

非構造部材の耐震性に関する研究動向と展望

建築生産研究グループ 主任研究員 石原 直

目次

- I はじめに
- II 研究動向（建築研究所での検討の紹介）
 - 1) 荷重・外力
 - 2) 各種非構造部材の耐震性
- III 展望
 - 1) 構造躯体の変形
 - 2) 壁の設計用地震力
 - 3) 非構造部材の振動特性
 - 4) 非構造部材の剛性・耐力等の力学特性
 - 5) その他
- IV おわりに
- 参考文献

I はじめに

東日本大震災や熊本地震において、構造躯体のみならず非構造部材の地震被害が多数確認されている（図 1）¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。天井は一定の規模等を有するものを「特定天井」と定義して新たな基準が整えられた⁵⁾⁶⁾⁷⁾が、それ以外の部材については耐震性に関して明確な規準等がないものも多い。

本講演では、非構造部材の耐震性に関する研究動向を紹介するとともに、展望を述べる。具体的には、非構造部材全般に用いられる設計用慣性力、(特定)天井の基準関連、間仕切壁の耐震性に関する検討状況を報告するとともに、今後の対策の方向性に関して展望する。



図 1 熊本地震での被害⁴⁾

なお、非構造部材の材料・種類や構工法は多種多様であり、一般的な慣性力等の話題を除き、検討した天井等の一部の非構造部材に限られることを予めお断りしておく。また、非構造部材と呼ぶ場合に建築設備（機器）を含む場合があるが、本稿では対象とせず、内外装材等（構造躯体に含まれない下地や 2 次部材を含む）について述べる。鉄筋コンクリート造の非構造の壁（いわゆる雑壁）も対象としていない。

II 研究動向（建築研究所での検討の紹介）

本章では建築研究所で近年に取り組んできた検討の概要を、「荷重・外力」と「各種非構造部材の耐震性」に分けて紹介する。

1) 荷重・外力

1-a) 特定天井関連¹⁾

特定天井の基準の地震力設定に関しては、経験的に得た応答増幅の関係式を基にして床応答スペクトル（図 2。建築物に取り付けられる非構造部材等の地震時の揺れを表すもの）を略算的に算定する方法を提案した⁸⁾。これは地震時に構造躯体と共振すると天井の揺れが著しく大きくなることを表現したもので、基準では共振の程度が不明である場合には最悪の条件を考えるとされ、

大きめの地震力が設定されている。なお、基準では建築基準法での2段階の地震動レベルのうち小さい方（稀に発生する地震動、中地震動）を対象としており、構造躯体は弾性（線形）範囲に留まるように設計されるレベルである。

基準では要求されないが、2段階の地震動のうち大きな方（極めて稀に発生する地震動、大地震動）に対する天井の安全性等を確かめておくことは、設計においても重要な観点と思われる。そこで、通常的设计では構造躯体の降伏・塑性化が許容されている大地震動に対して、基準と同様の方法で床応答スペクトルを略算的に算定する方法を検討して提案した⁹⁾。当該方法で大地震動に対する天井の地震力を求めたところ、天井の固有周期を抑えること等により、大地震動に対しても損傷を免れうることが確認できた（図3）。

また、平成25年度建築基準整備促進事業（事業主体の戸田建設株式会社との共同研究）により周囲の壁等に慣性力を負担させる形式の天井について実験を含めた検討を行い（写真1）、一般的な仕様での耐震性の評価や留意点を明らかにした。また、当該形式では不可避免的に生じる壁等との衝突によって地震力が大きくなることを実験や解析で明らかにし、設計用の地震力を提案した。成果は既に改正告示やその解説書に反映されている⁶⁷⁾。

