

第2章 免震建築物の設計用地震層せん断力係数の実情調査

2-1 調査目的

告示第2009号第6は、免震建築物の構造計算を規定している。この告示における上部構造の設計用地震層せん断力係数の分布は、免震層の減衰材およびこれと同等の減衰特性を有する支承材の部分の負担せん断力に A_i 分布(A_i 分布算定時における周期は免震層が固定されているものとして算出)の増幅を考慮して求められる¹⁾。

本章では、告示第2009号第6にて設計可能である高さ60m以下の免震建築物を対象として現状建物の実情を調査した。この結果は、次章以降で検討する建物モデルの諸元・パラメータが実情を反映したものとするための参考とする。また、応答の変動評価に必要な基礎的データの取得を目的として、現状使用されている免震部材の力学特性に関する変動についても調査を実施している。

2-2 調査対象

調査対象は、一般財団法人日本建築センターが発行する月刊誌「ビルディングレター」²⁾の性能評価シートとし、告示第2009号第6による設計が開始され始めたと想定される2005年から2008年までにビルディングレターの性能評価シートに記載された免震建築物の設計案件を対象としている。建物高さが60mを超える免震建築物は告示第2009号第6の設計手法が適用不可となるために、今回の調査対象に含まれていない。今回の調査では、2005年～2008年のビルディングレターの性能評価シートに記載されたすべての免震建築物のうち、建物高さが60mを超える建物を除いた121件が対象である。ただし、この調査データは免震建築物における実情を反映していると考えられるが、2005年から2008年に設計されたすべての免震建築物を網羅しているわけではないことに留意する必要がある。また、これらの建物は上記告示第6の方法で設計されたものではなく、すべて時刻歴応答解析を用いた方法で設計されたものである。

2-3-2では、一般社団法人日本免震構造協会の会員企業から提供された設計事例の詳細調査も実施した。調査対象は5件である。

2-3-3では、免震部材の力学特性に関する変動幅の調査結果を示す。これは、各免震部材種別ごとに製造会社が発行する技術資料³⁾および国土交通大臣の認定を受けた免震部材について告示1446号で要求する性能(基準値)を掲載した免震部材標準品リスト-2005-⁴⁾を基とし、整理したものである。

2-3 調査結果

2-3-1 性能評価シートの調査結果

調査は、免震建築物の設計内容を記載した資料から、建物、免震材料、振動系モデルの諸元ならびに応答特性を抽出して行った。上記の抽出項目に対して平均、最大、最小といった統計的データを求め、全体の傾向を把握した。また、度数分布図を作成することにより、データのばらつきを把握した。ただし、事例によっては、ここで採り上げた項目で記載のないものもあった。

(1) 建物用途

調査対象の建物用途を図 2.3-1 に示す。棒グラフ右側の整数値は件数を、()内の数値は全体に対する割合を示す。また、縦軸の「DC」はデータセンターを意味する。用途として多いのは、共同住宅(34.7%)、事務所・研究施設(27.3%)である。病院・老人ホーム(18.2%)や庁舎・消防署(7.4%)といった公共施設も続いて多い。

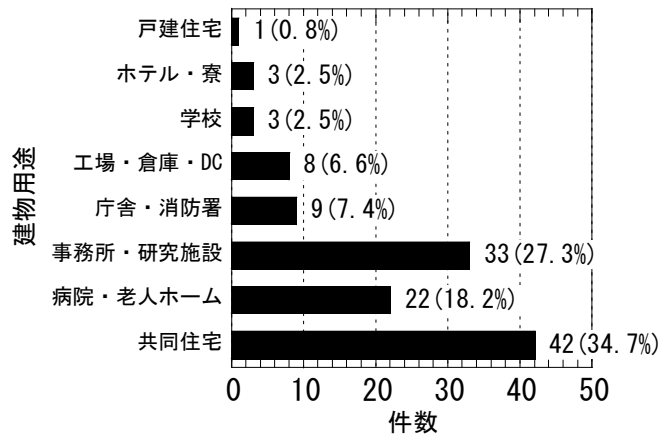


図 2.3-1 建物用途 (総件数: 121)

