設される建物の耐震性能が相対的に向上することになり、地域単位での防災性能を向上させることができると考えられる。

人工地盤層で入力地震動を低減するためには、免震人工地盤にすることが最も有効な方法と考えられるが、ここでは、免震人工地盤よりも安価な構造システムとして、半剛接フレームに履歴型ダンパーを組み込んだ人工地盤 (地震エネルギー集中型人工地盤) を提案し、このシステムによって入力地震動が低減され、上部建物にほとんど損傷が生じないようにできるかどうか、地震応答解析によって明らかにする。

ここで応答解析の対象とする骨組は、表 1 の試設計 B に示す条件によって設計を行ったものである。試設計 B では、人工地盤の構造として、ラーメン人工地盤、エネルギー集中型人工地盤、免震人工地盤の設計を行う。ここでは、人工地盤上の積載荷重を 5kN/m² とし、実質的な荷重条件下での解析を行う。

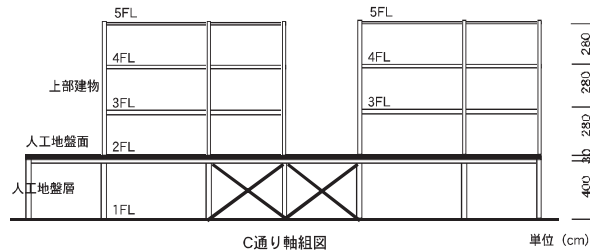


図 11 試設計 B の建物軸組図

表 5 試設計 B の上部建物部材断面一覧

Story/Floor	梁 (SN400)		柱 (BCR295)	ブレース (SS400)
	5m スパン	7m スパン		
上部建物 (ブレース構造)	4/5	H-350×150×6×9	H-350×175×7×11	□-200×9
	3/4	H-350×150×6×9	H-350×175×7×11	□-200×9
	2/3	H-350×150×6×9	H-350×175×7×11	□-200×9

表 6 試設計 B の人工地盤層部材断面一覧

人工地盤の種類	Story/Floor	梁 (SN400)		柱 (BCR295)	ダンパー
		5m スパン	7m スパン		
ラーメン人工地盤	1/2	H-400×200×8×13	H-500×200×10×16	□-300×9	—
エネルギー集中型人工地盤	1/2	H-450×200×9×14	H-600×200×11×17	□-350×9	断面積: 6.37cm ² 降伏点: 180N/mm ²

上部建物の構造をブレース構造としているのは、ここで提案するエネルギー集中型人工地盤がより有効となる範囲として、上部建物の周期が比較的短周期の場合であるためである。また、人工地盤上に建設される建物の規模や棟数によって、人工地盤上の積載重量が変化し、人工地盤上で目標とする応答が得られない可能性があるため、図 11 に示すように、2 棟建設されている場合を基本とし、層数及び棟数を变化させた設計も行っている。上部建物の部材断面等を表 5 に、ラーメン人工地盤と地震エネルギー集中型人工地盤の部材を表 6 に示す。地震エネルギー集中型人工地盤では、梁端部をピンとして設計している。

5.2 地震エネルギー集中型人工地盤の概要と設計方法

ここで提案する地震エネルギー集中型人工地盤は、免震人工地盤に類似した応答特性を有することを意図しており、免震のアイソレーターに相当する部分を、半剛接フレームとし、それに座屈拘束ブレース型の履歴型ダンパーを組み込んだ構造である。一般に、履歴型ダンパーには、免震層で想定するような大変形を生じさせることはできないと考えられる。ここでは、履歴型ダンパーが耐力低下せずに変形できる最大の層間変形角を 0.04rad と想定し、設計された人工地盤の大地震の応答を 0.03rad 程度にすることを目標値とし、半剛接フレームと履歴型ダンパーの耐力、剛性を設定する。また、大地震時には、ダンパーのみ交換し、半剛接フレームは塑性化させないものとするため、半剛接フレームの降伏変形角を 0.04rad 程度とする。

人口地盤層の初期降伏耐力及び 2 次剛性を小さくすることによって、人工地盤上の建物の応答加速度を小さくできるが、初期降伏耐力及び 2 次剛性が小さすぎると、人工地盤層の応答変形が過大になる。ここでは、ダンパーとフレームの耐力と剛性を試行錯誤変化させた質点系モデルの地震応答解析を行い、図 12 に示すようなダンパーと半剛接フレームの復元力特性で、上部建物の応答が最も小さくな

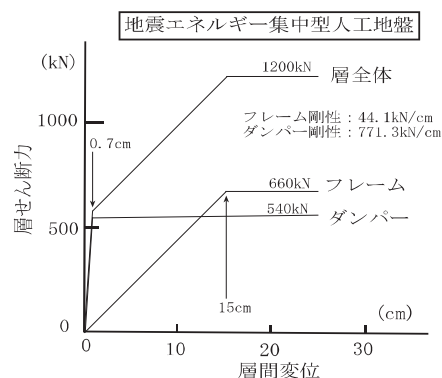


図 12 地震エネルギー集中型人工地盤の層せん断力 - 層間変位関係

る結果を得た。人工地盤層の層全体の耐力として、ベースシヤール係数 0.2 程度を設定し、ダンパーとフレームの耐力と剛性を变化させて、数ケースの検討を行うことで、比較的容易に最適な組み合わせが見つかると考えられる。

次に、試設計骨組の地震エネルギー集中型人工地盤層の層せん断力 - 層間変位関係が、図 12 で示した荷重 - 変形関係になるように、人口地盤層のフレームと座屈拘束ブレース型のダンパーの設計を行う。フレームは層間変位 15cm (0.0375rad) で降伏するものであり、一般の剛接フレームの剛性に比べて、かなり小さくなっている。そのため、フレームのすべての柱脚をピン接合とし、大部分の梁端部をピン接合にし、一部を半剛接にすることで対応する。ここでは文献 7) に示される設計方法に基づいて、以下の手順で半剛接フレームの設計を行う。

- 1) 現設計の梁に対して、 $M_m / M_{bp} = \alpha$ (ここでは $\alpha = 0.5$ とした) となるスプリットティーを設計。 M_m は接合部最大曲げ耐力、 M_{bp} は梁全塑性モーメント。
- 2) 文献 7) の剛性評価法により梁の等価剛性を算定。
- 3) 梁の等価剛性から、層の半剛接接合部数を決定。
- 4) 半剛接接合部数と必要耐力から、スプリットティーの降伏点 (材料) を決定 (ここでは $\sigma_y = 440\text{N/mm}^2$ となり、SA440 とした)。
- 5) 半剛接架構としての耐力を算定。

座屈拘束ブレース型のダンパーについては、層としての降伏変形が、図 12 に示すように 0.7cm となるように断面を決め、必要耐力になるように降伏点を定め、材料を決定する (ここでは 180N/mm^2 となった)。このように設計された地震エネルギー集中型人口地盤層のフレームとダンパーの荷重 - 変形関係が、おおよそ図 12 に近くなることを静的漸増载荷で確認した。

なお、免震人工地盤については、文献 8)、9) を参考にして、免震人工地盤として適切な応答になるように、転がり支承と鉛プラグ入り積層ゴム免震装置を組み合わせるものとして、図 13 のように、層の荷重 - 変形関係を定めた。

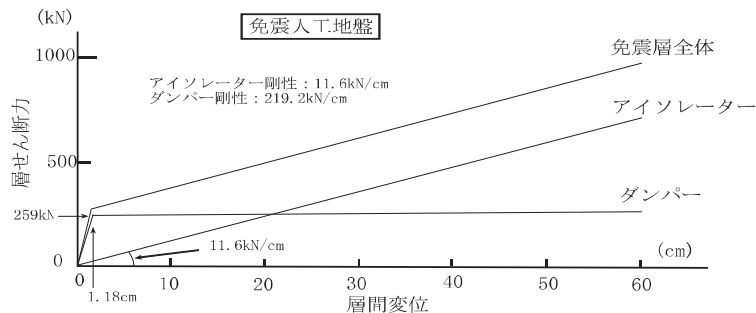


図 13 免震人工地盤の層せん断力 - 層間変位関係

5.3 解析方法

解析方法は、4.2で示したものと同様に、建物の半分を解析対象にしてモデル化し、応答解析を行う。図14に地震エネルギー集中型人工地盤を用いた骨組の解析モデルを例として示す。上部建物は2棟建設されているものとし、B構面のみがブレース構造で、C構面はラーメン構造である。エネルギー集中型人工地盤層における梁端部半剛接部分は、A構面の4カ所のみで、その他はピン接合としている。座屈拘束ブレース型のダンパーは、図に示すようにA、C構面に配置する。A、B、C構面の節点の変位を等置して、擬似立体解析により地震応答解析を行う。入力地震動にはEl Centro NS、Hachinohe EW、JMA Kobe NSを用いる。入力地震動の大きさは、4.2と同様に、各解析骨組毎に、建物への損傷に寄与するエネルギーが、設計速度応答スペクトルの値になるように最大加速度を調整する。その他の解析条件は4.2と同様である。なお、免震人工地盤骨組だけは、質点系モデルで応答解析を行っている。

本解析では、エネルギー集中型人工地盤骨組の有効性を明らかにするため、エネルギー集中型人工地盤骨組、ラーメン人工地盤骨組、免震人工地盤骨組及び上部建物単独の地震応答の比較を行う。表7にこれらの4つの解析骨組の固有周期等を示す。フ

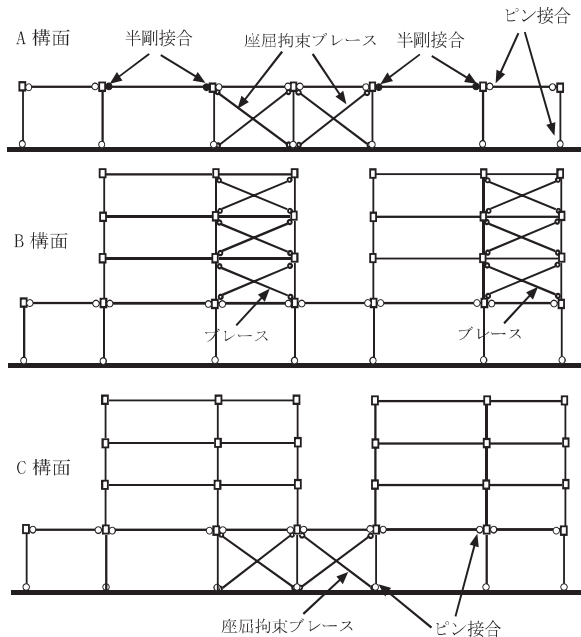


図14 エネルギー集中型人工地盤骨組の解析モデル

表7 各解析骨組の固有周期一覧

モデル名称	3層上部建物 (ブレース構造) B030(3)	ラーメン人 工地盤 B030(33)-R	エネルギー集 中型人工地盤 B030(33)-EC	免震人工地盤 B030(33)-IS
建物全体の弾性固有周期	0.36秒	0.56秒	0.53秒	1.03秒
フレームまたはアイソレーターの剛性で計算される人工地盤層の周期	---	0.54秒	2.34秒	4.57秒

レームまたはアイソレーターの剛性で計算される周期は、免震人工地盤では4.57秒、エネルギー集中型人工地盤では2.34秒となっている。

5.4 地震応答解析の結果

図15に、地震応答解析の結果得られた4つの骨組の各層の最大層間変形角を示す。上部建物単独(B030)の各層の最大応答変形に比べて、ラーメン人工地盤(B030-R)上での上部建物の応答変形は大きくなり、逆に、エネルギー集中型人工地盤(B030-EC)、免震人工地盤(B030-IS)上での上部建物の応答変形は、かなり小さくなっている。

図16は、上部建物の各層のブレース部材の平均累積塑性変形倍率($\bar{\eta}$)の最大値の分布を示す。2層に損傷が集中しているが、上部建物のみ(B030)では4~5程度であるが、ラーメン人工地盤上では(B030-R)6~8程度に大きくなっている。一方、

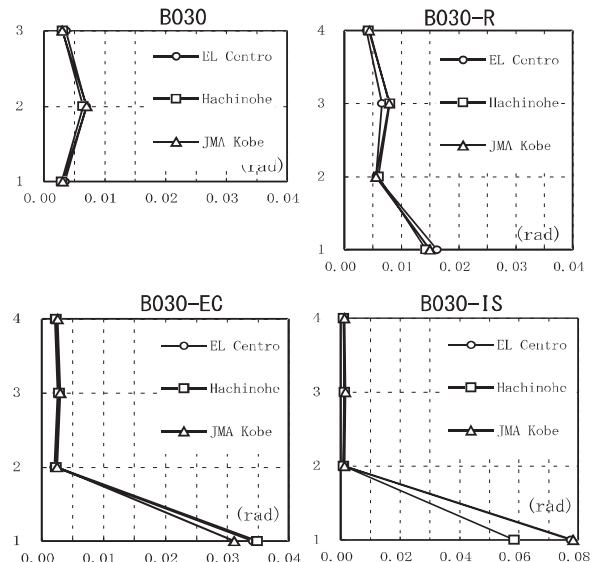


図15 各骨組の最大層間変形角の比較

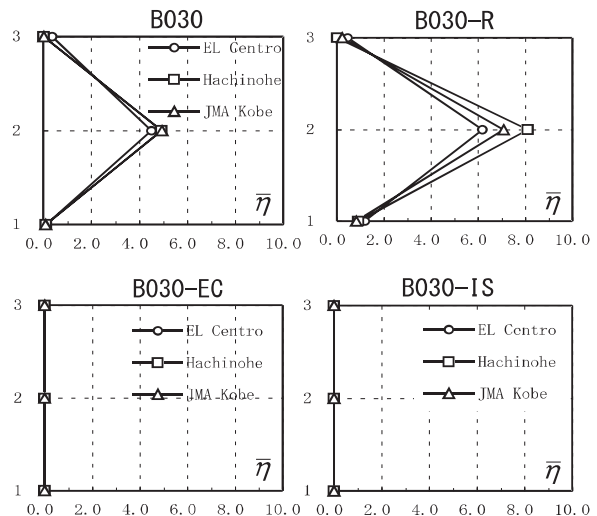


図16 上部建物のブレースの平均累積塑性変形倍率の比較

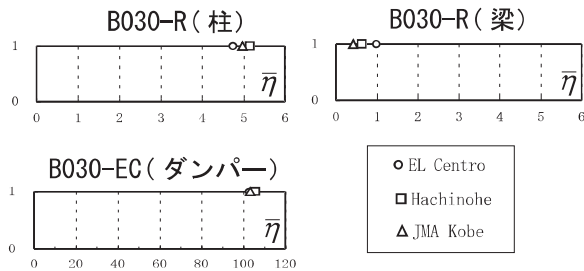


図 17 人工地盤層の各部材の平均累積塑性変形倍率の比較

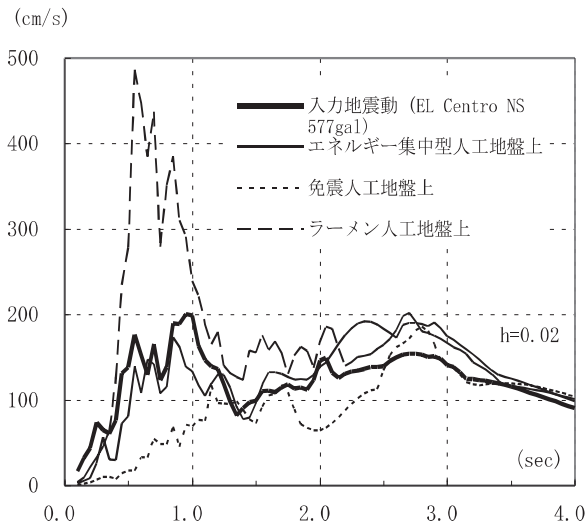


図 18 入力地震動及び各人工地盤上での入力地震動の速度応答スペクトル

エネルギー集中型及び免震人工地盤上では、塑性化していないことがわかる。

図 17 は、ラーメン人工地盤 (B030-R) の柱及び梁の $\bar{\eta}$ 及びエネルギー集中型人工地盤のダンパーの $\bar{\eta}$ を示す。ラーメン人工地盤の柱には $\bar{\eta}=5$ 程度の比較的大きな損傷が生じている。エネルギー集中型人工地盤 (B030-EC) のダンパー部材の $\bar{\eta}$ は 105 程度である。また、半剛接フレームは塑性化せず、弾性挙動であった。

図 18 には、最大加速度 577cm/sec^2 の El Centro NS の入力地震動の速度応答スペクトルと、その地震動を入力したエネルギー集中型人工地盤上、免震人工地盤上、ラーメン人工地盤上での絶対加速度の速度応答スペクトルを比較して示す。エネルギー集中型地盤上では 1.2 秒程度までは、入力地震動のスペクトルに比べて、値が小さくなり、特に、0.5 秒以下では、半分程度になっている。免震人工地盤上では、1.2 秒程度までの範囲で、その値はさらに小さくなっており、免震人工地盤が上部建物への入力地震動の低減に最も有効であることがわかる。一方、ラーメン人工地盤上では、0.5 ～ 1 秒程度の周期の建物に対しては通常の地盤上に比べて入力

地震動が大きく、2 倍以上になる場合がある。ここでは示していないが、Hachinohe や JMA Kobe の地震波に関しても同様の傾向が見られた。

これらの結果から、ここで提案したエネルギー集中型人工地盤上では、通常の地盤上に建設する場合よりも上部建物の応答変形や損傷を低減することができる。また、このエネルギー集中型人工地盤上が有効となる適用範囲として、上部建物の固有周期が 1 秒程度以下の建物と考えられるが、0.5 秒程度以下の短周期の建物にはより効果的になると考えられる。

5.5 ユニットセル構造¹⁰⁾ 骨組の地震応答解析

ここで設計した 3 層ブレース構造の上部建物 (B030) とは異なる規模の建物が建設された場合に、エネルギー集中型人工地盤上で同様の応答低減効果が見られるかどうか検討する。ここでは、図 11 に示す 2 棟の上部建物のうちの 1 棟を、文献 10) で示されているリユース等を目的とした 3 層のユニットセル構造骨組が建設されているものとして解析を行う。このユニットセル骨組は、総重量が 12.5ton であり、B030 骨組は 85.8ton である。この重量の違い (減少) が応答に及ぼす影響についても明らかにする。3 層ユニットセル骨組単体の固有周期は 0.40 秒、エネルギー集中型人工地盤上にある場合の骨組全体の弾性固有周期は 0.52 秒、重量調整を行った場合は、0.55 秒である。ユニットセル骨組の詳細情報は、文献 10) を参照されたい。