1-b) 日本建築学会指針の設計用慣性力の再検討

非構造部材全般に対する耐震性に関して、日本建築学会からは指針¹⁰⁾が刊行されている。近年の地震被害を受けて改定が検討されているところであり、筆者もその作業に参加している。当該指針では非構造部材の設計用慣性力を評価するために、地震時の構造躯体の最大加速度（重力加速度で規準化した水平震度）を利用して、構造躯体の最大加速度の求め方には2通りの方法が示されており、1つの方法は構造躯体の設計で用いられる最大層せん断力の差から最大加速度を評価するものである（図4）。構造設計とも整合が取れている合理的な方法であると解釈されているかもしれないが、実は適当でない。解釈されているかもしれない、という背景には、超高層建築物等の特別な場合を除き、一般的には構造設計が静的に行われていることがある。地震時の複雑かつ動的な揺れをそのまま設計に利用できないので、設計用の静的な力に置き換えて設計をしているためであるが、設計方法・手段として確立しているだけに、実際の地震の際には動的に揺れていることを忘れがちになってしまうことが誤解の要因なのではないかと思われる。

この点については指針改定の検討の一環として、現状の評価式が適当でないことの証明やその程度の把握から始めて、新たな別

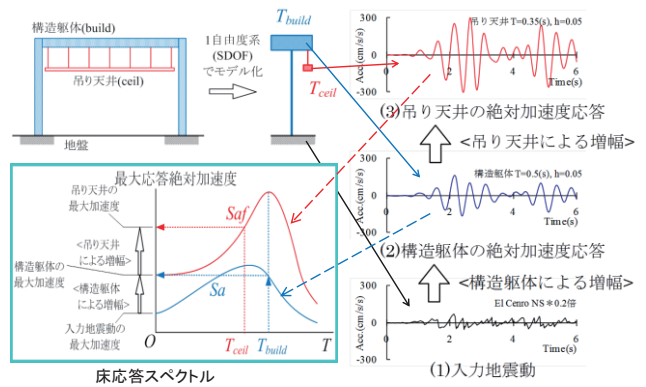


図2 共振、床応答スペクトルの概念図¹⁾

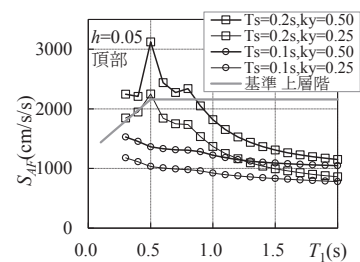


図3 大地震動での地震力（プロット）と基準の地震力（灰色太線）との比較⁹⁾



クリップの外れによる天井面の落下

写真1 天井の加振実験¹⁾

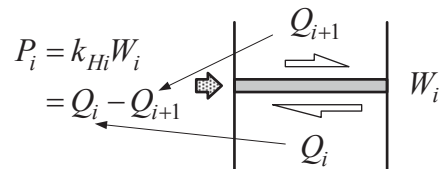


図4 最大層せん断力 Q_i の差は床の最大慣性力 P_i （加速度）か？

の評価式を提案したところである¹¹⁾。

2) 各種非構造部材の耐震性

2-a) 在来天井の段差やシステム天井

建築研究所で最近検討した天井関係の研究を2つ紹介する(写真2)。なお、東京理科大学との連携大学院により永野正行研究室と共同で検討したものである。

1つは、在来工法天井と呼ばれる一般的な天井の段差部の耐震性についてである(写真2(a))¹²⁾。特定天井の基準では破壊や脱落のきっかけとなりうる段差部については縁を切ってクリアランスを設けることを原則としている。段差部の強度や剛性等が必ずしも明らかでないことから応力を発生させないための現実的な措置として理解できるが、意匠や気密性等の点から縁を切らずに一体化した段差部へのニーズもあると考えて、検討を行った。実験で加力したところ、従来通りのやり方で一体化した段差部は平坦部に比べて剛性・耐力とも著しく低くなるが、ある程度の変形には破壊せずに追従した。単純なモデルを用いて地震時に段差部に生じる強制変形を推定したところ、段差部の両側にある天井の固有周期の差が小さい等の条件が整えば、実験で確認された許容変形(破壊せずに追従した変形)以内に収まることが分かった。よって、条件を整えれば必ずしも段差部で切り離す必要はなく、一体化しても大きな被害にはつながらないと考えられる。

もう1つはシステム天井と呼ばれる天井の耐震性についてである(写真2(b))¹³⁾。2社のメーカーの製品を用いて天井面にせん断力をかける実験を行い、天井面の剛性・耐力や履歴特性を把握した。その結果を用いて、単純なモデルで地震応答解析を実施したところ、中地震1回程度では大きな損傷を被る可能性は低いことが示された。一方で、複数回の地震を受けると変形が徐々に大きくなっていくため、耐震設計上で留意すべきであることを指摘した。