(2) 上部構造の特性

軒高の度数分布を図 2.3-2 に示す。2.73m~59.6m に分布している。平均は 34.2m である。最小値 2.73m の事例は平屋建ての守衛所である。また、最大値 59.6m の事例は地上 20 階建ての共同住宅である。

地上階数を図 2.3-3 に示す。最小は 1 (平屋建て) であり前述の守衛所である。また最大は 20 であり、軒高が 59.6m で標本中最大の共同住宅である。平均の階数は 9.3 である。

上部構造の構造種別を図 2.3-4 に示す。全体に対する割合は、RC 造が全体の 80%、S 造が 14%、その他の構造 (SRC 造および PC 造他) が 6% である。地盤種別を図 2.3-5 に示す。第 2 種地盤が全体の 77% 程度であり、第 1 種および第 3 種地盤がともに 12% 程度となっている。

免震層固定時の上部構造の固有周期 T_0 を図 2.3-6~図 2.3-8 に示す。これらは、図 2.3-4 で示した構造種別ごとに表している。これらのデータでは同一の建物でも x 方向および y 方向を別のデータとして扱っている。免震層固定時の上部構造の固有周期 T_0 は、性能評価シートに記載されているもののみを抽出した。また、免震層固定時の上部構造の固有周期 T_0 を軒高で除した値の分布図を構造種別ごとに表したものを図 2.3-9 に示す。RC 造では、0.003~0.04 に分布しており、特に 0.01~0.03 に多く分布している。平均は 0.02 程度となっている。最小値である 0.003 の事例は耐震壁付きラーメン構造の 14 階建て共同住宅の事例であり、 T_0 は 0.123 秒である。S 造は 0.035~0.075 の間に分布している。平均は 0.0475 と略算値の 0.03 よりも大きな値となっている。0.05 程度を示す事例は、5 階建ての工場である。また、0.075 程度と大きな値を示すのは、鉄塔付きの 3 階建ての事例である。その他の構造種別における値は、0.02~0.05 に分布している。平均は 0.034 である。0.02 程度となっている事例は、PCaPC ラー

メン構造の5階建て建物である。また0.05の事例は、SRC造の3階建てデータセンターである。

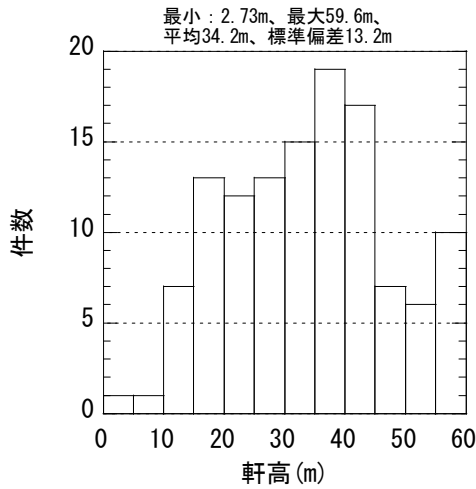


図 2.3-2 軒高 (総件数: 121)

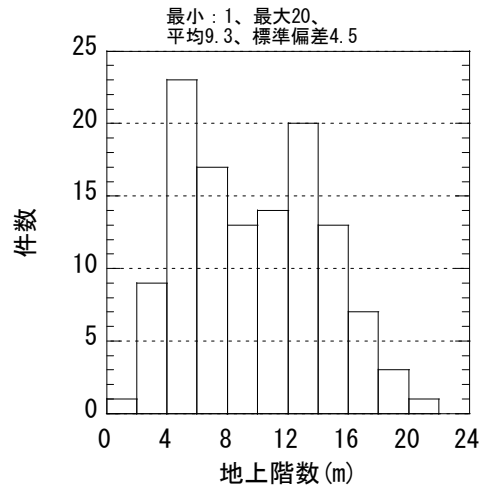


図 2.3-3 地上階数 (総件数: 121)