この 3 層ユニットセル骨組単体の地震応答と、エネルギー集中型人工地盤上での応答、重量を調整した場合の応答を比較するために、それぞれの解析骨組に対して、入力速度を 50cm/sec に設定した EL Centro NS、Hachinohe EW、JMA Kobe NS を用いて、質点系モデルの地震応答解析を行う。ユニットセル骨組の各層の荷重 - 変形関係は文献 10) により決定し、人工地盤層の荷重 - 変形関係は図 12 に示すものとした。

図 19 に、ユニットセル骨組単体 (UC) の各層の最大層間変形角、エネルギー集中型人工地盤上での応答 (UC-EC) 及び重量を調整した場合の応答 (UC-EC(+Mass)) を比較して、地震波毎に示す。EL

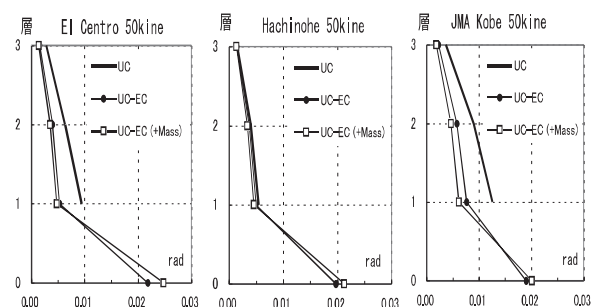


図 19 ユニットセル構造骨組の各層の最大層間変形角の比較

Centro 及び JMA Kobe では、エネルギー集中型人工地盤上での応答変形が、単独の場合の応答の半分程度になり、有効であることがわかる。また、重量の影響は小さく、重量の差分 73ton を付加しても、上部建物の応答はほとんど変わらない。B030-EC 骨組の全重量は 611.9ton であり、1 割程度の重量減少に対しては、応答に及ぼす影響はほとんどないことがわかる。

仮に、上部建物の建設規模が小さくなって、応答に影響を及ぼす可能性がある場合には、人工地盤層に防災用の貯水槽等を設け、人工地盤上に建設される建物の棟数や層数に応じて、貯水量を調整することによって、上部建物の規模や建設状況による重量変化の影響を排除することができると考えられる。このような防災用の貯水槽は、耐震性能をコントロールする機能を持つとともに、一般的には、豪雨のための遊水池としての機能や人工地盤層及び人工地盤上建物の火災時の消化のための役割等を果たすものであり、本報で提案する地域単位で防災を行う構造システムを実現する上で、重要な設備になるものと考えられる。

6. まとめ

本報告では、通常の地盤上の建物と人工地盤上の建物への地震入力の大さき等を検討するとともに、人工地盤層で建物への入力地震動を低減することを目的とした地震エネルギー集中型人工地盤の提案を行い、提案した構造システムが有効であることを地震応答解析により示した。本報の解析で得られた結論を要約して以下に示す。

- 1) ラーメン骨組による人工地盤上の建物の設計ベースシヤール係数は、通常建物の 2 ～ 3 倍程度に割り増す必要がある。
- 2) ダンパー付人工地盤を採用することによって、ラーメン人工地盤に比べて、人工地盤上の建物の損傷をかなり小さくできる。
- 3) 設計用の地震層せん断力係数分布に関しては、基準法の A_i 分布では、必ずしも安全でない場合があるため、SRSS 等の剛性が評価できる方法で地震層せん断力係数を算定すべきと考えられる。
- 4) 半剛接フレームと履歴型ダンパーを組み合わせた地震エネルギー集中型人工地盤を提案し、地盤上よりも上部骨組の応答変形や損傷を低減できることを確認した。
- 5) ここで提案した地震エネルギー集中型人工地盤の適用範囲は、上部建物の固有周期がおおよそ 1 秒程度以下であるが、0.5 秒程度までの低層または剛性の高い建物に対しては特に有効となる。
- 6) ユニットセル構造骨組の応答解析を行い、ここで提案した地震エネルギー集中型人工地盤が、ユニットセル構造骨組に対しても有効であることを

確認した。また、1 割程度の人工地盤上の重量変化は、応答にほとんど影響を及ぼさない。

謝辞

本報告の一部は、国土技術政策総合研究所「アーバンスケルトン方式等による都市再生技術に関する研究」(委員長：小林秀樹千葉大学教授)の一環として実施したものである。本報告で示した試設計や解析を進めるにあたり、構造企画研究所河村昌俊氏、JFE 技研(株)加村久哉氏、住友金属工業(株)加藤真一郎氏には、多大なご協力をいただきました。ここに記して、謝意を表します。質点系の応答解析プログラムとして、熊本大学小川厚治先生が作成された Shearms. f を使用させていただきました。

参考文献

- 1) 小林秀樹、藤本秀一、江袋総司：立体基盤建築物を成立させる法制度の研究、国土交通省国土技術政策総合研究所研究報告、No. 11、平成 15 年 3 月
- 2) 生きる建築へのアプローチ (その 1) 建築は考える輩となりうるか、21 世紀鋼構造フォーラム シンポジウム「21 世紀、鋼構造技術は何ができるか」、独立行政法人建築研究所、pp. 9-10、2002. 11
- 3) 小川厚治、多田元英：柱・梁接合部パネル部の変形を考慮した静的・動的応答解析プログラムの開発、第 17 回情報システム技術シンポジウム、pp. 79-84、1994. 12.
- 4) 長谷川隆、西山功、向井昭義、石原直、加村久哉：エネルギーの釣合に基づく履歴型ダンパー付鉄骨造骨組の地震応答予測、日本建築学会構造系論文集、第 582 号、pp. 147-154、2004. 8
- 5) 加村久哉、長谷川隆、植木卓也、河村克彦：人工地盤を有する建築物の地震応答特性 (その 2 地震応答解析結果)、日本建築学会大会学術講演梗概集 C-1、pp. 995-996、2004. 8
- 6) 加村久哉、河村昌俊、小川厚治、井上一朗：許容応力度等計算に準拠して設計された履歴型ダンパー付鋼構造骨組の地震応答、日本鋼構造協会 鋼構造論文集、Vol10、No. 38、pp. 91-104、2003. 6
- 7) 高力ボルト接合による靱性型鉄骨架構の構造設計マニュアル、(社)日本鉄鋼連盟、2003. 3
- 8) 免震構造設計指針、日本建築学会、2001. 9
- 9) 免震建築物の技術基準解説及び計算例と解説、工学図書株式会社、平成 13 年 5 月
- 10) ユニットセル構造システムの提案、JSSC 鋼構造シンポジウム 2004 技術特別セッション 21 世紀鋼構造フォーラム研究成果発表資料、2004. 11

4.2 21世紀鋼構造フォーラム WG2の活動

第二期の活動の開始当時、小泉首相が議長を務める総合科学技術会議では、骨太の産業発掘戦略の一環として、NTPT（ナノテクノロジー・材料研究開発推進プロジェクトチーム）を発足し、その下に「革新的構造材料」ワーキンググループが組織され、府省横断的なテーマを検討していた。

鉄鋼材料については、組織の微細化技術が、「ナノ」の世界に入っていることから、鉄鋼分野から、ナノテクノロジーにより、建築構造用鋼材の強度を現在の2倍（800N/mm²鋼）とする革新的構造材料を開発し、これにより「複合機能＋内部構造可変＋長寿命型」の新構造建築物の実現を達成目標とする府省連携プロジェクト提案がなされていた。

このNTPTからの提案の実現に、シンポジウム「21世紀、鋼構造技術は何ができるか」において出されたアイデアを活用できるのではないかと考え、21世紀鋼構造フォーラムの有志が中心となって、経済産業省からは、一般公募部門論文で、最優秀賞となった「トリプル・スケルトン構造システムによる空間可変な長寿命鉄骨建築」を、国土交通省からは、「ユニットセル構造システム」を基本とする具体化のための提案を行った。これらの提案の採否に関わらず、本フォーラムとしては「安全・安心・長寿命などに特化したテーマを具体化する活動」を実施する集まりとしてWG2を設置することとしていたが、NTPTの正式なテーマとして採択されたため、最終的にWG2の形成、活動は行なわず、上記の革新的構造材料ワーキングに関与する委員が同プロジェクトの活動状況の報告を全体会議などで行い、WG2の機能の役割を果たす事になった。

NTPTにおける本テーマの実施では、当初、連携機関としては、独立行政法人建築研究所〔国土交通省〕、社団法人日本鋼構造協会〔国土交通省〕、社団法人日本鉄鋼連盟〔経済産業省〕、財団法人金属系材料研究開発センター〔経済産業省〕であったが、2004年度より、（社）新都市ハウジング協会加え、2009年度以降の実用化を目指して、5ヵ年計画、年間予算約4億円で、実行に付されており、現在、鉄鋼各社による材料一般認定の取得と、実大モデルによる実証実験（実験後、移設、リユース）が進んでいる。なお、これと平行して、国土交通省国土技術政策総合研究所では、総合技術開発プロジェクト「高強度鋼等の革新的構造材料を用いた新構造建築物の性能評価手法の開発」（2005年度～2008年度）を進めるなど、鋼構造建築研究における一大プロジェクトとなっている。（添付）国土交通省、経済産業省の申請書

「ナノテクノロジー・材料」産業発掘戦略に係る連携プロジェクトについて

国土交通省

連携プロジェクト名：

高強度鋼・高機能鋼等の建築分野への活用技術の開発

連携機関：独立行政法人建築研究所〔国土交通省〕

社団法人日本鋼構造協会〔国土交通省〕

社団法人日本鉄鋼連盟〔経済産業省〕

財団法人金属系材料研究開発センター〔経済産業省〕

活動内容：高強度鋼・高機能鋼等の建築分野への利用促進のためには、良質な建築ストックの実現とリサイクル・リユース技術の活用による環境対応、軽量化による超々高層建築の実現による都市人口集中への対応のほか、想定外外乱に対するリダンダンシーの確保による安全性の向上などが、求められている。

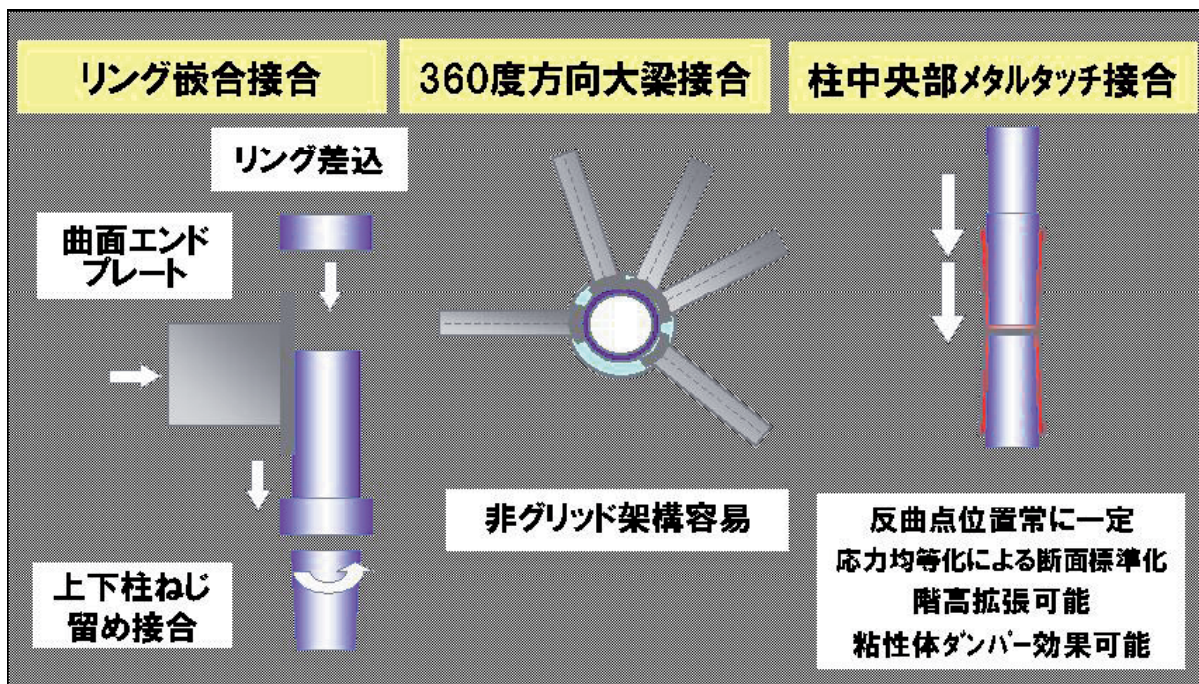
そこで、建築分野において先行して研究が進められている高強度鋼（600N級鋼）、高耐震性鋼、高耐火性鋼、高施工性・高性能接合に関する技術を、超高強度鋼のシーズ技術によりさらに発展させることで、鋼材・接合材・部材の開発も含めて、上記の各要求性能に対応した建築構造体の構築技術を構築する。

このために、高強度鋼・高機能鋼等に求められる性能の把握、構造設計手法の構築の開発を実施している独立行政法人建築研究所と、高強度鋼・高機能鋼等を用いた建築物の耐震性・耐火性確認（実大実験、既存建築物との比較）および機械式接合工法、リユース工法（ITを利用した鋼部材循環システム）、溶接技術の開発を実施している社団法人日本鋼構造協会・社団法人日本鉄鋼連盟、高強度鋼の開発を実施している財団法人金属系材料研究開発センターが連携し、効率的に研究開発を実施する。

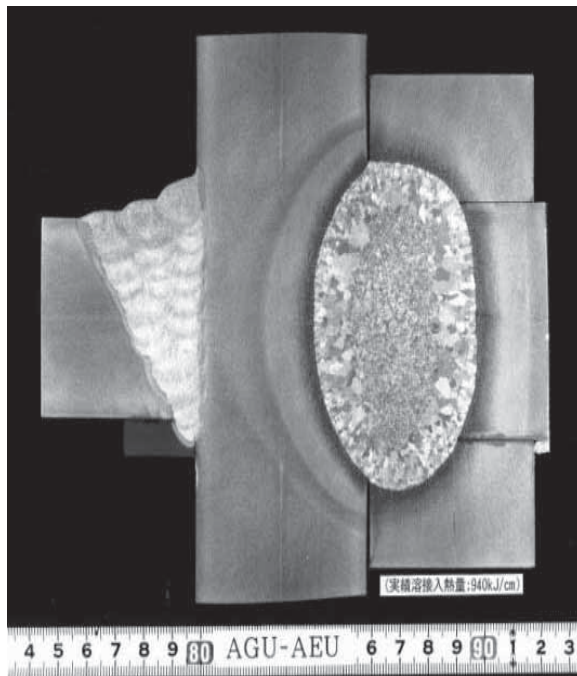
連携の現状：

- ・ 平成13年6月より、独立行政法人建築研究所、社団法人日本鋼構造協会、社団法人日本鉄鋼連盟の3者により、21世紀鋼構造フォーラムを組織し、産・学・官の鋼構造研究者および実務者により、環境に配慮した新時代につながる鋼材のあるべき姿、その利用技術に関して情報交換を実施。
- ・ 日本鉄鋼連盟では、建築分野への適用を対象とした800N級鋼の溶接技術に関する研究を進めている。

参 考：



リユースを考慮した鋼の建築分野への応用のイメージ



高 HAZ 靱性鋼（高機能鋼）のエレクトロスラグ溶接と溶接継手部構造性能の検討の例

<出典>

シンポジウム「21世紀、鋼構造技術は何ができるか」独立行政法人建築研究所、ほか

「ナノテクノロジー・材料」産業発掘戦略に係る連携プロジェクトについて

経済産業省

連携プロジェクト名：

高強度・高機能鋼を用いた安心・安全・超寿命建築物（スケルトン）の開発

連携機関： 社団法人日本鉄鋼連盟〔経済産業省〕

財団法人金属系材料研究開発センター〔経済産業省〕

独立行政法人建築研究所〔国土交通省〕

社団法人日本鋼構造協会〔国土交通省〕 (検討中)

活動内容：建築物の骨組（スケルトン）には、現在、強度400～500N級の鋼材に、機能（耐震性・耐火性・耐久性など）をその都度付与した鋼材で構築されているが、超高強度（800～1000N級）に各機能を複合した鋼材を開発することで、安心・安全・超寿命の建築物を経済的に実現することが可能である。

すなわち、超高強度化により軽量化（1/2）することで、建設コストを低減（基礎の簡素化なども含めて）し、リデュース（省資源）・リユース（ハンドリング容易）を促進するとともに、各機能を合わせ持つことで、高機能で環境に優しく良質な建築物を実現することができる。

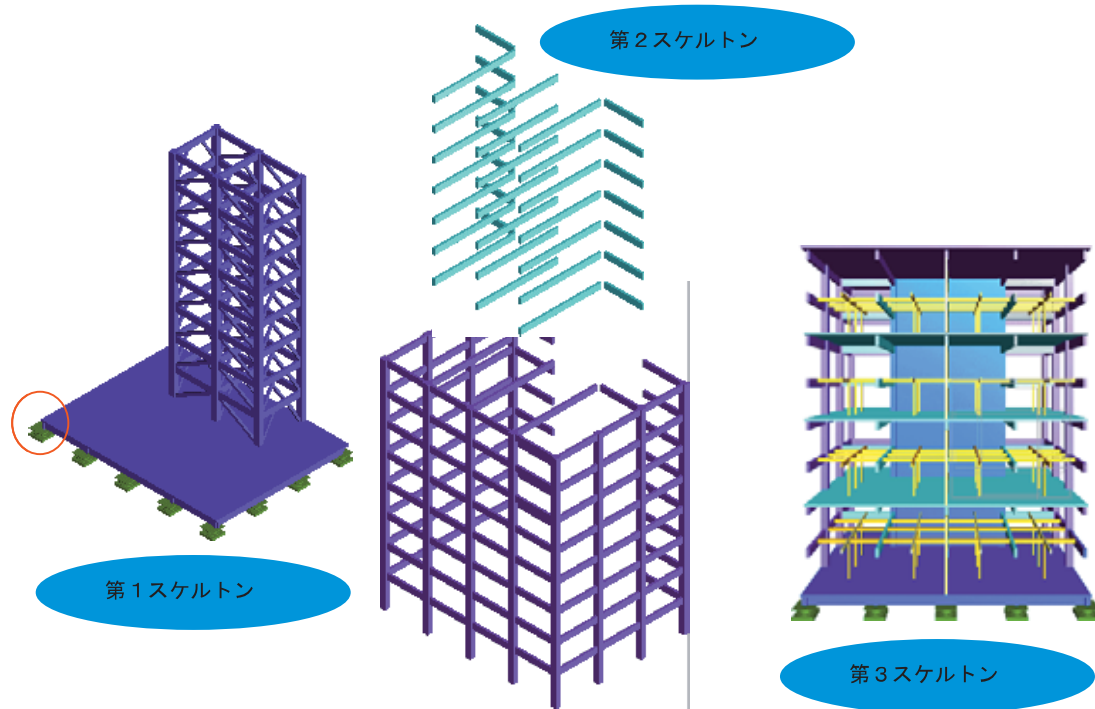
しかしながら、超高強度鋼についてはシーズ技術（超微細鋼など）があり実現可能であるものの、超高強度鋼に各機能を複合した鋼材、その接合工法（溶接、機械式）などの開発は着手されておらず、また、建築設計の手法（超高強度鋼・高機能鋼がその特性を発揮できる）も整備されていない。