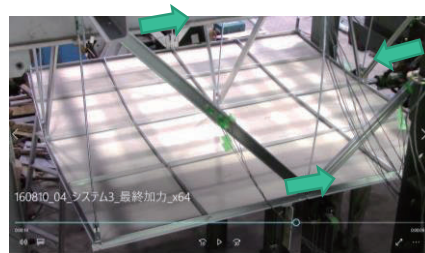
2-b) 大規模間仕切壁³⁾¹⁴⁾に関する検討

東日本大震災の際には特に天井の脱落被害が目撃されたが、階高の大きい倉庫や物流施設等では中間梁と称する2次部材を設けた大規模間仕切壁の被害も比較的多く発生した。

建築研究所では建築研究開発コンソーシアムにおける研究会に参加するとともに、日本鉄鋼連盟からの助成も受けて、大規模間仕切壁の耐震性に関する検討を行った。具体的には実際に被害を受けた建築物での地震観測、建築研究所内での振動台実験(図5(a))を実施して、その振動特性や破壊性状等を把握した。大規模になると壁の面外方向の振動数が低下することで地震時の揺れが大きくなることから、実験結果等を踏まえて振動数を抑える抑るた



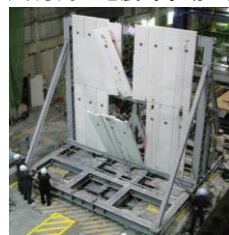
(a) 在来工法天井の段差部



(b) システム天井(特に面内せん断変形)

写真2 天井に関する検討

東日本大震災での破壊状況検証
壁面外方向の地震時挙動の把握



試験体No.1のパネル脱落状況(落下防止ワイヤーにぶら下がって傾いた状態)

壁に一定以上の振動数を持たせるためのスパンの制限値を一覧表として整理

表 スパンの制限値

断面	スパン1[m]			備考
	(左から階高H=6, 8, 10mの場合)			
H=148x100x6x9	4.85	4.54	4.31	
H=150x150x7x10	5.44	5.06	4.82	
H=144x150x6x9	6.12	5.74	5.46	試験体
H=200x200x8x12	6.93	6.53	6.23	
H=200x125x6x9	6.78	6.36	6.05	
H=244x175x7x11	7.42	6.98	6.65	
H=250x250x9x14	8.32	7.88	7.54	
H=248x149.5x5x8	7.60	7.13	6.78	
H=300x150x6x9	7.84	7.34	6.99	
H=294x200x8x12	8.53	8.05	7.68	
H=300x300x10x15	9.57	9.10	8.72	

2次部材(中間梁)の断面 スパンの制限値(m)

(a) 振動台実験

(b) 2次部材断面選定法

図5 大規模間仕切に関する検討³⁾

めの2次部材の選定法を提案し、実務で活用しやすいように表形式で部材断面を選択できるようにした(図5(b))。なお、多くの部分は戸田建設及びALC協会との共同研究として実施した。

III 展望

非構造部材の耐震性に関して、現時点で課題として認識されているものや今後取り組むべきと考えられるものについて述べる。平成30年度以降に建築研究所で検討を予定しているものも含んでいる。

1) 構造躯体の変形

構造躯体に関しては1981年のいわゆる新耐震基準で一定の耐震性が確保されたと考えられている。当該基準では構造躯体の降伏・塑性変形を許容することで「倒壊しない」ことを目指し、構造躯体にはかなりの変形が許容されている。建築基準法では中地震

動に対して層間変形角は原則 1/200 以内であるが、大地震動は中地震動の 5 倍の大きさである。線形と非線形で最大変位は同等であるという変位一定則によれば、大地震動に対する層間変形角は 5/200=1/40 となる。エスカレータの脱落防止に関してはこの数値が基準に入ったが、非構造部材でこれほどの変形に追随できるものはそう多くはない。大きな地震動レベルまで非構造部材の被害を抑制するためには、より大きな変形追随性を持つ非構造部材の構工法の開発を期待するか、変形を抑制するような構造設計を行うことになる。