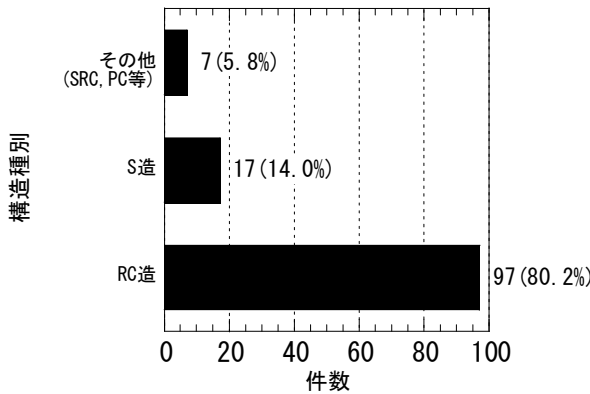


図 2.3-4 構造種別 (総件数: 121)

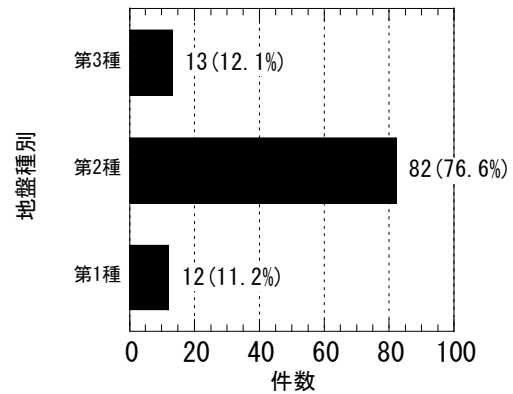


図 2.3-5 地盤種別 (総件数: 107)

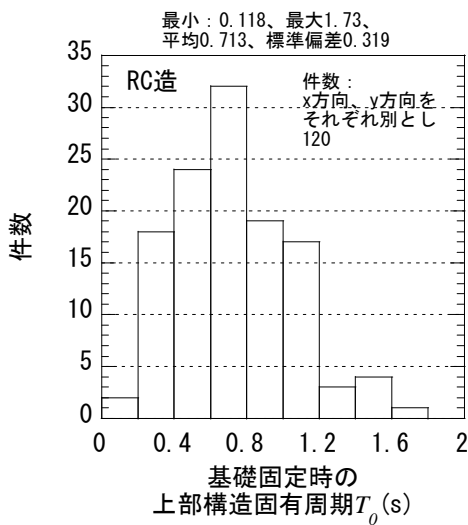


図 2.3-6 免震層固定時の上部構造固有周期 T_0 (RC 造)

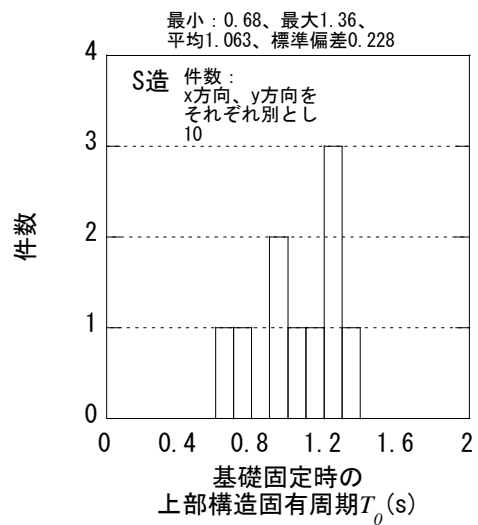


図 2.3-7 免震層固定時の上部構造固有周期 T_0 (S 造)