このようなことから、高強度・高機能鋼およびその接合材などの開発およびこれらを用いたスケルトンの性能検証（実大構造・火災実験など）に関する研究（別紙）を長年実施している社団法人日本鉄鋼連盟と、超高強度鋼の開発を進めている財団法人金属系材料研究開発センター、高強度・高機能鋼等に求められる性能の把握、構造設計手法の構築の開発を実施している独立行政法人建築研究所および社団法人日本鋼構造協会が連携し効率的に研究開発を実施する。

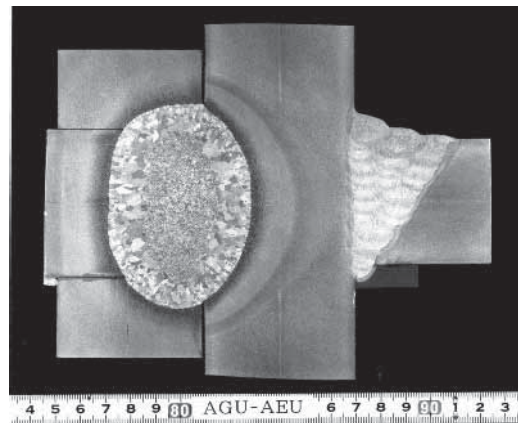
連携の現状：

- ・ 日本鉄鋼連盟では、建築用の600N級鋼に加えて800N級鋼の研究を進めている。
- ・ 平成13年6月より、社団法人日本鉄鋼連盟、独立行政法人建築研究所、社団法人日本鋼構造協会の3者により、21世紀鋼構造フォーラムを組織し、産・学・官の鋼構造研究者および実務者により、新時代にふさわしいスケルトンに関して情報交換を実施（提案されたスケルトン別紙）。

参考1：高強度・高機能鋼を用いたスケルトンの例（トリプル・スケルトン）



参考2：高靱性鋼（高機能鋼）の接合研究



4.3 21世紀鋼構造フォーラム WG3の活動

- ① 建築鋼構造技術曼荼羅
- ② 21世紀鋼構造フォーラム新技術探索セミナー

従来はあまり話題に出なかったものの少し開発の方向を変化させれば建築鋼構造に利用可能となりそうな技術を含めて、建築鋼構造を支え、取り巻き、協働する技術を調査することを通して、建築鋼構造技術の世界を考えた。

建築鋼構造を支える技術としては、これまでに手にした実用技術、今まさに手に入れようとしている開発中技術、そして、もしこのような技術があればもっと可能性が広がるという将来技術、というような開発の時間軸を機軸として考えることが一つの視座であろう。しかしながら、WG3では、実用技術や開発中技術を網羅的に位置づけ、それらを念頭に置くことによって、さらなる発想の展開や新しい発想の注入を加味することで将来技術のアイデアも浮んで来ると考えた。それならば、我々の知っている技術（さらには、欲しいと思う技術）をやや大袈裟に言えば「一幅の画」に表現して、21世紀建築鋼構造技術の世界を俯瞰してみようではないかというチャレンジを開始した。目指すは21世紀の鋼構造技術の世界を「曼荼羅」に、ということになったわけである。

次ページに、現段階の作品を示している。図にあるように、技術を分類するとともに、関連する画像情報を埋め込んで、技術を俯瞰しようとした。次項に述べる新技術探索セミナーによって得られた技術情報も適切な位置にとり入れている。

現状は、残念ながら、最終目標とした「曼荼羅」の域には到達しているとは言い難い。我々が目指した技術を俯瞰するという目的に、なんとか使える絵になっているといったところであろうか。今後、更なる改良を加えてまたの機会には「曼荼羅」と胸を張っていえる作品に仕上げたいと考えている。

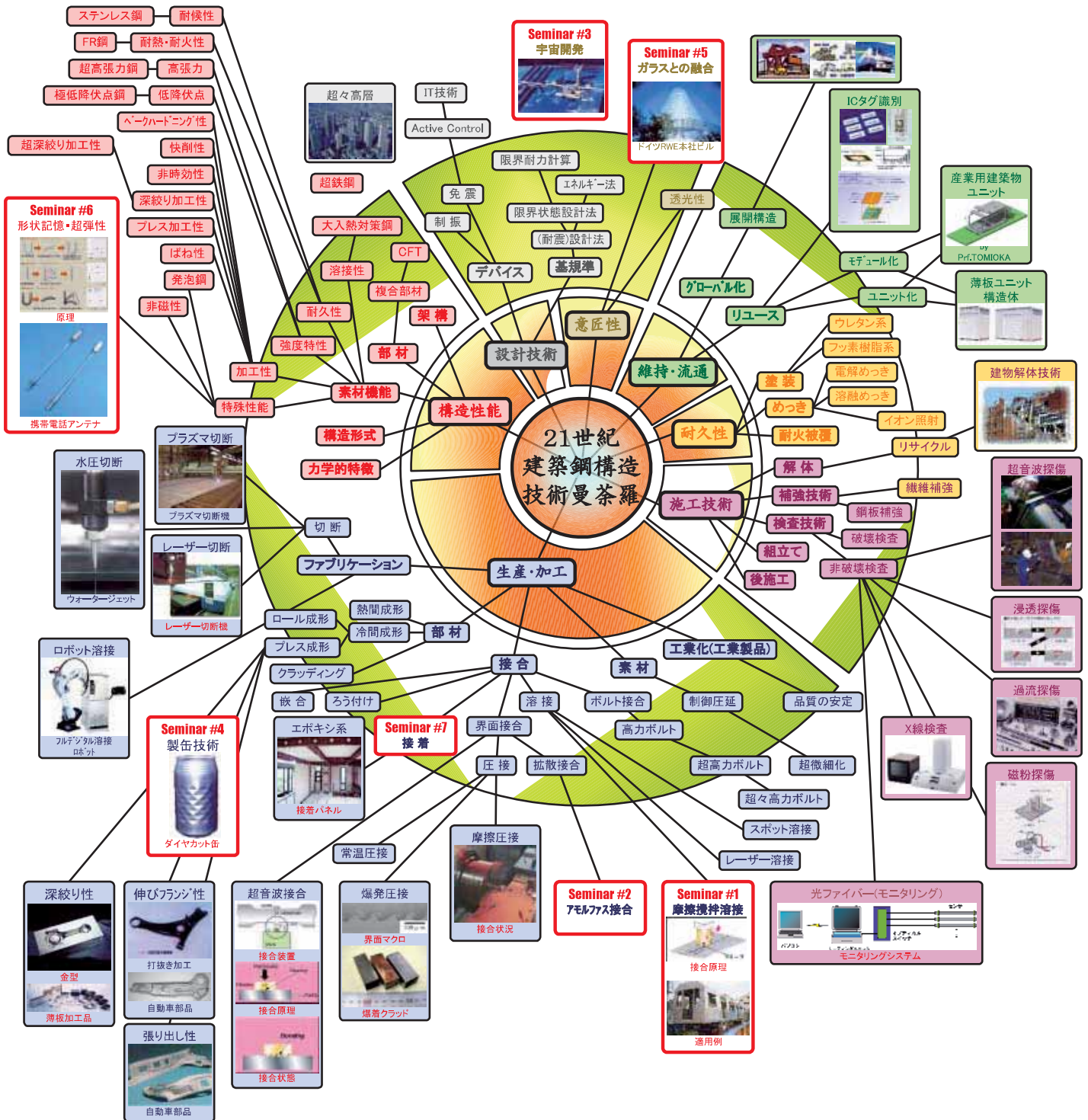
これとは別に、技術の可能性を探る上ではWG3メンバーの議論だけに頼ることなく、素材メーカー、異分野の専門家のお話を聞くことが必要だと考え、フォーラムメンバーの勉強の場として「新技術探索セミナー」を開催した（下表）。各セミナーの概要を報告する。

新技術探索セミナー

回	月日	テーマ	講師
1	2/12	摩擦攪拌接合とその適用性について	川崎重工業(株)・古賀信治氏
2	3/17	アモルファス接合について	住友金属工業(株)・高田啓一氏
3	4/26	宇宙開発と材料について	(独)宇宙航空研究開発機構・山本昌孝氏
4	6/7	特殊ガラス構法の変遷と今後	日本板硝子 D&G システム(株)・松延晋氏
5	7/30	製缶分野におけるプレス加工技術と材料について	東洋製罐(株)・只木康文氏
6	9/10	形状記憶合金の特性とその用途	大同特殊鋼(株)・森井浩一氏
7	10/14	接着について	コニシ(株)・杉田 博氏

21世紀鋼構造フォーラムWG3 21世紀建築鋼構造技術曼荼羅

—他分野既存鋼材、既存技術およびその応用技術の探索—



「21世紀鋼構造フォーラム 第1回新技術探索セミナー」の開催結果報告

「21世紀鋼構造フォーラム」は、これからの鋼構造技術の担い手である若手研究者、技術者および設計者が参加し、自由な発想、自由な立場で斬新な鋼構造研究の提案などを行う意見交換の場として、2001年6月に設立されました。昨年度には、本フォーラムで提案された内容を対外的に発信し、また、関係者に広く意見を提案して頂くために、シンポジウム「21世紀、鋼構造技術は何ができるか」を開催しました。本フォーラムでは、今年度からの二年間を新たな活動期間と位置付け、2つのWG (WG1、WG3) を設けて以下の活動を行なっています。

WG1：「これまでに挙げたテーマを具体化する活動」

WG3：「建築分野以外の既存鋼材、既存技術またはその応用技術を用いた建築物の提案」

WG3では建築分野での新たなニーズ探索を目的に、その最初のステップとして、建築分野以外の専門家を招聘し、その分野で用いられている材料、接合技術、構造等について紹介して頂き、建築分野への適用を検討しております。

今回ご紹介する「新技術探索セミナー」は、WG3の活動の一環として開催されたものです。第1回は、川崎重工株式会社の古賀信次博士を講師に迎え、現在、アルミニウム合金の接合において脚光を浴びている「摩擦攪拌溶接」をテーマとして取り上げ、紹介して頂きました。今後も建築分野以外の専門家の招聘し、その分野で用いられている材料、接合技術、構造等について紹介して頂く予定です。

■第1回 新技術探索セミナーの概要

日時：2004年2月12日（木）午後2時～4時

場所：鉄鋼連盟 第1会議室（鉄鋼会館4階）

テーマ：「摩擦攪拌接合とその適用性について」

講師：古賀 信次 氏

工学博士（大阪大学）、技術開発本部システム技術開発センター製造技術部 接合グループ長、1981年に大阪大学大学院工学研究科（溶接工学専攻）修士課程を終了し、川崎重工工業技術研究所入社、1993～1994年 米マサチューセッツ工科大学客員講師。

講演概要：

1) 摩擦攪拌接合とは

摩擦攪拌接合法 (FSW: Friction Stir Welding) は、1990年代初頭に英国 TWI によって開発されたもので、低歪、高能率、省エネルギー等の数多くの特徴を持ち、難接合材の代表であるアルミニウム合金やマグネシウム合金の溶接施工にとって革新的な接合法です。1995年に米 Welding Journal 誌に発表され、正式に産学会に登場してから10年弱ですが、わが国においても TWI から研究ライセンスを取得した幾つかの大学や研究所で活発な研究が行われるとともに、アルミ素材メーカーやファブリーケータの数十社が使用ライセンスを取得して実製品への適用を進めつつあります。FSWによる接合は、ピンと呼ばれる小突起を先端に持

つ円柱形状の接合ツールを回転させながら被接合材料に押し付け、ピンを埋没させた状態で接合線に沿ってツールを移動させることにより行われます (図1)。被接合材料はピンおよび接合ツール下面との動摩擦により発熱・軟化し、ツールの回転に引きずられる形で塑性流動を起こして一体化します (アルミニウム合金の場合の加熱温度は融点よりやや低い750～800K←材料の溶融は起こらない: 固相接合)。また、図2に示すように継手中央には高温への加熱と大きな塑性流動により生じた再結晶からなる部分 (攪拌部: Stir Zone) が形成され、攪拌部では組織が細粒化され母材原質部より破壊靱性が向上します。FSWの長所・短所をまとめると表1となります。

表1 FSWの長所・短所

長 所	
固相接合のメリット	溶接変形が極めて小さい。 表裏面とも溶接ビードの形成なし(図3)
自動プロセス	凝固・溶融に伴う溶接欠陥が発生しない 機械加工に準じた完全自動プロセス
省エネ・クリーン	機械操作に特別な熟練や経験必要なし 大容量電源が不要で冷却水も必要なし 騒音・ヒューム・スパッタ等も発生せず ツール寿命が長く、消耗材が殆どない
短 所	
被接合ワークへの接触・加圧	接合装置・被接合ワークに高い剛性が必要 複雑な形状の溶接線には適用困難
対象継手が限定される	手動によるフレキシブルな接合が不可能 板厚・材質に制限有り
開先精度要求が厳しい	ギャップ・目違い許容度が小さい 接合ツールの位置決め精度要求が高い
終端処理に工夫が必要	終端部にピン孔が残存

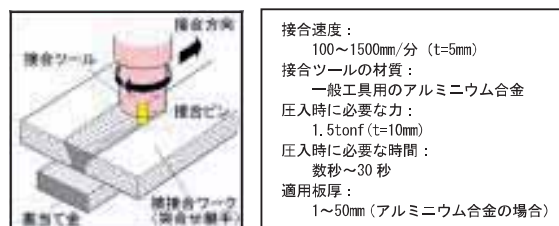


図1 FSWの接合模式図

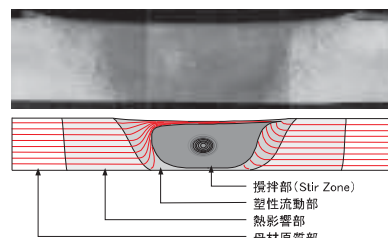
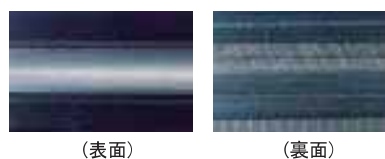


図2 FSW継手の組織分類 (7075-T6 3.2mm)



(表面) (裏面)
図3 FSW継手の外観

2) 現在の適用事例

FSWが適用されている分野と主な事例を表2に示します。基本的には、従来の接合法（アーク溶接、リベット）をFSWに代えることで、コストダウンと継手品質の向上を図っています。具体的には、アーク溶接の場合では溶接歪が大きく矯正作業が大きな割合を占めていましたが、FSWに変更することで矯正作業がほとんど必要なくなり、製作工数が低減され、コストダウンが図れます。

表2 FSWが適用されている分野

分野	適用部位	適用のメリット
航空宇宙分野	Deltaロケット燃料タンク (Boeing社) (図4)	溶接のコストダウンと継手品質向上
	自家用小型ジェット機胴体 (Eclipse Aviation社) (図5) 旅客機胴体 (Dymler-Crysler社、エアバス社)	リベット全廃によるコストダウンと機体重量低減
鉄道車両分野	在来線車輦胴体 (日立製作所) (図6)	溶接のコストダウンと継手品質向上
	700系新幹線床パネル (住友軽金属工業) (図7)	
船舶・海洋分野	高速フェリー船殻パネル (Marine Aluminum社) 調査船上部構造用パネル (住友軽金属工業)	溶接のコストダウンと継手品質向上
自動車分野	サスペンションアーム (昭和電工)	従来のアーク溶接と比較し、ブローホール等の気孔欠陥の発生がない
その他分野	半導体製造装置冷却基板 (Cu合金) (日立製作所)	従来の電子ビーム溶接と比較し、優れた機械的性質を有する
	医療用ストレッチャー (Mg合金) (兵庫県立工業技術センター)	Mg合金を用いることで従来のアルミ製に比べて、軽量・高剛性化を実現



図4 Delta ロケット用燃料タンクのFSW状況 (Boeing社)



図5 自家用小型ジェット機胴体への適用 (Eclipse Aviation社)

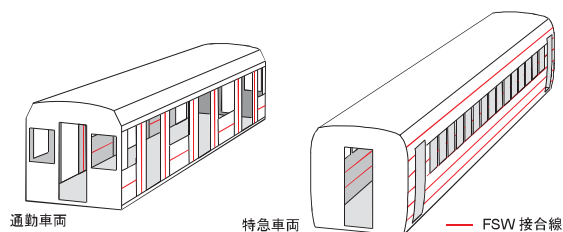


図6 鉄道車両構体側構におけるFSW適用例

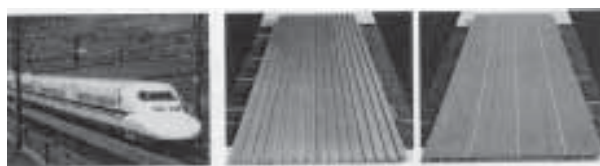


図7 700系新幹線車輦の床パネル (住友軽金属)