2) 壁の設計用地震力

前述の天井など、床や屋根に取り付けられる非構造部材では主に地震時の慣性力に対して設計を行うことになるが、壁の場合には構造躯体と壁自体の揺れによる慣性力のほかに層間変形角等の強制変形に追随する必要がある。慣性力と層間変形角の同時性等に関してはあまり明らかにされていない。また、慣性力は近似的には上下の床での床応答スペクトルを参照すればよいと考えられるが、正確には上下の床とどのような関係になるかは明らかになっていない。また、壁の面外方向の揺れでは脚部のロッキング(回転)によって固定度が変化し、壁自体の振動特性が変化することも考慮する必要がある。このように壁の設計用地震力については検討すべき課題が多いと考えられる。

なお、前述の大規模間仕切壁の検討ではこれらの課題の解決を待つよりも現実的な対策として振動数を抑制することを選択したものである。

3) 非構造部材の振動特性

特定天井での床応答スペクトルの活用のように、非構造部材自体の揺れによる応答の増幅を考慮するためには、非構造部材の振動特性、具体的には固有周期(又は固有振動数)と減衰性状を把握する必要がある。下地材や 2 次部材、又は構造躯体との取り合いなどによっても振動特性が変わる可能性もあり、必ずしも明確にならない場合も多いが、振動特性を意識することは地震被害の減少につながるように思われる。

例えば、製品規格として、ある重量を静的にかけた場合のたわみを部材の長さやスパンに対する割合で制限することがある。この方法で静的な変形を制限することは応力やひずみの状態を考えると妥当なのだが、それだけでは大きくなるほど振動数の低下を招いてしまい(図 6)、地震時の揺れを増幅させる危険性を高めてしまう。

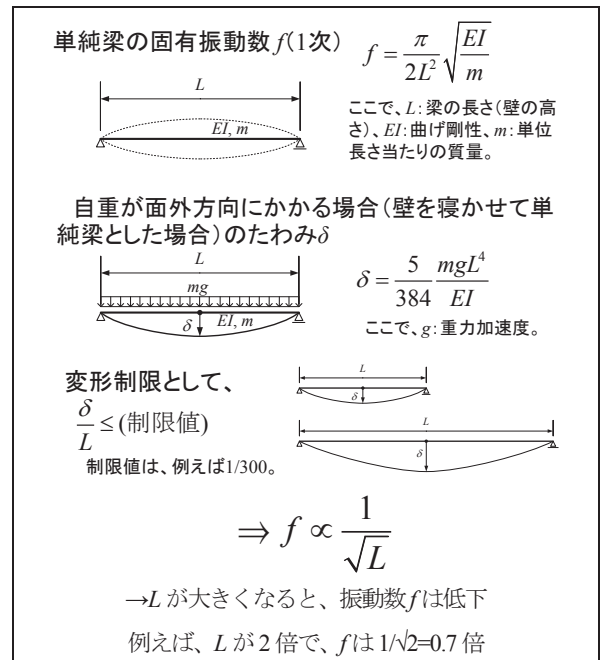


図 6 静的な変形制限だけでは振動数は抑制できない



写真 3 LGS 間仕切壁の実験(載荷後)

4) 非構造部材の剛性・耐力等の力学特性

天井に関しては新基準の制定もひとつの契機として様々な検討が実施され、剛性や耐力等の力学特性が明らかにされてきている。それでも天井に用いられる材料や構工法は多種多様であり、既存天井の改修等まで考えると、継続的な研究開発が必要と考えられる。

被害は見受けられるものの、具体的な検討がほとんどされていない、または十分に実施されていない非構造部材もある。例えば軽量鉄骨下地間仕切壁は大学や民間機関等において力学特性の検討が行われてきたが、地震被害の要因の特定や講ずべき対策については十分に明らかにされていない。そうした背景をもとに、平成 29 年度から建築研究開発コンソーシアムで研究会が実施されており、筆者らも参加するとともに、建築研究所でも若干の検討を行っているところである(写真 3。詳細はポスター発表¹⁵⁾参照。)