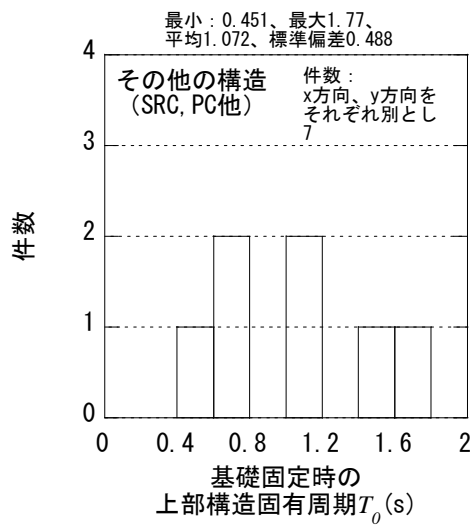


図 2.3-8 免震層固定時の上部構造固有周期 T_0
(その他)

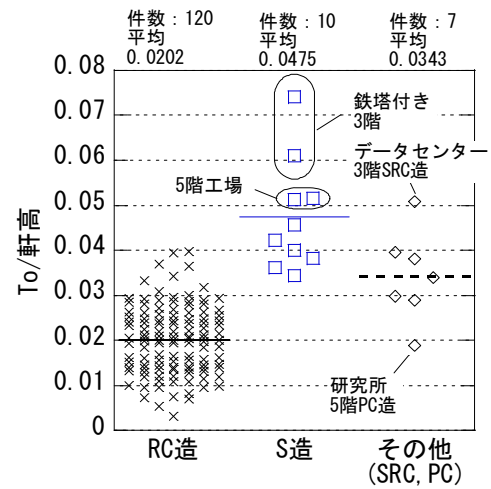


図 2.3-9 免震層固定時の
上部構造固有周期 T_0 /軒高

(3) 免震部材

積層ゴム種別ごとの適用件数を図 2.3-10 に示す。図中の鉛プラグ入り積層ゴムは、錫プラグ入り積層ゴム (2 件) を含み計上している。鉛プラグ入り積層ゴムは全体のうち 58.7%において使用されており、積層ゴムの中で、適用件数は最も多い。また、天然ゴム系積層ゴムは全体の 54%、高減衰積層ゴムは 17%に用いられている。

すべり・転がり系の種別ごとの適用件数を図 2.3-11 に示す。弾性すべり支承の適用件数が全体の 36%であり、すべり・転がり系支承の中では最も多く適用されている。また、直動転がり支承の適用事例は全体の 13%であった。その他、直動型以外の転がり支承、剛すべり支承の適用もそれぞれ全体の 4%程度となっている。

別置きダンパーの種別ごとの適用件数を図 2.3-12 に示す。オイルダンパーの適用件数は全体の 26%であり、鋼材系ダンパー (15%)、鉛ダンパー (11%) よりも多い。また摩擦ダンパーを使用している事例も見られた。