3) 今後の展開

表2にも示すようにFSWは、アルミニウム合金以外にマグネシウム、銅の合金に対する実用化が進められており、現在は、アルミニウム合金／銅合金の異種材接合や適用対象を炭素鋼、ステンレス鋼、ニッケル合金に拡大しようとする試みが大学・研究機関レベルでなされつつあります。

高融点の鉄鋼材料に対してFSWを可能とするためには、1300℃以上の高温でも強度や耐磨耗性を保持するツール材料の開発が不可欠となっており、その材料の最有力候補として、セラミックス系の非金属材料（例えば、CBN: Cubic Boron Nitride (立方晶窒化ホウ素)）が検討されています。ただし、現状ではツール材料の消耗が早く、4mm厚の鋼板を溶接する際に長さ100mm程度しか溶接できませんが、今後の研究・開発の進展によっては、鉄鋼材料へ実用化される日がくると考えられます。

また、FSWをスポット的に用いた新しいアルミ接合法 (FSJ 継手: Friction Spot Joining) が提案されており、リベットに代わる接合法として注目を集めています (図8)。

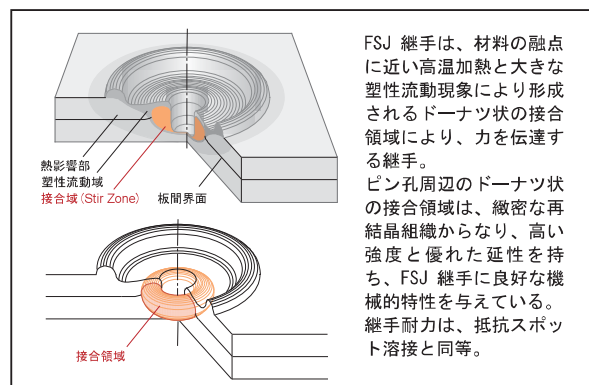


図8 FSJ 継手の概要 (川崎重工業)

所見: FSWの鋼構造分野への適用は、まだ先のことになりそうですが、FSWは、溶接歪が小さい等の従来のアーク溶接がもっていない特徴を有しており、興味深い。今後の開発状況を見守りたいと思います。

(鹿島技術研究所 建築構造グループ 澤本佳和)

「21世紀鋼構造フォーラム 第2回新技術探索セミナー」の開催結果報告

第1回新技術探索セミナー「摩擦攪拌接合とその適用性について」(講師：古賀博士、川崎重工業)に続き、建築鉄骨の新しい接合法の探索をテーマとして開催しました、第2回新技術探索セミナーの概要について報告します。

■第2回 新技術探索セミナーの概要

日時：2004年3月17日(水) 午後2時～4時

場所：鉄鋼連盟 第4会議室(鉄鋼会館6階)

テーマ：「アモルファス接合について」

講師：高田 啓一

工学博士(東京大学)、住友金属工業 鋼板・建材カンパニー建設技術部長、1976年に東京大学工学部建築学科を卒業し、住友金属工業(株)総合技術研究所に入社、現在に至る。

講演概要：

1) アモルファス接合とは

近年、材料の接合技術において精度・性能の高度化、あるいは高能率化の観点から界面接合(ろう付けおよび拡散接合等、材料を面と面とで接合する方法)が注目されつつあります。その中で接合界面に低融点材料(アモルファス金属等)を挿入し、液層を形成して接合を行うものが液層拡散接合法であり、この手法に外力によるアプセットを付加したものがアモルファス接合です。アモルファス接合は、通常の溶接法に比べ加熱温度が低いため、母材の変形が小さく、溶接熱影響部の材質劣化が小さいだけでなく、比較的量産性に富んでいるという利点を有しています。

2) 接合原理

アモルファス接合は、アモルファス金属箔中の融点降下元素(ボロン等)の拡散現象を利用した、液層拡散接合法に分類されます。拡散接合の基本原理は、平滑かつ清浄な金属面同士を接触させ、接触面間に原子間引力が作用するまで原子を熱拡散によって密着させて接合するというものですが、現実の接合面はミクロ的な凹凸があり、かつ酸化被膜で覆われているため、健全な接合を得ることは容易ではありません。しかしながら、液層を介した場合、原始的なつながりが容易に起こり、拡散接合を比較的容易に行うことができます。

アモルファス接合の原理および接合プロセスを図1および図2に、接合システムの装置構成を図3に各々示します。被接合材より低い融点を有するアモルファス金属箔を被接合材端面間に挿入し、高周波誘導加熱装置により接合部をアモルファス金属箔の融点直上に加熱し、接合端面間の空隙を熔融金属で満たします(図1-第1段階)。その温度で一定時間等温保持する間にアモルファス金属中に含まれる融点降下元素(ボロン等)が母材中に拡散する為、熔融金属中の融点降下元素濃度が低下し(図1-第2段階)、それとともに熔融金属の融点が徐々に上昇します。融点降下元素濃度が凝固温度点にまで低下すると、熔融金属が等温凝固し接合が完成します(図1-第3段階)。

3) 適用事例

アモルファス接合の適用事例として鋼管および鉄筋の現場接合の事例を図4および図5に各々示します。アモルファス接合は、接合工程が自動制御されるため作業者の熟練性や技量を必要とせず、また、現場接合とする場合においても良好な継手性能を確保できることが、これまでの適用事例において確認されています。

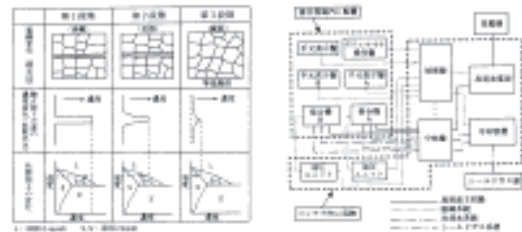


図1 接合原理

図3 装置構成



図2 接合プロセス



図4 鋼管接合への適用事例



図5 鉄筋接合への適用事例

所見：装置が大型であることや接合面の精度確保等の問題から、現状では適用範囲が限られますが、母材性能に頼り大入熱を許容するという、現在の建築鉄骨の溶接接合の技術開発のトレンドとは一線を画す接合法と言えます。建築鉄骨の新しい接合法としての界面接合の分野のさらなる技術開発に期待したいと思います。

(住友金属工業 建築技術研究室 北岡 聡)

「21世紀鋼構造フォーラム 第3回新技術探索セミナー」の開催結果報告

第3回新技術探索セミナーは、宇宙開発分野での材料利用をテーマに開催されました。第1回、第2回テーマの接合法とは対象が大きく異なり、我々鋼構造技術者が普段ほとんど聞くことが出来ないお話をお伺いすることが出来たと思います。以下に、第3回新技術探索セミナーの概要について報告します。

■ 第3回 新技術探索セミナーの概要

日時：2004年4月26日（月）午後2時～4時

場所：日本鉄鋼連盟 第1会議室（鉄鋼会館4階）

テーマ：「宇宙開発と材料について」

講師：山本 昌孝

工学博士、(独)宇宙航空研究開発機構 宇宙環境利用センター 主任研究員、1965年千葉工業大学を卒業し、同年東京大学生産技術研究所入所、1981年宇宙開発事業団入社

講演概要：

1) 宇宙開発の歴史

宇宙開発は、1950年代に旧ソ連と米国により始められました。1960年代に入ると宇宙開発の大開拓時代に入り、ガガーリン（ソ連）の宇宙飛行、アポロ11号（米国）による月面着陸など、めざましい進歩を遂げました。その後、競争から国際協調による時代となり、スペースシャトルが登場し、ハッブル望遠鏡の打上げや宇宙ステーションの建設開始など、宇宙環境を利用する時代へと突入しています。

日本でも、1969年の宇宙開発事業団設立からロケット及び人工衛星の開発が行われています。

2) 宇宙開発の現状

日本の最新型ロケットは、H-IIA型と呼ばれ、全質量285ton、全長53m、衛星等の積載荷重2tonとなっています。全質量の内訳は、躯体が約10%、残りは全て燃料です。この10%を軽量化するために、新しい材料や形態の開発がされています。

人工衛星は、打上げ時にはコンパクトに折りたたまれ、宇宙空間で大きく太陽電池パネルの羽を開く構造となっています（図1、図2）。ロケットの積載荷重に納めるため、徹底的な軽量化が図られています。

15カ国が参加した国際協力プロジェクトとして、国際宇宙ステーション（International Space Station：ISS）の建設が進められています。既に全体の約50%が完成し、大きさは110m×75m程度、全質量415ton、搭乗員数は最大7名となっています（図4）。

3) 宇宙開発の材料

宇宙構造物に要求される性能として、軽量性、稼働時の柔軟性、打上げ時の収納性、高い制御性、耐温度性、耐久性等があげられます。使われる材料は軽量化を図るため、必然的に比剛性、比強度の高いものが求められ、アルミ材やCFRP（カーボンファイバーに樹脂を含浸させたもの）、カーボンカーボン（CFRPに対し、蒸焼きと樹脂含浸を繰返

して作られたもの）などが主として使われています。国産ロケット H-II型では補助ロケットケースに高張力鋼が使われていましたが、最新型の H-IIA 型では CFRP に変更されています（図3）。スペースシャトルの表面材等には、セラミックタイルが使用されています。

4) 宇宙開発の展望

国際宇宙ステーション（ISS）は2010年までに完成させ、長期の宇宙飛行に関する医学・生物学の研究に重点を移していきます。スペースシャトルに変わる新しい有人探査機もその後実用化されて、2020年までには月に人類の拠点を築くことになる予定です。月に拠点を置くことは、宇宙探査の次のステップに向うことを可能にする意味があります。

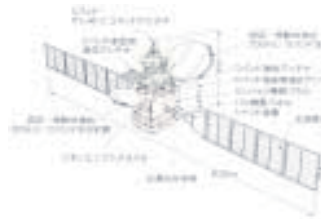


図1 人工衛星（軌道上）



図2 人工衛星（打上げ時）

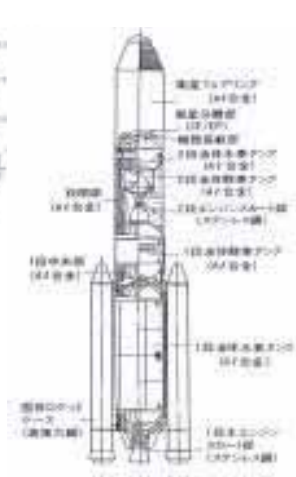


図3 H-IIロケットの材料



図4 宇宙ステーション完成予想図

所見：ロケット重量の90%が燃料で、本体は10%程度なのは驚きましたが、そのわずかな重量比の中で軽量化に鎊を削る宇宙技術者の姿勢に、建物重量の軽量化を目指し日夜努力する建築構造技術者として、共感を覚えしました。地球の内、外と活躍の場は違っていても、技術の基本は変わらないようです。宇宙分野では、鋼があまり使われていないとのこと。ちょっと残念でした。

（清水建設 構造設計部 斎藤 利昭）

「21世紀鋼構造フォーラム 第4回新技術探索セミナー」の開催結果報告

新技術探索セミナーでは、現在までに他分野での接合方法として2回、第3回では宇宙分野技術からの適用性についてセミナーが開催されました。第4回は、最近話題となることの多いガラスを多用した透明建築を題材に開催されましたので、概要について報告します。

■第4回 新技術探索セミナーの概要

日時：2004年6月7日(月)午後2時～4時

場所：鉄鋼連盟 804 会議室(鉄鋼会館8階)

テーマ：「特殊ガラス構法の変遷と今後」

講師：松延 晋

日本板硝子D&Gシステム 営業部開発営業グループ次長、1987年に東京理科大学工学部建築学科を卒業し、日本板硝子(株)に入社、現在に至る。

講演概要：

1) ガラスに関する基礎知識

板ガラスは主にシリカ(珪砂)から成り、耐熱機器に使用する場合や工芸品として使用するものは、その組成も異なっています。ガラスの製造法の内、一般的なフロート法には、約800mの製造ラインが必要で、その内、徐冷部分に500～600mの長さが必要となります。ガラスの加工法は、素板(もといた)のまま使用する場合と、素板を「合わせ」で使用する場合、断熱性を高める目的でガラス表面を「コーティング」や「複層」で用いる場合、素板に焼き入れを行って強度を高めた「強化」があります。

2) 80年代までのカーテンウォール

30年代ニューヨークに現れた第一世代超高層ビルは、現代建築の構造と古典のファサードが融合したものとと言えます。第二世代は、第二次大戦後に現れ、モダニズムの基本となったガラスカーテンウォール(以下、G.C.W)初期の超高層です。この世代の超高層ビルでは、G.C.Wを用いることで単調なデザインに成りがちな欠点を克服するために、建物全体の形状変化、多色のガラスを使用、古典的デザインをガラスで表現する方法などが用いられました。

3) 90年代の特殊構法

90年代に入るとフォスター、ロジャース、ピアノなどのヨーロッパの建築家により、特殊なガラス構法を用いた建物が現れるようになりました。

一方、日本では昭和45年(1970年)の大阪万博後、強化ガラスを使って特徴的なガラスファサードを持つ建物(写真1,2)が現れましたが、残念なことにガラスの破損事故やオイルショックを迎え、技術的進歩が停滞してしまいました。しかし、そのまま日本で開発が進んでいけば、世界のガラス技術をリードできたとの話もあり、興味深く拝聴しました。

90年代に多く現れた、ガラス自体に孔を開けてボルトを留める技術も、70年代後半にスカッシュコート(壁面にガラスを用い、接合部を皿孔により平滑に仕上げる技術から

発展しています(写真3,4)。日本でもオイルショック以降、開発が停滞していたガラス支持特殊構法が90年代に競って開発されました。

4) 近年ヨーロッパの状況

現在では、東西合併後のドイツに多くの注目すべきガラス建築や自然エネルギーを積極的に利用したエコロジカル建築が見られます。また、多重曲面のファサードや非透過材を覆う半透明スキンを持つ建物もヨーロッパ各地に見受けられるようになりました。

ヨーロッパで展開される最先端のガラス技術から、今後のガラス工事に求められる技術として、①多重曲面への適用、②他種類のガラスの使用、③光学的特性の把握、④力学的な適用の複雑化が上げられています。

5) ガラスの構造的用途

最後に、ガラスを積極的に構造要素として用いる国内の最新事例紹介がありました。

表1 ガラス建築を考える上で重要な建築物

年代	建築物	キーワード
1930年代	クライスラービル、エンパイーステートビル、ロックフェラービル	アールデコ、石、剛構造、金属板
1948～1970年代	レイクショアドライブ(ミス)	鉄とガラスのカーテンウォール
	国際連合	39階建てガラス建築
	シーグラムビル(ミス)	ハイ・モダンの最高傑作
	ジョンハンコックセンター(ペイ)	ガラスカーテンウォール
1990年代	ホンピドーセンター(ピアノ/ロジャース)、香港上海銀行(ロジャース)	ハイテク建築家の登場
	ループル美術館/ガラスピラミッド(ペイ)、アラブ・世界研究所(ヌーベル)	斬新なガラス・ファサードへ
	ラ・ビレット科学産業館(写真5)	ガラス特殊構法
	関西国際空港	建設市場の開放 海外デザイナー流入
2000年代	ソニーセンター(ヤーン)(写真6)、タイムランティ(ピアノ他)(写真7)、国会議事堂(フォスター)、Klantzlerビル(ヤーン)	ベルリンのガラス建築群
	RWE本社ビル(フォーフェン)(写真8)、ホストター(ヤーン)(写真9)	ドイツを代表するエコロジカル建築
	スイス本社ター、大ロンドン庁舎、タープレイスビル(フォスター)	ロンドンの再開発ビル
	大英博物館グレイコート(フォスター)、DB銀行、グッゲンハイム美術館(ケイリー)(写真10)、パレンシア科学未来都市(カトラハ)(写真11)	多重曲面のファサード
	ブレゲンツ美術館(スントール)(写真12)、クルサールホール(モネオ)(写真13)	半透明スキン

所見：日頃、設計者と建物のファサードを考える時に、外力や保有すべき性能ばかりに構造設計者の話題の中心になりがちだが、今回のように学生時代に戻った気分でお聴きした最新建築デザイン動向も視野に入れた上で、設計を進められれば、さらに良い設計に繋がるのではと感じた。

(日建設 構造設計室 小野 潤一郎)



写真1 広島バスターミナル



写真2 鶴屋デパート

日本の特殊構法の初期



写真3 スカッシュコート



写真4 取付け詳細



写真8 RWE 本社ビル



写真9 ポストタワー

ドイツを代表するエコ建築



写真10 グッゲンハイム美術館



写真11 バレンシア科学未来都市

多重曲面のファサード



写真5 ラレット化学産業館

特殊ガラス構法競争時代



写真12 プレグンツ美術館



写真13 クルサーールホール

半透明スキン



写真6 ソニーセンター



写真7 ダイムラーシティ

ベルリンのガラス建築群

「21世紀鋼構造フォーラム 第5回新技術探索セミナー」の開催結果報告

建築分野における鉄鋼材料の新しい地平を開くため、建築以外の分野での新技術についてセミナーを開催しています。第5回は、製缶に於ける加工・接合技術をテーマとしました。その概要を以下に報告します。

■第5回 新技術探索セミナーの概要

日時：2004年7月30日（金）午後2時～4時

場所：鉄鋼連盟 804 会議室（鉄鋼会館8階）

テーマ：「製缶分野におけるプレス加工技術と材料について」

講師：只木 康文

東洋製罐株式会社 開発本部メタル容器開発部 主任部員

講演概要：

1) 飲料缶の構成と加工

食品や飲料用の缶は、大きく3ピース缶（胴部と頂、底部のふたの三部品から成る缶）と2ピース缶（胴底部と頂部ふたの二部品から成る缶）の二種に分けられます。（図1）

3ピース缶は、まず平板を筒状に丸め、電気溶接ないし接着によって胴部を形成し、これに頂部、底部ふたを二重巻き締めで固定して製造します。

これに対して、2ピース缶では、胴底部を一体成形します。この方法の一つが「ドロー・アンド・アイアニング」（Draw and Ironing）であり、この方式による缶を「DI缶」とも呼びます。概略円形の平板をプレス加工によりカップ状に成形した後、リドロー・アイアニング工程で、クーラントを噴射しながら同カップを押し出しつつ、外周部をしごき延ばし、薄肉一体の胴底部を形成します。（図2）これに表面印刷や内面コート、さらにフランジ加工を施し、内容物充填後、頂部のふたを二重巻き締めにより固定します。