で言及した地震力の設定とともに、実験的な検討も継続して力学特性や破壊形態等を明らかにしていく予定である。

5) その他

その他として、非構造部材自体ではなくて、非構造部材と構造躯体等の間にある2次部材の設計にも注意する必要がある。例えば、熊本地震では外壁のPCパネルに比較的大きなずれを生じた被害例があったが、2次部材の設計が影響したと考えられた⁴⁾(図7)。体育館等で大きな開口部に用いられる部材の外れや脱落被害もたまたに見受けられるが、開口のサッシュ等を支える2次部材に耐震的な配慮を欠いていることが多いように思われる。

また、以前の講演¹⁾でも触れたが、既存建築物における非構造部材の耐震診断や改修の促進も重要である。個別の案件に関わることは難しいが、診断や改修に関してもできる範囲で協力し、非構造部材の耐震化の推進に寄与していきたいと考えている。

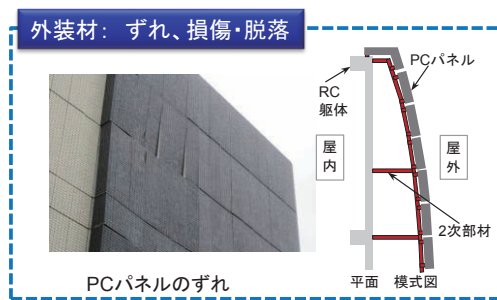


図7 PCパネルのずれの被害⁴⁾

IV おわりに

本講演では非構造部材の耐震性に関する研究動向を紹介するとともに、展望を述べた。解決すべき課題は多いが、地道に、しかし着実に歩を進めて、少しずつでも地震被害の低減と安全・安心な建築物の普及に貢献できればと思う。

参考文献

- 1) 石原直：特定天井基準の技術的背景と設計上の要点、H26年度建築研究所講演会（講演）
- 2) 地震に耐える天井、えびすとら、Vol.66、(独)建築研究所、2014年7月
- 3) 石原直：大規模な間仕切壁の耐震性に関する振動台実験と2次部材断面選定法の提案、H28年度建築研究所講演会（パネル）
- 4) 石原直：平成28年熊本地震による非構造部材の被害、H28建築研究所講演会（パネル）
- 5) 国土交通省住宅局建築指導課：建築基準法施行令の一部を改正する政令について、2013.7
- 6) 平成25年国土交通省告示第771号：特定天井及び特定天井の構造耐力上安全な構造方法等を定める件、2013.8（制定）、2016.5（一部改正）
- 7) 国土交通省国土技術政策総合研究所、ほか：建築物における天井脱落対策に係る技術基準の解説、2013.10、2016.7（追加）
- 8) 石原直、ほか：床応答スペクトルの略算法に基づく非構造部材等の設計用地震力、日本建築学会技術報告集、第21巻、第48号、pp.511-515、2015.6
- 9) 石原直、ほか：非線形地震応答における床応答スペクトルの略算法の提案、日本建築学会技術報告集、第23巻、第54号、pp.433-436、2017.6
- 10) 非構造部材の耐震設計施工指針・同解説および耐震設計施工要領、日本建築学会、2003
- 11) 石原直、ほか：非構造部材の耐震設計用慣性力評価のための構造躯体の加速度について、構造工学論文集、Vol.63B、pp.75-82、2017.3
- 12) 山下圭吾、石原直、ほか：鋼製下地吊り天井における一体化段差部の静的載荷実験と地震時強制変位の推定、日本建築学会技術報告集、第23巻、第55号、pp.827-831、2017.10
- 13) 神戸寛史、石原直、ほか：グリッドシステム天井の面内せん断実験と地震応答評価、日本建築学会技術報告集、第23巻、第55号、pp.839-843、2017.10
- 14) 石原直、ほか：2段積みALC間仕切壁の面外振動数に着目した構造2次部材選定法の提案、日本建築学会技術報告集、第23巻、第55号、pp.801-804、2017.10
- 15) 沖佑典：軽量鉄骨下地間仕切壁の面外曲げ特性に関する基礎的検討、H29年度建築研究所講演会（パネル）