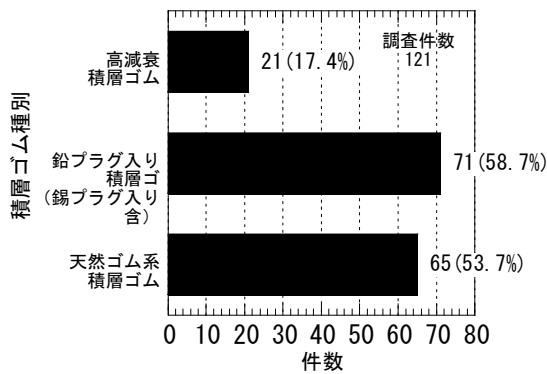


図 2.3-10 積層ゴム種別の適用件数

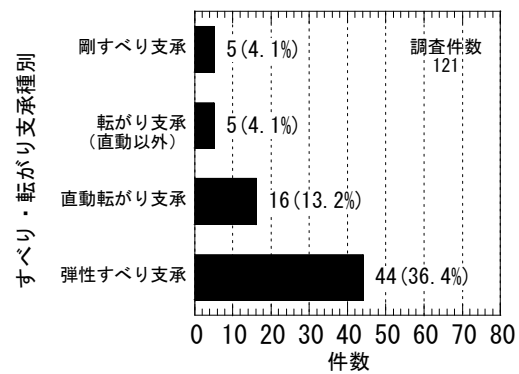


図 2.3-11 すべり・転がり支承種別の適用件数

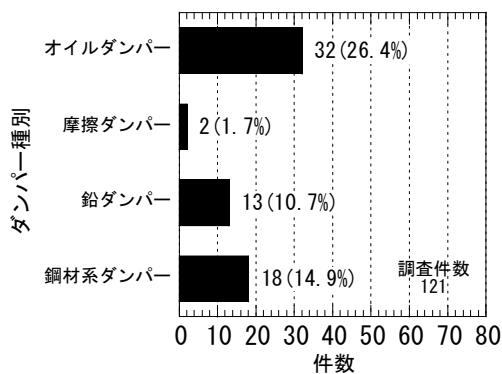


図 2.3-12 別置きダンパー種別の使用件数

(4) 免震部材のモデル化

設計時に実施された解析における各免震部材の復元力特性のモデル化に関して記述がある件数を表 2.3-1 に示す。調査対象とした性能評価シートにおいて、免震部材のモデル化が記述された件数は多くはない。天然ゴム系積層ゴムは、全 20 件のうち、18 件は線形としてモデル化され、残り 2 件は非線形（このうち 1 件はマルチリニアとしてモデル化）であった。鉛プラグ入り積層ゴムおよび高減衰積層ゴムについてのモデル化種別適用案件数を表 2.3-2 および表 2.3-3 に示す。鉛プラグ入り積層ゴム、高減衰積層ゴムともにバイリニア特性としてモデル化されているものが多い。特に歪み依存型のバイリニアを用いた事例が鉛プラグ入り、高減衰ともに全体の 7 割程度となっている。曲線モデル（RO モデル、HD モデル、菊地モデル）を適用した件数は、鉛プラグ入りおよび高減衰ともに全体の 15% 程度であった。

弾性すべり支承、剛すべり支承は、それぞれ 1 件が剛塑性にてモデル化しているが、その他はすべてバイリニアとの記述であった。また直動転がり支承では、2 件ともバイリニアとしてモデル化している。

弾塑性ダンパー（鋼材系、鉛）および摩擦ダンパーについては、すべてがバイリニアとしてモデル化されており、依存性に関する特段の記述はなかった。またオイルダンパーについては、すべて変形速度と減衰係数の関係がバイリニアとしてモデル化されており、中には速度依存性を考慮したものが見られた。

表 2.3-1 免震部材のモデル化記述件数

(a) 支承材

種別	天然ゴム系積層ゴム	鉛プラグ入り積層ゴム	高減衰積層ゴム	弾性すべり支承	剛すべり支承	直動型転がり支承
記述件数	20	23	7	13	2	2

(b) 減衰材

種別	弾塑性ダンパー	摩擦ダンパー	オイルダンパー
記述件数	9	2	5

表 2.3-2 鉛プラグ入り積層ゴムのモデル化と適用件数

種別	バイリニア（歪み依存記述なし）	歪み依存型バイリニア	RO モデル	HD モデル	菊地モデル	非線形（詳細不明）
件数	3	15	2	1	1	1
割合	13%	65%	9%	4%	4%	4%

表 2.3-3 高減衰積層ゴムのモデル化と適用件数

種別	バイリニア (歪み依存 記述なし)	歪み依存型 バイリニア	RO モデル	HD モデル	菊地モデル	非線形 (詳細不明)
件数	1	5	-	-	1	-
割合	14%	72%	-	-	14%	-

(5) 上部構造の減衰

上部構造の減衰に関する設定についての調査を行った。調査対象とした性能評価シート全 121 件のうち上部構造の減衰について記述されていた 70 件を対象とした。

上部構造の減衰として設定した種別の適用件数を図 2.3-13 に示す。瞬間剛性比例型が最も多く、全体の 57.1% を占める。その他では初期剛性比例型が 41% であり、この 2 つのタイプが大部分を占めている。その他の事例としては、レイリー型減衰を適用した事例 (1 件) も見られた。なお、「剛性比例型」と記述されていた事例は、初期剛性比例型としてここでは計上している。基礎固定時の 1 次振動モードに対する上部構造の減衰定数の設定値を図 2.3-14 に示す。0.02 が全体の 52.9% と最も多く、図 2.3-15 に示すように上部構造が RC 造においても 0.02 として設定している事例は RC 造の約半数である。0.03 は全体の 44% であり、0.02 もしくは 0.03 と設定している場合が全体の 97% を占めている。また、0.01 としている場合も 2 件 (全体の 2.9%) 見られた。