図1 飲料容器の種類

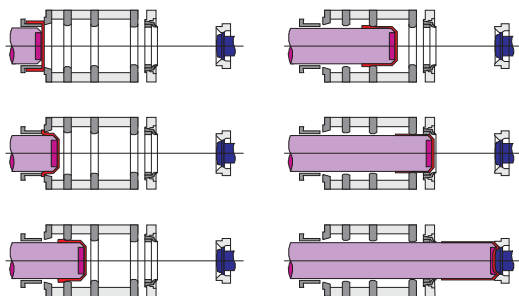


図2 リドロー・アイアニング工程

2) TULC 缶の構成と加工

TULC 缶は、東洋製罐の独自製品の名称で、缶金属の内外表面にポリエステルフィルム（PET）をラミネートした2ピース缶を指します。ラミネートは原板時に行われ、以後DI缶とおおむね同様に加工されますが、DI缶と異なる点は、フィルムが加工潤滑の役割を果たすため、工程中のクーラントが不要となることです。

また、PET 層を多層化し、金属材料内の介在物を減ずることで、更なる薄肉化や、リシール缶（図3）のようなきわめて複雑な形状への加工が可能となっています。



図3 リシール缶の成形プロセス

3) ダイヤカット缶の構成

ダイヤカット缶（図4）は、陰圧缶（コーヒーのように高温殺菌処理のため製品内部圧が大気圧より低くなる缶のこと。ビールなどの発泡飲料の缶は陽圧缶と呼ぶ）の胴部の板厚をさらに減じつつ強度を上げるための工夫として研究されました。これは菱形の折目を胴部中央に付与するもので、外気圧等によるへこみや潰れに抵抗します。同じ形状を陽圧缶に利用すると、開缶に伴う減圧によって缶の形状が変化します。これが商品価値となって、現在市場に出回っています。



図4 ダイヤカット缶

所見：日常目にしてている缶を改めて眺めてみますと、すばらしい薄板加工技術が凝縮されていることが分かります。建築の骨組構造とは、技術のあり方が全く異なる分野に見えますが、鉄を様々な形状に魔法のように変えてしまう手腕は、もしかしたら建築における薄板加工／接合技術のあらたな地平の展開に役立つのかもしれない。

（三重大学工学部助教授 富岡義人）

「21世紀鋼構造フォーラム 第6回新技術探索セミナー」の開催結果報告

「21世紀鋼構造フォーラム」WG3による新技術探索セミナーは第6回を迎えました。今回のテーマは、形状記憶合金です。知っているようでよく知らない形状記憶合金について、その特性から身近に見られる応用例まで、当日は実物によるデモンストレーションを交えてご紹介いただきました。以下に概要を報告します。

■第6回 新技術探索セミナーの概要

日時：2004年9月10日（木）午後2時～4時
 場所：日本鉄鋼連盟 第1会議室（鉄鋼会館4階）
 テーマ：「形状記憶合金の特性とその用途」
 講師：森井 浩一

大同特殊鋼株式会社技術開発研究所電磁材料研究部機能性材料研究チーム長。'91年筑波大学大学院博士課程工学研究科修了、同年に同社入社。現在、機能性金属粉末の開発、Ti-Ni系形状記憶合金の新規用途開発を担当。

講演概要：

1) 形状記憶合金とは

形状記憶合金(以下 SMA)の主な性質としては、名前のとおり形状を記憶する性質のほか、超弾性(擬弾性)と呼ばれる性質があり、この2つの性質が用途に応じて利用されています。形状記憶とは変形した合金に熱を加えると元の形状に戻る性質のことを言い、超弾性とは見かけ上の弾性限界を超えて変形させても力を除くと元の形状に戻る性質を言います。(図1)

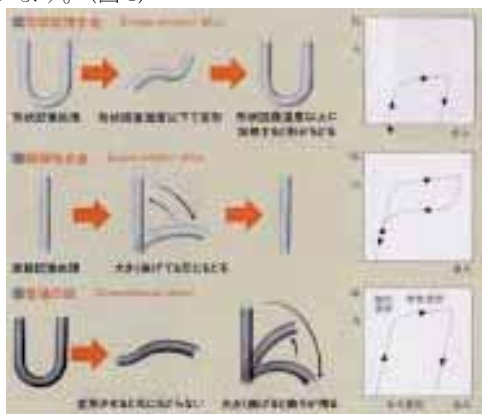


図1 形状記憶合金の性質

SMAの2つの性質については、図2のように説明されま。横軸が温度、縦軸が応力です。形状記憶については、常温で左下の図の状態にあります。応力を加えると左上の図のように原子の配列が変化することによって巨視的に変形し、力を除いても残留変形が残ります。ここで熱を加えて温度を上げると、予め記憶させてあった形状に戻ります。この過程でマルテンサイト相(面心立方格子)と呼ばれる状態から母相(体心立方格子)と呼ばれる状態に変化しています。形状が回復した段階で常温に戻すと、見かけ上の変形を生じることなく、マルテンサイト相に戻ります。一方、超弾性については常温で右下の図の状態にあります。

応力を加えると母相からマルテンサイト相に変化することで変形を生じますが、力を除くと母相に戻り、残留変形が残りにません。

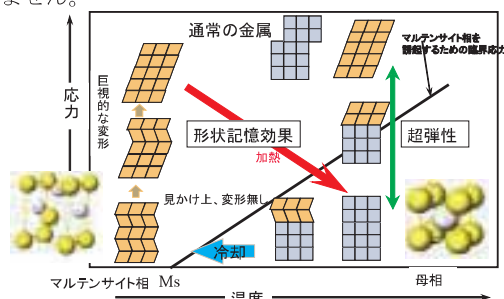


図2 形状記憶効果・超弾性のしくみ

形状記憶や超弾性の特性は、合金の組成、冷間加工率、形状記憶熱処理条件、使用条件などによって左右されます。0.1%の組成変動により、形状回復の終了する温度Afが10℃も変化するため、SMAの製造には厳密な組成管理が必要となります。Ti-Ni合金では、Af=20~100℃程度で、この温度の範囲で利用されています。

2) 形状記憶合金の応用例

形状記憶効果を応用した代表例としては、温水-冷水混合栓温度調整バルブがあります。図3に示すように、SMAでできたコイルばねと通常のばねとを組み合わせた機構により、温度に応じて温水と冷水を調節するものです。普及した理由としては、システムとしてコンパクトになり電気的な動作より有利であること、温和な環境(0~100℃)であることなどが挙げられます。

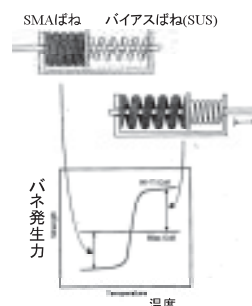


図3 利用形態

超弾性の性質を応用した例としては、携帯電話用アンテナ、眼鏡フレーム、ブラジャー用のワイヤー、医療用のカテーテルガイドワイヤーなどがあります。残留変形が残らないことも重要ですが、いずれも大きな変形にすなやかに追従することによる使用性(使用感)の向上がSMAを採用する大きな理由のようです。その他、建築構造への応用を検討した例¹⁾等が紹介されました。

所見：現状では非常にコンパクトなサイズでの利用に留まっていますが、形状記憶と超弾性という興味深い性質を利用することによって、例えば全く新しい鉄骨接合法などが考えられるかもしれません。

(国土技術政策総合研究所 石原直)

参考文献

- 1) 例えば、福田、北川：高知能建築構造システムに関する日米共同構造実験研究 (その26) Ni-Ti系形状記憶合金の圧縮引張特性、日本建築学会大会梗概集、B-2、p.233、2001.9

「21世紀鋼構造フォーラム 第7回新技術探索セミナー」の開催結果報告

「21世紀鋼構造フォーラム」WG3による新技術探索セミナーも7回目を向かえ、今回が最終回となりました。最後のテーマは、他分野における接着技術の探索です。以下に第7回新技術探索セミナーの概要について報告します。

■第7回 新技術探索セミナーの概要

日時：2004年10月14日（木）午後2時～4時

場所：鉄鋼連盟 706会議室（鉄鋼会館7階）

テーマ：「接着について」

講師：杉田 博

コニシ株式会社 浦和研究所 研究開発第4部リーダー。
1988年に日本大学大学院理工学研究科工業化学科を卒業し、コニシ株式会社に入社。浦和研究所、大阪研究所を経て、現在に至る。

講演概要：

1) 接着技術の変遷

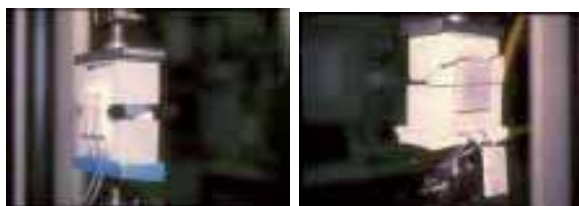
接着の歴史は古く、紀元前2000年頃には、すでに漆を用いた接着が使われていました。また日本では、平安時代に、米糊、漆喰、膠を用いた接着が使われていました。近年用いている接着では、接着テープが1930年に、エポキシ樹脂接着剤が1950年にそれぞれ実用に至っています。接着を成功させるためには設計の段階から「接着の要素」と呼ばれる接着の原理、接着する物質の表面状態および接合方法、および接着後の使用環境を十分に吟味し、接着剤を決定することが大切です。また、環境問題がクローズアップされてきた昨今では、リサイクル問題も含めた接着剤、接着工法の開発が求められています。

2) 接着の原理と分類

接着の原理は、大きく分けて機械的結合、水素結合、化学結合に分類されます。また接着は、材料(主成分)による分類、硬化方法及び形態(性状)による分類、接着強さにより分類できます。現在使われている接着剤は、エポキシ系、アクリル系、変成シリコン系、ウレタン系およびホットメルト系等が一例に挙げられます。(表1)

3) 接着における留意点

ものものを接着する場合、最も留意しなければならないものに接着面にかかる応力を如何に回避するかということが挙げられます。これには弾性タイプの接着剤が有効であることがわかっています。また、接着したあとの耐久性についても考慮しておかなければなりません。



変形に追従する弾性タイプ 追従できず破壊した硬質タイプ

図1 接着剤の変形追従性

4) 分野における接着の適用

現在の接着技術は各分野で活躍しています。建築分野では耐震補強工事で用いるあと施工アンカーや、カーボン繊維補強に、エポキシ系の接着剤が適用されています。また、カーテンウォールやガラスサッシの目地には、ムーブメント吸収とシーリングを兼ねた接着剤として、変成シリコン系が適用されています。さらに、自動車関連、半導体素子、液晶ディスプレイ、音響機器(磁石の接着)、ゴルフ道具、航空宇宙関連、システムキッチンなど、様々な分野で適材適所に各種接着剤が適用されています。

表1 各種接着剤の特徴

	接着剤	長所	短所
熱硬化型	エポキシ系	接着剤の中では高強度であり、実績がある 硬化収縮が比較的小さい 耐水性が比較的良好	アミンは皮膚刺激性があり、エポキシは変異原性物質である 低温で硬化が著しく遅延する 紫外線に対する耐候性が悪い 弾性率が高いので、変形追従性が低い
	アクリル系	広範囲の接着性がある 低温でも硬化が速く、弾性を維持 或る程度の油面でも接着することができる	金属を腐食する場合があります 硬化収縮が大きいので、薄い金属を接着することがある 主成分はアクリルモノマーなので異様な臭気があり、これは劇物に相当する 嫌気性硬化型なので、はみ出した部分や酸素を通す多孔質の場合は硬化しない
	変成シリコン系	人体に対する毒性は比較的マイルド 低温でも弾性を維持 広範囲な接着性	一液の場合は硬化のために湿気が必要である 比較的耐水性が低い
	ウレタン系	原料が比較的安価 比較的広範囲のものに対して接着性がある	耐アルカリ性が悪い 硬化剤のイソシアネートには毒性がある 材料によっては発泡することがある 一液の場合は湿気が供給されないと硬化しない
熱可塑型	接着剤が冷却すれば硬化するので作業時間が短い 溶剤のような揮発成分がないため、安全性が高い	独自のアプリケーションが必要 被着体への濡れが完全でない間に硬化するため、投锚効果が期待できない	

所見：他の工業分野では例外なく接着技術が適用されている中、建築鉄鋼に関しては、難接着金属(表面処理)、コスト、接着後の非破壊検査、耐火性能など、高いハードルをクリアしなければならないことから、殆ど適用されていません。しかし、ちょっとした発想の転換や発見により、将来的には建築鉄骨加工に広く適用されるのではないかと、という印象を受けました。

(日本設計 構造設計部 荻野 雅士)

4.4 独立研究テーマ

- ①鉄鋼薄板材料を用いた鋼構造建築物の開発及びその設計技法に関する研究
- ②リユース可能な新しい鋼構造骨組システム
ーテーパーピンによるシアキーを用いたピン継手の提案と載荷実験ー

21世紀鋼構造フォーラムから、シンポジウム「21世紀、鋼構造技術は何ができるか」に提案された、アイデアの中から、具体化が比較的早く可能と思われる、

Bグループ

- ・着脱可能な接合部の探求
- ・次世代接合部を有するユニバーサル鉄骨架構

Cグループ

- ・スチールメゾンリー

を、21世紀鋼構造フォーラムから（社）日本鋼構造協会に移し、委員会を発足させた。

Cグループは、「鉄鋼薄板材料を用いた鋼構造建築物の開発およびその設計技法に関する研究」とし、2003年4月から2005年3月までの期間で、この提案のベースとなる、シートメタル構造を提案した、富岡義人三重大助教授を委員長に、新たに同協会で、委員を募集し、研究をスタートさせた。研究成果は、「鉄鋼薄板材料を用いた鋼構造建築物の開発およびその設計技法に関する研究」報告書（2005年3月）にまとめている。

一方、Bグループの提案は、同協会の「鋼構造建築物の循環使用を視野に入れた構築手法に関する小委員会（リユース委員会）」（委員長：松村秀一東京大学助教授）傘下のワーキング「リユース可能な新鋼構造骨組システム検討ワーキング」（委員長：山田 哲東京工業大学助教授）に、提案者のひとりの、辻 聖晃助教授（京都工芸繊維大学）が加わり、始まった。結果は、同名報告書（2004年5月）にまとめている。

鉄鋼薄板材料を用いた鋼構造建築物の開発及びその設計技法に関する研究

(社) 日本鋼構造協会

鉄鋼薄板材料を用いた鋼構造建築物の開発とその設計技法に関する研究委員会

森野 捷輔 三重大学・委員長	富岡 義人 三重大学	川口 淳 三重大学
竹内 徹 東京工業大学	新谷 真人 (株) オーク構造設計	真瀬 伸治 清水建設 (株)
宮崎 賢一 (株) 竹中工務店	渡邊 秀仁 戸田建設 (株)	佐藤 鋭治 日鐵建材工業 (株)
穂苅 實 日鉄鋼板 (株)	原田 晶利 JFE 建材 (株)	沖 晃司 JFE 技研 (株)
川上 宏 (株) 神戸製鋼所	菅野 良一 新日本製鐵 (株)	清水 秀夫 住友金属工業 (株)・幹事
作本 好文 新日鐵製鐵 (株)・オブザーバー	矢部 喜堂 清水建設 (株)・オブザーバー	久保 久志 三重大学大学院・研究協力者

キーワード：鉄鋼薄板材料 モノコック構造 立体構造板 形態の多様性 多層性 環境制御

1. はじめに

(独) 建築研究所、(社) 日本鉄鋼連盟(以下、鉄連)、(社) 日本鋼構造協会 (以下、JSSC) によって、2001年に設置された21世紀鋼構造フォーラム、Cグループの提案のひとつとして、鉄鋼薄板材料を利用したモノコック構造物が提案された(注1、注2)。2003年9月、鉄連からの研究委託に基づき、JSSCに「鉄鋼薄板材料を用いた鋼構造建築物の開発及びその設計技法に関する研究委員会」が設置され、2005年3月までを目処として、研究を進めてきた。本報告は、同委員会におけるこれまでの研究の概要をまとめたものである。

2. 研究の目的

本研究は、鉄鋼薄板材料を加工して、剛性の高い立体構造板を形成し、これを用いて鋼構造建築物を形成する可能性を幅広く検討するとともに、新たなプロトタイプの開発、及びその設計技法の開拓を目標とするものである。

3. ワーキンググループの構成

本研究は、研究分野が多岐にわたるため、表1のようにワーキンググループを設け、分担して研究を行っている。

表1：細分研究テーマとワーキンググループ分担表

ワーキンググループ名称	研究項目		分担	
			業界	担当者名
加工・生産ワーキング	1. プレス加工要素実験	1. 板厚一最大矢高関係 2. プレス径比一矢高関係 3. 曲面加工試作	鉄鋼 建材	菅野 沖 清水 川上 佐藤 原田 穂苅
	2. 嵌合接合	1. 工場加工方法 2. 現場加工方法		
	3. 嵌合接合実験	1. 試験体製作 2. 接合加工実験		
構造ワーキング	1. 実験	1. 嵌合接合部の試験 2. 部材試験 3. 加工硬化等ばらつき誤差試験	鉄鋼 大学 設計	富岡 川口 竹内 新谷 菅野 沖 渡邊
	2. 有限要素解析	1. 曲面モデリング 2. 応力分布・集中 3. 板厚・プレス径比一応力分布関係		
	3. 設計法	1. 段階的設計法		
空間ワーキング	1. 中規模空間	1. ヴォールト空間 2. ドーム空間	大学 設計	富岡 川口 竹内 新谷
	2. 小規模空間	1. ボックスカルバート 2. 集合住宅基本設計矩計		
構法ワーキング	1. 標準詳細作成	1. パネル相互接合部 2. 床一壁接合部 3. 基礎定着部 4. 開口部 5. 雑詳細	建設 建材	真瀬 宮崎 渡邊 佐藤 原田 穂苅
環境ワーキング	1. パッシブ	1. 断熱 2. 受熱 3. 蓄熱 4. 層厚構成	大学	富岡 川口
	2. アクティブ	1. ペルチェ・ヒートポンプ・パネル 2. ソーラー発電パネル 3. 層内換気制御		

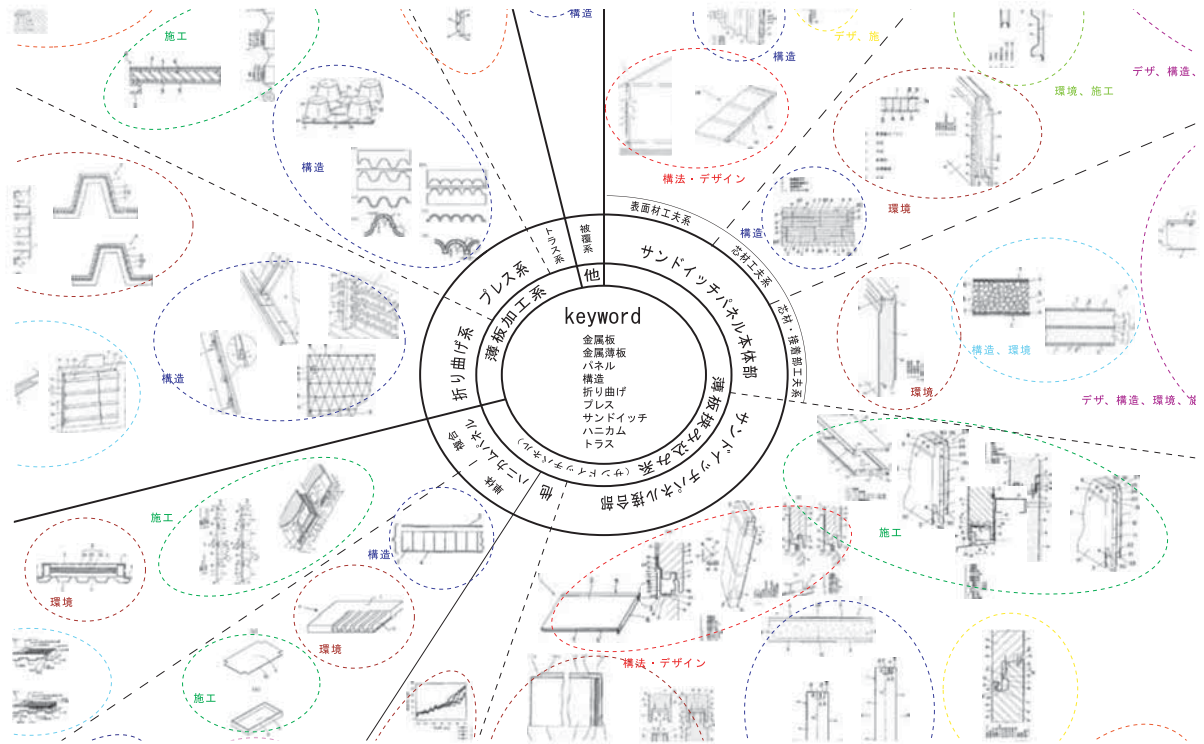


図1 建築の分野における鉄鋼薄板材料を扱った特許技術のスペクトラム

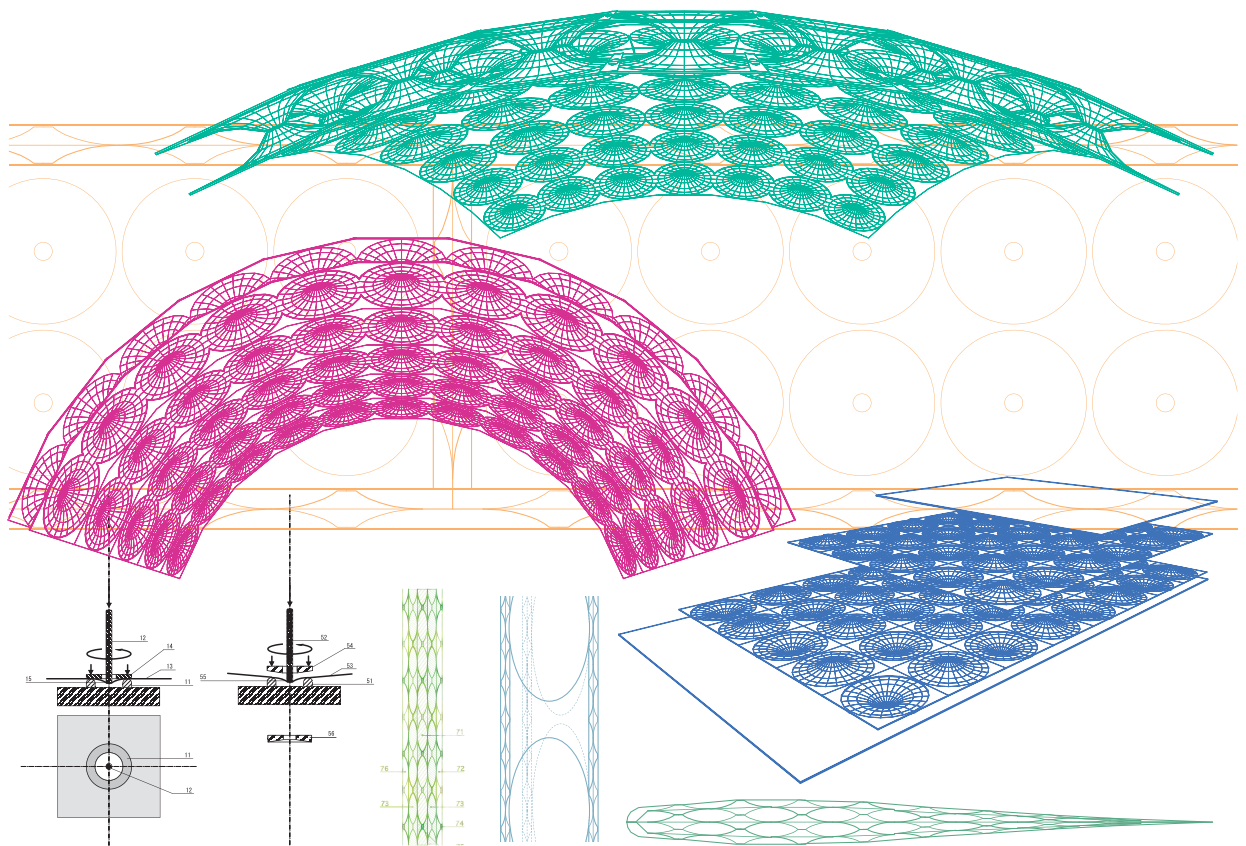


図2 立体構造板を利用した空間と架構及びその加工方法

4. 鉄鋼薄板構造に関わる

特許技術のスペクトラム

4.1. キーワードの設定、分析・チャート化

現在、鉄鋼薄板材料が、どのような分野で、またどのような用途で使われているかを把握するために、特許庁のホームページ（注4）で公開されている平成5年度以降の発明から鉄鋼薄板関連の技術検索を行った（2004年7月検索）。

その際、「(金属板 or 金属薄板 or パネル) and 構造 and (折り曲げ or プレス or サンドイッチ or ハニカム or トラス)」という9つのキーワードを用いた検索を行い、かつ建築の分野にしばり、ディテールなど細部に偏ったものを除いて、92件を選び出した。

これらを総覧して、大きく薄板挟み込み系、薄板加工系のカテゴリに分別し、さらに細分類を加え、チャート化したのが図1である。なお、各々の発明の技術目標を、デザイン・構造・環境・施工の4種のキーワードで図中に記した。

4.2. チャートから読みとられる事柄

チャートから、サンドイッチパネルに関する発明が全体の6割程度を占めており、内容もディテールに関するものが多く、活発な技術開発が行われてきたことを物語る。残りの4割は、薄板加工の新たな方向を目指す萌芽的なもので、多様なアイデアを含んでいるが、確立した技術とは言いがたく、発展の余地を大きく残している。

これらのアイデアは、大きく、1) ハニカム系、2) 折り曲げ系、3) プレス加工系に分けられる。ハニカム系、及び折り曲げ系の立体構造板は、モノコック建築物の外壁・屋根等に用いた場合、熱伝導の点で、大きな欠点が予想されることから、新たなプロトタイプ開発の材料として、図2に示すプレス加工系の立体構造板を取りあげることとした。（注3）

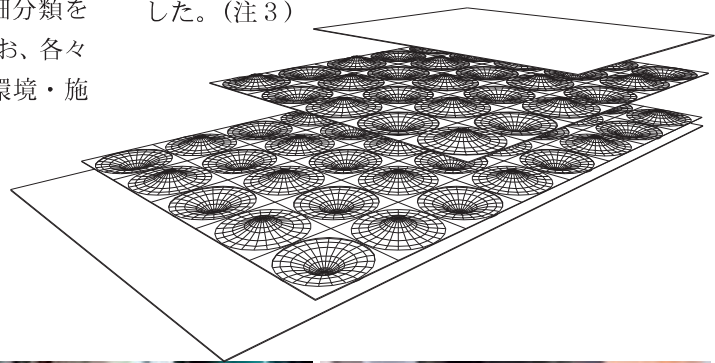


図3 縮小模型制作の加工方法

5. プレス加工

5.1. 縮小模型の制作実験

研究対象となった立体構造板は、円形開口部を持つプレス雌型と、雌型よりも径が小さい円筒形棒状プレス雄型との間に、薄板を挿入し、雄型を回転させながら雌型に貫入させることにより、円



図4 縮小模型で実現された多様な形態

錐状の突起接合部を形成し、これを相互に嵌合接合して形成されるものである(図3上段)(注3)。シェル面を多く含み、軽量でありながら剛性が高く、また、突起部の深さを変化させることで、自由な厚みや曲面が形成できるため、きわめて応用性が高い加工方法であると考えられる。

直径25mmの雌型を自作し、円筒形押し棒を有するボール盤に装着して、0.27mmの鉄板をプレス加工し、自作した嵌合工具により、これを相互に組み立てる方法(図3下段)で、様々な形状の模型制作実験を行った(図4)。

5.2. 実寸に準じたプレス加工実験と考察

縮小模型の制作実験での経験に基づき、実際の寸法に準じた200φの金型を試作し、0.5mm厚の表面処理鋼板を用いてプレス加工実験を行った(図5)。

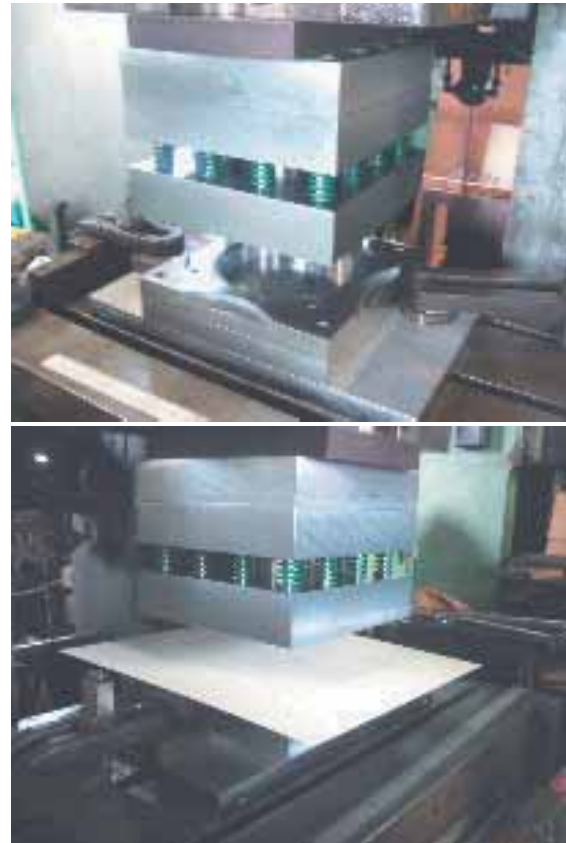


図5 実寸に準じたプレス成形金型

図6はこの結果を示す。突起部矢高が12mm以上になると、円錐形表面に折れ傷が入ることが確認された。この折れ傷は、鋼板周辺部をフランジ加工すると入りにくくなることから、プレス部分への周辺部引き込みによるものと考えられる。

板形状 プレス位置 DP (矢高)	CORNER打ち			CENTER打ち			
	加工なし	R加工	90° 曲げ加工	加工なし		90° 曲げ加工	
				中心穴なし	中心穴 10.4φ	中心穴なし	中心穴 10.4φ
DP=9.0mm							
DP=12.0mm							
DP=13.5mm							
DP=15.0mm							
DP=16.5mm							
DP=18.0mm							

折れ傷
 板の折れ傷なし

図6 加工実験試験体マトリックス

プレス加工系の立体構造板では、1枚の鋼板に連続して繰り返しプレス加工する技術の確立が重要であり、このためには、周辺部からの板の引き込みを起こさないようにする必要があることがわかった。現在、改良金型での実験を準備している。

6. 構造

6.1. 構造試験体の設計と実験計画

プレス部周辺を十分に拘束でき、加工実績のある既存の70φおわん型プレス金型を用い、構造試験体(曲げ・せん断・圧縮)を設計した(図7)。現在立案されている実験計画を表2に示す。

表2 基礎的力学性状を把握するための実験計画表

試験体名	载荷試験方法	層数(面材数)	载荷履歴	試験体サイズ(mm)
B-1-①	曲げ	1	単調载荷	500×1100×15
B-1-②				
B-3-①				
S-1-M-①	せん断	1	単調载荷	500×1100×15
S-1-C-①			繰返载荷	
S-3-M-①		3	単調载荷	500×1100×60
S-3-C-①			繰返载荷	
C-1-①	圧縮	1	単調载荷	500×1100×15
C-3-①		3		500×1100×60

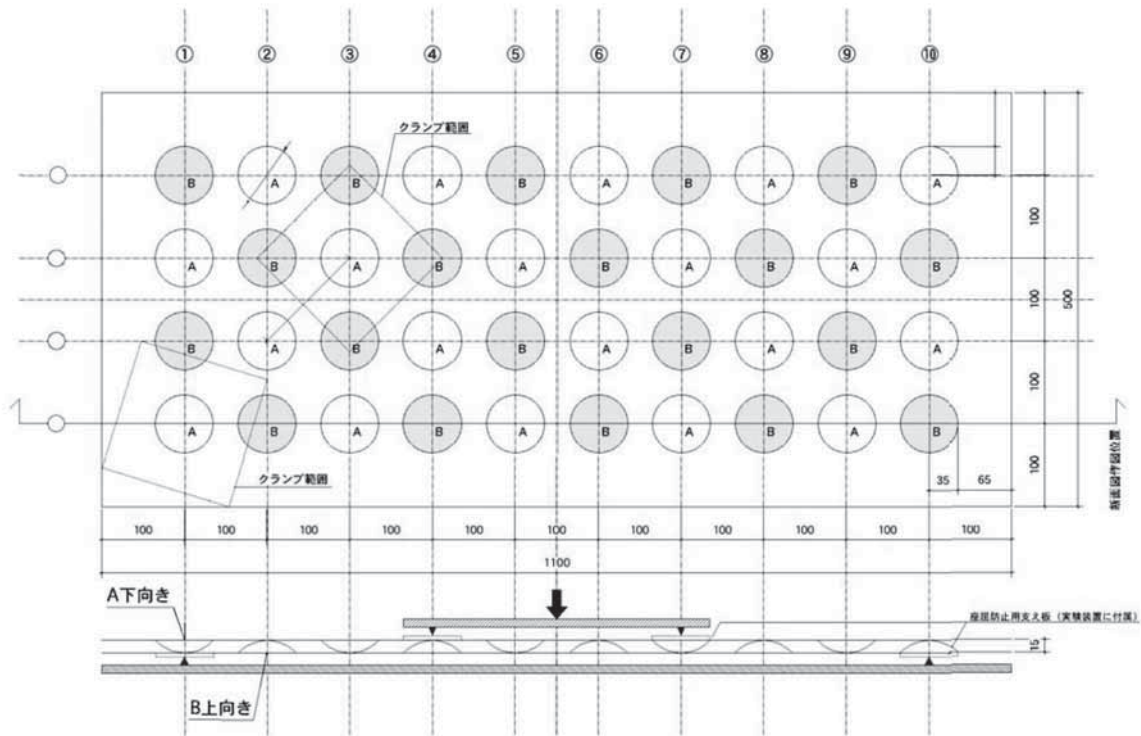
試験体名の凡例

B- 载荷試験方法
 B: 曲げ試験
 S: せん断試験
 C: 圧縮試験

1- 層数
 1: 1層(2枚)
 3: 3層(4枚)

M- 载荷履歴
 M: 単調载荷
 C: 繰返载荷

① 同一変数の試験体の一連番号



共通仕様					
ニップル径 (mm)	矢高 (mm)	ニップル数 (列)	接合方法	端部曲げ加工	材質・材厚
70	15	4×10	φ3. 2プラインドリベット締め	なし	建築用カラー鋼板 0.5mm

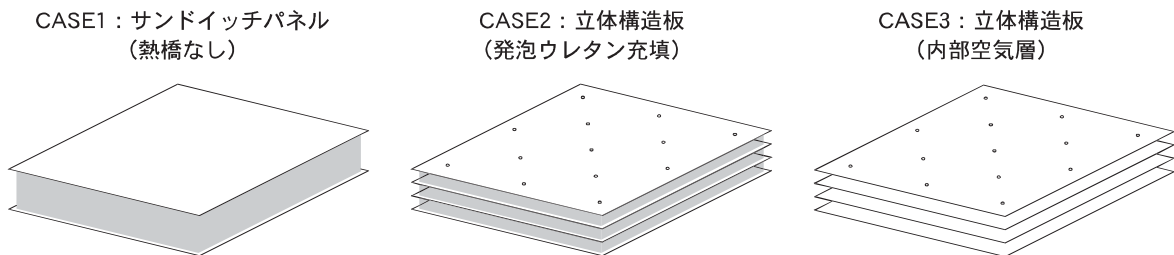
図7 70φおわん型構造試験体例 (曲げ試験体)

7. 熱環境

7.1. 熱橋効果の実験

折り曲げ系と比して、プレス加工系の立体構造板は、表裏金属同士が線ではなく、点で接合しているため、熱伝導率は比較的小さいものと考えられる。しかし熱橋が存在すること自体に変わりはなく、その効果の程度を知っておく必要がある。そのため、縮小模型を用いて、熱橋効果の測定実験を行った。

試験体は、3層4枚とし、内部にウレタンフォームを充填したもの (CASE2)、閉鎖空気層としたもの (CASE3) を制作した。また、比較対照のために、全体の層厚を同じにした単層サンドイッチパネル (CASE1) を制作した (図8)。



試験体寸法	試験体: 292mm×292mm、層厚: 14mm (t=0.27mmの鉄板使用)		
試験体名	CASE1	CASE2	CASE3
層構成	1層2枚	3層4枚	3層4枚
断熱材	スタイロフォーム	ウレタンフォーム	なし (閉鎖空気層3層)
熱橋	なし	あり	あり

図8 熱橋効果の測定実験に使用した試験体

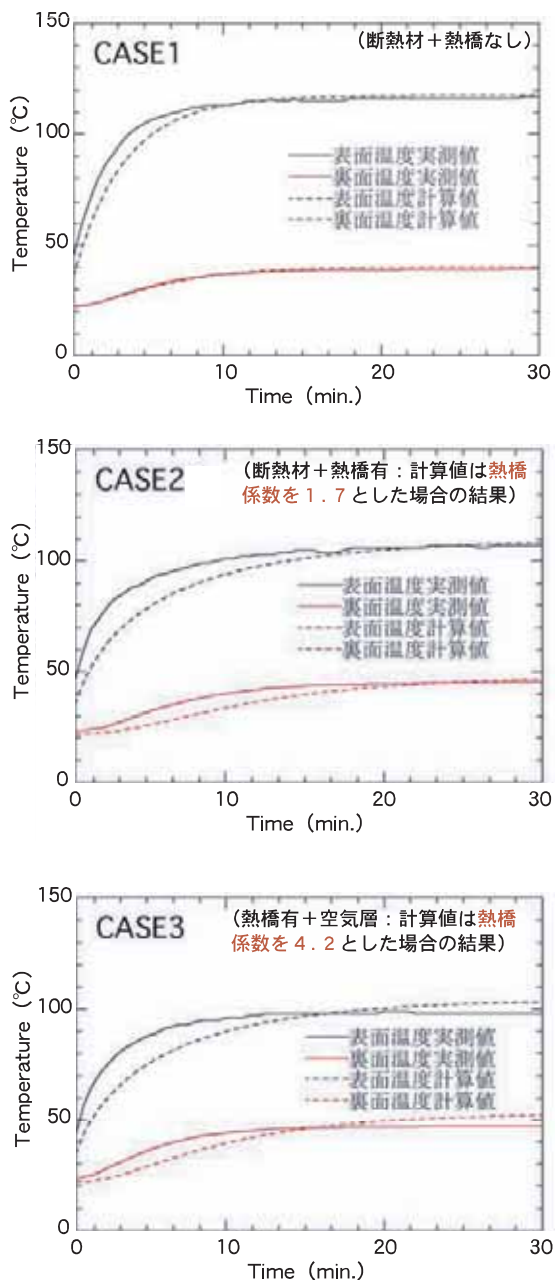


図9 測定値と熱抵抗推定による計算値との比較

実験方法は、それぞれの試験体の片側（白色側）を室外側とし、80Wの白熱電球により熱負荷を与え、30秒ごとに室内外両表面温度を測定した。その結果を、図9に示す。

この実験結果から、CASE2のウレタンフォームを充填した立体構造板の熱橋係数を推定したところ、1.7となった。サンドイッチパネルと比較しうる程度の性能を保つことが出来るものと期待される。

7.2. 熱交換パネルの設計

立体構造板の多層性を利用して、層内に断熱層や蓄熱層を形成し、ペルチェ素子（半導体ヒートポンプ）などを組み合わせることによって、能動的に室内環境制御を行うことが考えられる。

ペルチェ素子は、可動部分がなく機械的に単純であり、直流低電圧大電流で駆動されるので、太陽電池との相性がよいという特徴を持っている。また、極性を反転させることで熱流方向も反転するので、冷暖房の切換えも容易である。これまで鉄鋼材料の欠点と捉えられていた高い熱伝導性を逆手に取ったアイデアである。

以上の着想に基づいて、熱交換パネルを設計した（図10）。2行2列の突起接合部を持つ立体構造板の内部各層に、表面断熱層、空冷層、断熱層、蓄熱層等を配し、ペルチェ素子で熱交換を行うものである。この試験体を用いて、実験室内及び室外環境曝露実験を行い、実効エネルギー密度等の性能を把握する予定としている。

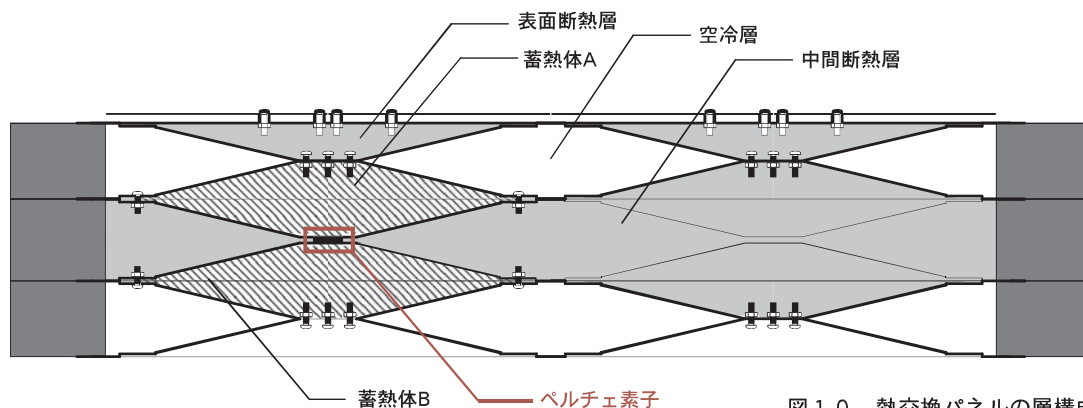


図10 熱交換パネルの層構成

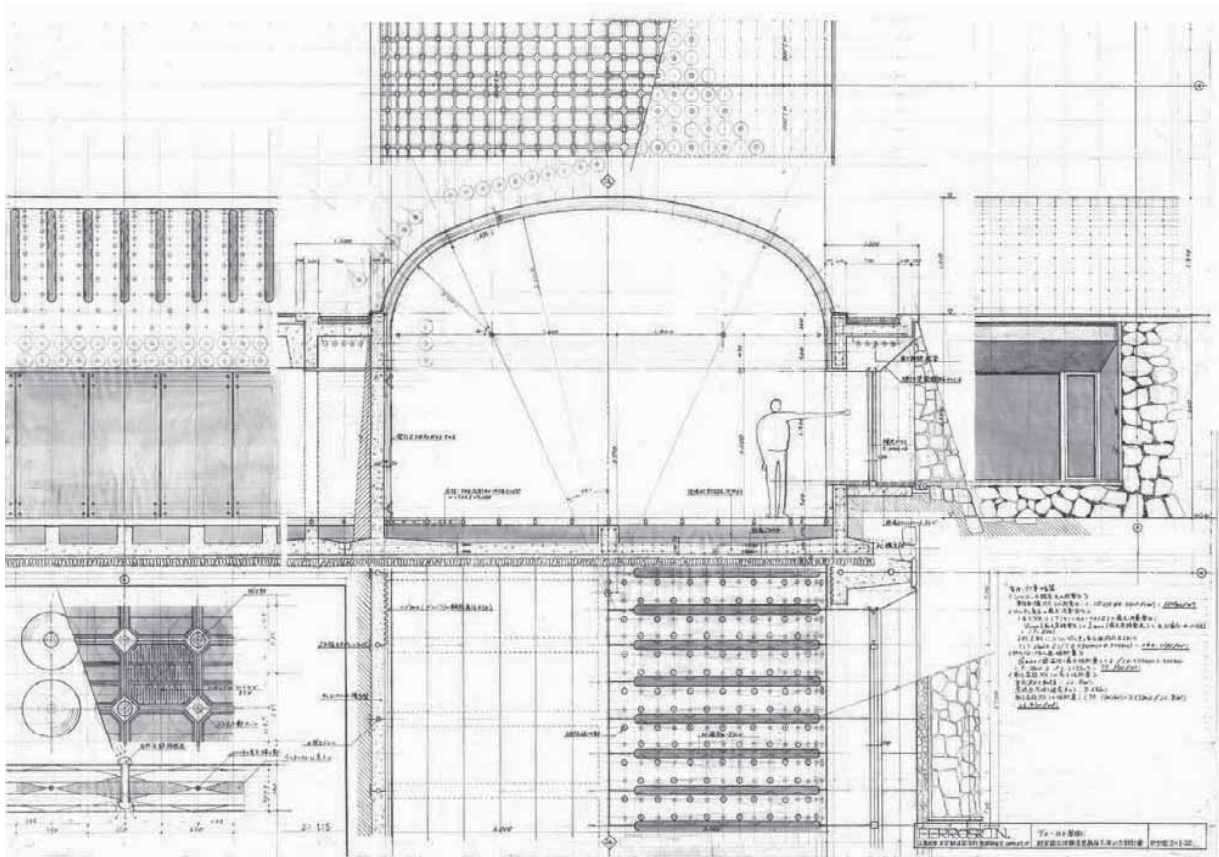


図 1 1 ヴォールト屋根に熱交換パネルを用いた設計案 矩計図

8. 設計案の作成

本研究の立体構造板の形態の自由度の高さを生かした設計案として、ヴォールト屋根に熱交換パネルを用いた設計案を作成した（図 1 1）。

9. 今後の展望

以上研究の概要を報告した。各ワーキンググループごとの今後の展望を下記に示す。

加工・生産ワーキング：

引き続きプレス加工実験を行い、加工技術の基本的要件を探る。

構造ワーキング：

70φおわん型プレス試験体の曲げ試験・せん断試験・圧縮試験により、この形式のパネルの基本的力学性状を知る。

空間ワーキング：

ボックスカルバート、ドーム形状等の建物の試験設計を行う。

構法ワーキング：

パネル相互結合部／床壁接合部／開口部などの各部標準詳細を検討する。

環境ワーキング：

熱交換パネルを制作し、実験により、実効エネルギー密度・効率を探る。

平均層厚構成モデルの定常解析で、熱効率が良好となる設計条件を知る。

10. 謝辞

三重大学永井久也助教授には熱橋係数の解析について助力をあおいだ。記して感謝申し上げる。

注：

注 1) 産業用建築物ユニットのスタディ、21世紀鋼構造フォーラム・シンポジウム「21世紀、鋼構造技術は何ができるか」、(独) 建築研究所、(社) 日本鉄鋼連盟、(社) 日本鋼構造協会、pp.19-20、2002.11.

注 2) 「トラス状成形金属板の箆合接合方法およびその立体構造金属板」、出願者：(株) 三重 TLO、特願 2002-265367、特開 2004-100326.

注 3) 「立体構造金属板及びその加工方法」、出願者：(株) 三重 TLO、特願 2003-418915.

注 4) 特許電子図書館、<http://www.ipdl.jpo.go.jp/homepg.idol>

リユース可能な新しい鋼構造骨組システム

- テーパーピンによるシアキーを用いたピン継手の提案と載荷実験 -

辻 聖晃¹, 桑原 進², 関 光雄³, 山田 哲¹

リユース
シアキー

ピン継手
柱継手

載荷実験
嵌合接合

1. はじめに

2002年11月に開催されたシンポジウム「21世紀、鋼構造技術はなにができるか」において、21世紀鋼構造フォーラム B グループにより「次世代接合部を有するユニバーサル鉄骨架構 (NUS 架構)」の提案がなされた¹⁾。NUS 架構は、リユースの容易さを主たる目的としており、そのために柱ユニットと梁ユニットを嵌合により接合して骨組架構を構成している。また、21世紀鋼構造フォーラム WG1 による本シンポジウム技術特別セッションにおける発表²⁾でも、柱同志の接合継手を嵌合形式とする、リユースを前提とした新しい鋼架構システムが提案されている。

NUS 架構に限らず、鋼部材の (リサイクルではなく) リユースを促進するためには、設計用荷重の作用下では外れることなく、かつ、分解時には部材を損傷させることがない継手・仕口の開発が必要となる。

柱同志の継手は、一般にフランジ・ウェブともに溶接あるいはボルト接合を行う剛継手とすることが多い。しかしながら、柱継手は一般に柱の中間部分に設けられることが多いため、継手部分に作用する曲げモーメントは、柱に生じる最大の曲げモーメントに比べればずっと小さい。したがって、柱継手に嵌合形式の接合方法を採用する場合に、より容易に施工と分解が可能であると思われるピン継手を採用したとしても、外力に対する骨組の挙動には大きな影響を与えないと予想できる。弾性骨組を対象としたケーススタディーでは、柱継手をピン継手とすることで、剛継手とした場合に比べて水平変形の増大、低層階梁部材の曲げモーメントの増大といったデメリットは生じるものの、柱および梁に生じる最大モーメントが減少するという利点も得られることが明らかにされている³⁾。

そこで本研究では、リユース型の低層鋼架構システムにおける柱・柱接合仕口として、施工・分解が特に容易であり、なおかつ、せん断力と圧縮軸力に

対しては十分な抵抗性能を持つようなピン継手の提案と、性能確認のための載荷実験を行う。

2. シアキーを用いたピン継手の提案

2. 1 ピン継手に要求する性能

リユース型の架構に用いられるピン継手は、次のような性能を有することが望ましい。

- (i) 製作が容易であること
- (ii) 施工および分解が容易であること
- (iii) できるだけ軽量であること
- (iv) 地震時に継手部が無損傷、あるいは、損傷が生じるとしても容易に交換可能な構成要素に限られること
- (v) 継手部はできるだけ理想的なピンに近いこと
- (vi) 十分なせん断力の伝達能力を持つこと

また、低層鋼骨組の柱継手を対象とすることを考慮して、引き抜き力に対する抵抗能力はピン継手には期待しないこととする。

以上の要求性能を勘案して、本研究ではテーパーピンをシアキーとし、リングプレート (座金) を継手回転のクリアランスの確保に利用するピン継手を提案し、その載荷実験を実施する。載荷実験の主たる目的は、上記の要求性能の(iv)~(vi)が提案する継手で確保できるかどうかを検証することにある。

2. 2 シアキーを用いたピン継手

本研究で提案するピン継手の組み立て図と断面図を図 1に示す。このピン継手は、柱脚側の柱端に溶接したエンドプレートに側面がテーパーとなった円孔を開け、その円孔にちょうど収まるように製作したテーパーピンをせん断力に抵抗するためのシアキーとして落とし込み、座金となるリングプレートを介して、柱脚側と同様の端部を有する柱頭側の柱を落とし込むことで構成されている。

このピン継手が軸力と曲げを同時に受けた場合、図 1の断面図にも示したように、座金の一端を回転中心として柱頭側の柱と柱脚側の柱に相対的な回転が生じることになるため、この継手部の回転に伴う継手部分の浮き上がり、座金とエンドプレートの

接触部への応力集中が予想される。載荷実験では、この浮き上がり、座金およびエンドプレートの損傷、および、テーパピンの損傷についても観察することとする。

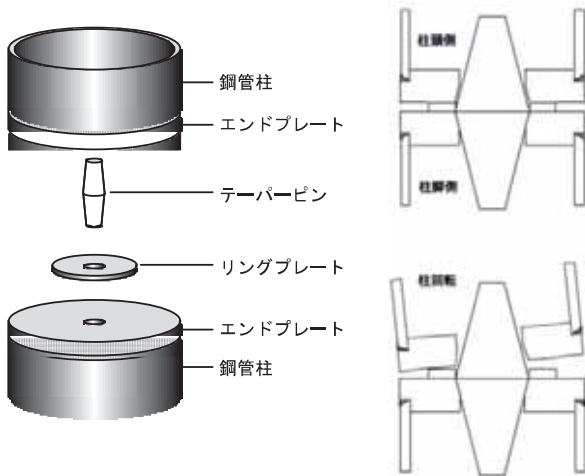
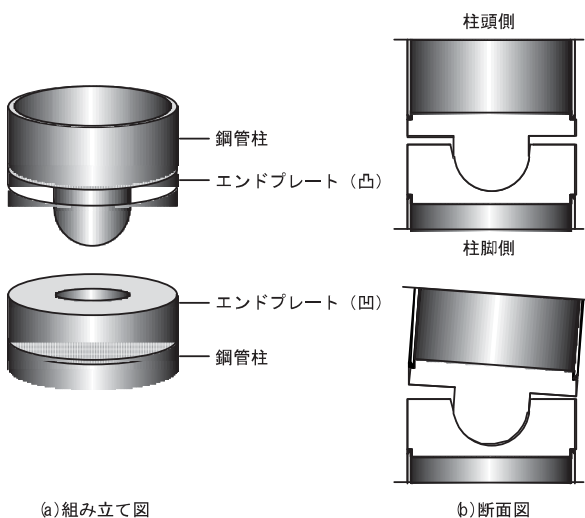


図1 シアキーを用いたピン継手の組立図と断面図

2. 3 球座を用いたピン継手

シアキーを用いたピン継手に対する比較対象として、上記要求性能の(v)と(vi)については十分に確保できることが容易に予想できる、削り出しによる球座を用いたピン継手に対する載荷実験も実施する。このピン継手の組み立て図と断面図を図2に示す。

ここで用いる球座を用いたピン継手は、(ii)、(iv)についてはシアキーを用いたピン継手と同等の性能を有すると考えられるが、(i)、(iii)については明らかに劣るため、リユース型の架構への適用は難しいように思われる。



(a)組み立て図

(b)断面図

図2 球座を用いたピン継手の組立図と断面図

3. 載荷実験

3. 1 実験計画と試験体

試験体は、図4の右上に示すように、ピン継手部分とそれに取り付く一方の柱部分のみを取り出した

ことに相当するものとして製作する。この試験体を加力フレーム内に横置きし、一定軸力を作用させながら両振り載荷を実施することで、提案するシアキータイプピン継手の性能確認を行う。

試験体継手部のサイズを図3に示す。なお、シアキーを用いたピン継手は、座金を6mmとした場合のものが示されている。

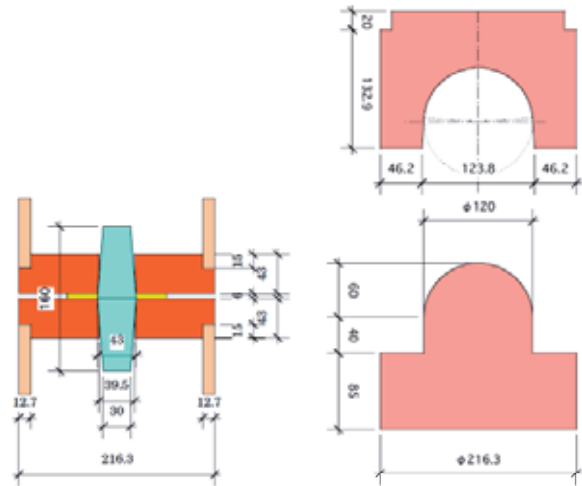


図3 試験体サイズ

試験体の柱部分は、STK490の円形鋼管を用いる。なお全塑性モーメントは、公称値で171kNm、実測値で211kNmであった。シアキータイプ継手のエンドプレート・シアキーと、球座タイプ継手のエンドプレートには、焼き入れをしたS45C鋼材を用いる。シアキータイプ継手の座金には、SS400鋼材およびLYP100鋼材を用いる。

3. 2 載荷・測定方法

図4に加力フレームと試験体の設置状況を、図5に変位測定位置を、図6に載荷プログラムをそれぞれ示す。

柱の部材角 θ_c 、ピン継手部のエンドプレートに生じる相対的な回転角(継手部回転角) θ_{pin} 、および柱の軸伸縮 δ_N は、図5に示した箇所で計測された変位を用いて、次式によりそれぞれ算定する。

$$\theta_c = \frac{U_2 - U_3}{h} - \frac{V_3 - V_4}{B} \quad (1)$$

$$\theta_{pin} = \frac{D_n - D_s}{B'} \quad (2)$$

$$\delta_N = \frac{V_1 + V_2}{2} + \frac{V_3 + V_4}{2} \quad (3)$$

ここで B は柱の外径、 B' はピン継手に取り付けた変位計間距離を表す。

継手部に作用している曲げモーメント M_{pin} を直接測定することは困難であるため、柱に添付したひずみゲージより測定したひずみから柱に生じている曲げモーメントを推定し、これを直線補完することで、継手部に作用している曲げモーメント M_{pin} を算定する。

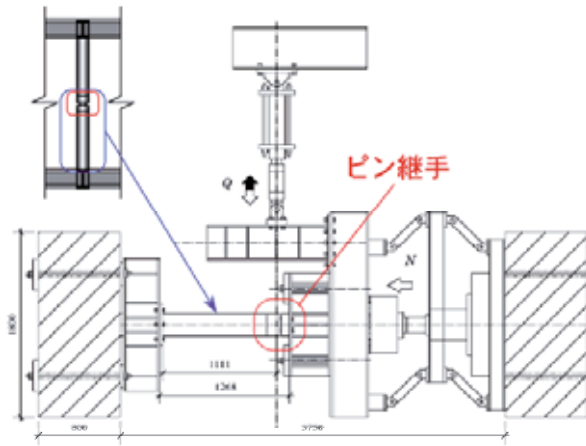


図4 荷重方法

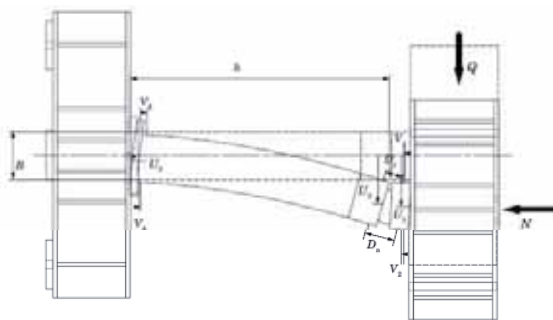


図5 変位測定位置

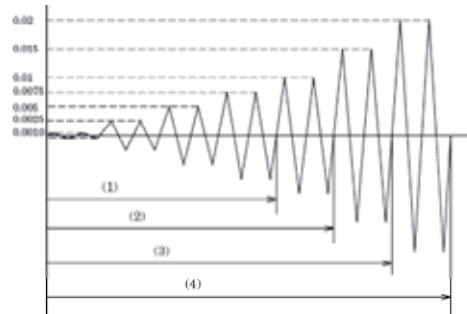


図6 荷重プログラム

3.3 実験パラメータ

表 1 に試験体の一覧を示す. なお, 軸力 250kN 導入時には, 試験体の柱部はほぼ弾性範囲内にあるため, 軸力 500kN 導入用の試験体は, 軸力 250kN 導入時に用いた試験体を実験終了後にそのまま用いることとする.

表1 試験体一覧

試験体名	実験パラメータ	
	座金	荷重プログラム
SS09-25	SS400-9mm	250kN 柱弾性域 (下図(1))
SS09-50		500kN 柱弾塑性域 (下図(2))
SS06-25		250kN 柱弾性域 (下図(1))
SS06-50		500kN 柱弾塑性域 (下図(2))
LY09-25	LYP100-9mm	250kN 柱弾性域 (下図(1))
LY09-50		500kN 柱弾塑性域 (下図(3))
SP-25	なし (球座)	250kN 柱弾性域 (下図(1))
SP-50		500kN 柱弾塑性域 (下図(4))

3.4 せん断力 - 部材角関係

図 7 には, 軸力 250kN 導入時の, せん断力 Q - 部材角 θ_c 関係を, 図 8 には, 軸力 500kN 導入時の同関係を示す. なお, 図中の点線は, 柱試験体の両端が完全固定であると仮定したときの弾性勾配であり, 破線は, 一端が完全固定, もう一端が完全ピンとしたときの弾性勾配である.

図より, 柱部がほぼ弾性範囲内にある軸力 250kN 導入時にも, わずかながら Q - θ_c 関係が履歴ループを描いていることがわかる. この履歴の原因は, 座金の塑性変形およびシアキーとエンドプレート円孔間のクリアランスのずれ (以上いずれもシアキータイプ), あるいは, 球座同士の摩擦 (球座タイプ) によるものと思われる.

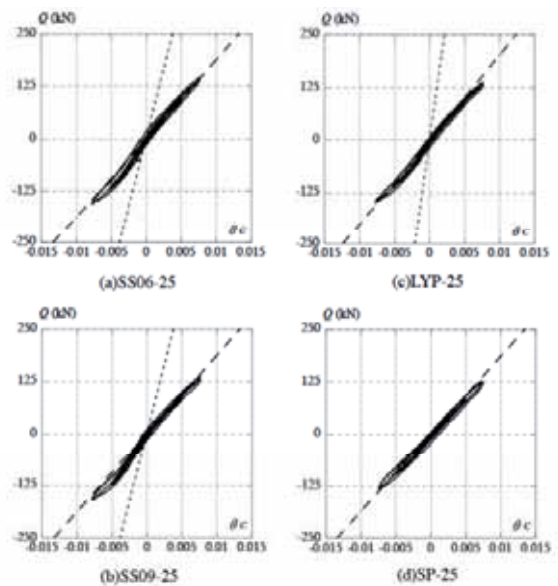


図7 軸力 250kN 導入時のせん断力 - 部材角関係

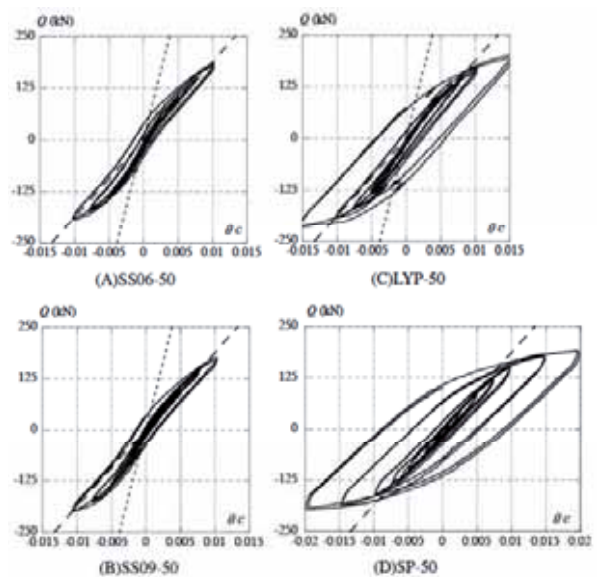


図8 軸力 500kN 導入時のせん断力 - 部材角関係

3. 5 継手部モーメント - 継手部回転角関係

図 9に、軸力 500kN 導入時の、継手部曲げモーメント M_{pin} - 継手部回転角 θ_{pin} 関係を示す。なお、図中の破線は、試験体に作用する軸力 $N=500kN$ に、軸力作用位置から座金縁までの距離 $e=55mm$ を掛けたものであり、この値が、理論上はシアキータイプの継手部曲げモーメント M_{pin} の上限となる。

図より、球座タイプの継手部では、球座同士の摩擦によるものと思われるわずかな履歴ループを描くものの、柱部の全塑性モーメントに比べると十分小さな曲げモーメントしか生じず、理想的なピン継手の挙動を示していることがわかる。一方、シアキータイプの継手部では、座金に SS400 鋼材を用いた場合にはほとんど履歴面積を持たない S 字型の履歴ループを、座金に LYP100 鋼材を用いた場合には座金の降伏によるものと思われる履歴面積をもつ S 字型の履歴ループを描き、両者は球座タイプの継手に比べれば理想的なピン継手からは遠い挙動を示していることがわかる。しかしながら、継手部を含む柱要素としてみたときには、3.4 節で示したように、シアキータイプの継手でも十分ピン継手としてみなせるともいえる。

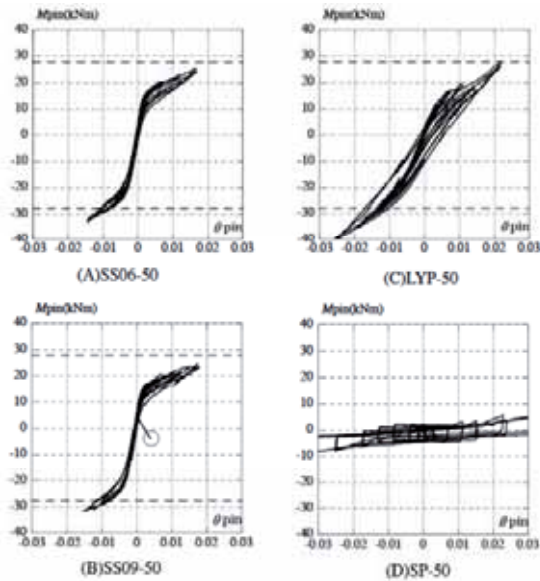


図9 軸力 500kN 導入時の継手部モーメント - 継手部回転角関係

3. 6 継手部回転に伴う軸伸縮

図 10に、軸力 250kN 導入時の、軸力 N - 軸変形 δ_N 関係を示す。図より、座金に SS400 鋼材を用いたシアキータイプの継手を有する試験体では、軸力のみを作用させた場合よりも、せん断力も作用させて柱を曲げ変形させたほうが、柱の軸変形が小さくなっていることがわかる。これは、継手部の回転にともなって座金縁を中心として継手部の浮き上がりが生じて、柱の軸変形を見掛け上小さくしているためであると思われる。一方、座金に LYP100 鋼材を

用いたシアキータイプの継手を有する試験体では、せん断力を作用させるにつれて柱の軸変形が進行していることがわかる。これは、次節で示すように、座金に LYP100 を用いた場合には継手部の回転に伴って座金が大きく塑性変形し、継手部の浮き上がりではなく沈み込みが生じているためであると思われる。

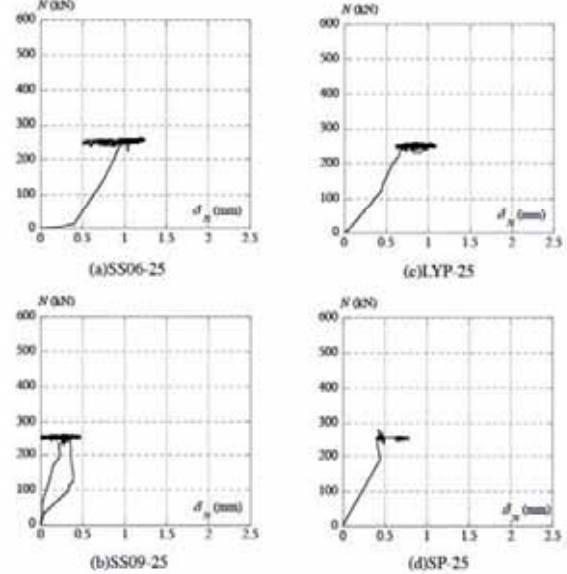


図10 軸力 250kN 導入時の軸力 - 軸変形関係

3. 7 座金の変形

図 11に、全ての载荷実験を終了した後の、シアキータイプの継手に用いた座金の変形の状況を示す。図より、SS400 鋼材を用いた座金では、継手の回転による局所荷重を受ける座金縁部のみで塑性変形がみられ、座金の板厚はほとんど変化していないのに対し、LYP100 鋼材を用いた座金では、座金縁部に顕著な塑性変形がみられるばかりではなく、座金全体も薄くなっていることがわかる。

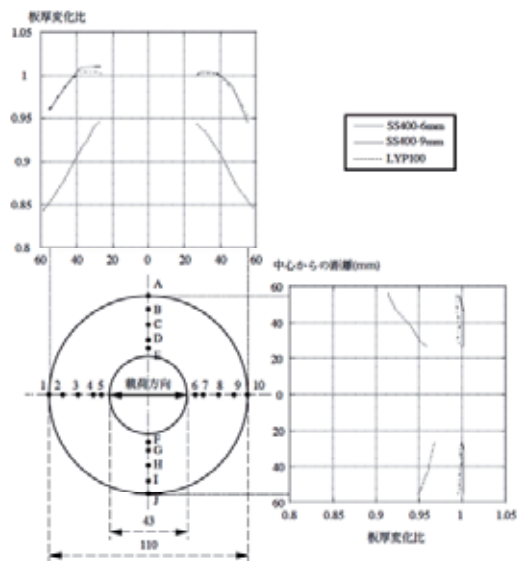


図11 実験終了後の座金の変形

3. 8 エンドプレートとテーパーピンの損傷

球座タイプ、シアキータイプの継手とも、実験終了後のエンドプレートには、座金の移動によるものと思われる擦過傷が若干みられたものの、目視できるほどの大きなへこみなどの損傷は観察されなかった（写真1）。

一方、実験終了後のテーパーピンには、エンドプレートからの支圧が原因と思われるわずかな傷が観察された（写真2）。

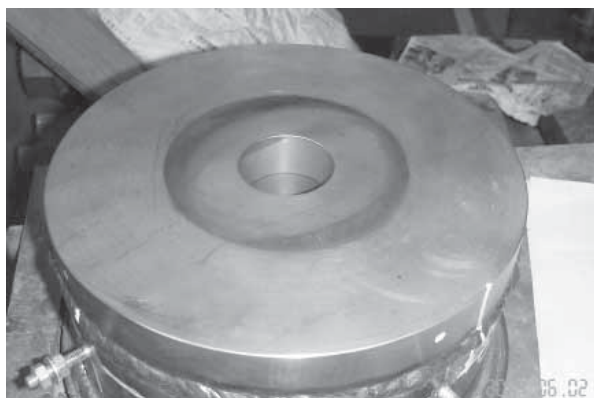


写真1 実験終了後のエンドプレート

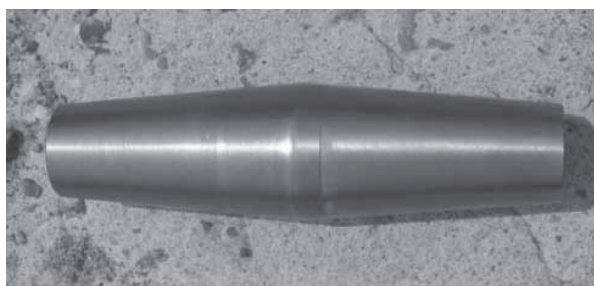


写真2 実験終了後のテーパーピン

4. おわりに

本研究では、リユース型の低層鋼架構の柱継手に用いることを前提とした、施工・分解とも容易なピン継手を提案した。このピン継手は、テーパー付きの円孔を有する柱脚側柱端エンドプレートに、テーパーピンをシアキーとして挿入し、継手部の回転を容易にするための座金を介して、同様のエンドプレートを有する柱頭側柱を落とし込んで構成される。

次に、提案したピン継手を一端に有する柱試験体に対して、一定軸力下での両振り載荷実験を行い、次のような結果を得た。

- (1) 柱が弾性範囲以内にあるときのせん断力 - 部材角関係は、一端が理想的なピンであるとしたときの同関係とほぼ対応するものであった。
- (2) 座金に SS400 鋼材を用いた場合には、継手部の回転に伴って、柱に見掛け上の伸び変形が観察された。ただしこの見掛け上の伸び量は、一定軸力による柱の縮み量と同程度あるいはそれよりも小さいものであった。

(3) 柱の固定端側が塑性化するような大きな変形を与えた場合でも、せん断力 - 部材角関係は安定した紡錘形の履歴ループを描いた。

以上の結果より、本研究で提案したシアキーと座金を用いた継手は、圧縮力とせん断力のみ抵抗するピン継手としては十分な性能を有しており、リユース型の鋼架構における柱ピン継手として実用可能であると結論づけることができる。

謝辞

本研究における実験では、山下直紀さん（大阪大学工学部地球総合工学科建築コース）と岡田郁夫さん（大阪大学大学院工学研究科建築工学専攻）から、実験計画・実験実施・データ整理において多大なる協力を得ました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 21 世紀鋼構造フォーラムグループB（向井昭義ほか）：次世代接合部を有するユニバーサル鉄骨架構の提案，21世紀鋼構造フォーラム提案発表，建築技術，2003 年1月，pp192-193
- 2) 21 世紀鋼構造フォーラム WG1（関光雄ほか）：ユニットセル構造システムの提案，鋼構造シンポジウム 2004 技術特別セッション 21 世紀鋼構造フォーラム発表資料，2004 年 11 月
- 3) 山本真一郎ほか：リユースを目的として柱中間部をピン接合した鋼構造骨組の力学特性，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 III，Pa.No.22493，北海道（2004）

¹ 京都大学

² 大阪大学

³ 竹中工務店

⁴ 東京工業大学