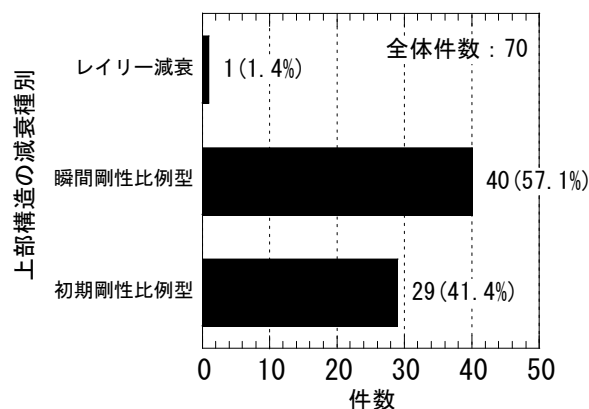


図 2.3-13 上部構造の減衰種別

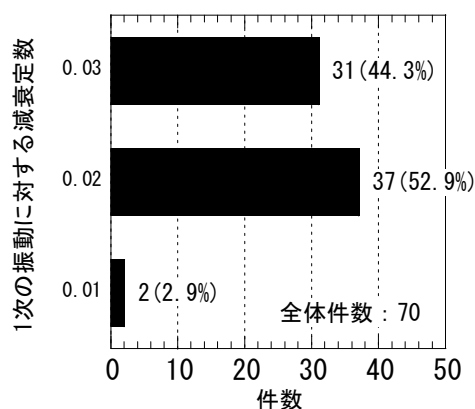


図 2.3-14 基礎固定時の 1 次振動モードに対する上部構造の減衰定数

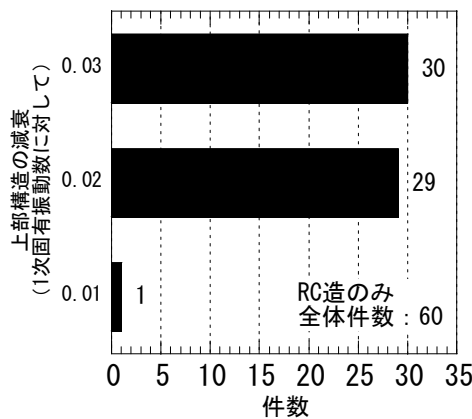


図 2.3-15 基礎固定時の 1 次振動モードに対する上部構造の減衰定数
(RC 造のみ)

(6) 設計用地震層せん断力係数

最下階の設計用地震層せん断力係数の度数分布図を図 2.3-16 に示す。0.04～0.35 に分布し、平均は 0.132 である。最小値である 0.04 の例は、鉛プラグ入り積層ゴム、十字型直動転がり支承およびオイルダンパーを用いた 13 階建ての建物である。これは予備応答解析結果に基づき設定されている。0.35 の事例は鉛プラグ入り積層ゴムを用いた 4 層事務所ビルである。この設定も予備応答解析に基づくものである。最上階の設計用せん断力係数を図 2.3-17 に示す。0.11～0.79 に分布し、平均は 0.307 である。最小値である 0.11 の例は、最下階の設計用地震層せん断力係数が 0.04 であった設計例の建物である。最大値 0.79 の例は、高減衰積層ゴムと弾性すべり支承を用いた 7 階建ての PCaPC 造の物流施設の場合である。本例の特徴としては、階数が上がるごとにセットバックしていること、地盤種別は第 3 種であることが挙げられる。この事例における設計用地震層せん断力係数の設定は A_i 分布に基づいており、立面形状から建物高さ方向の質量分布の影響により最上階の設計用せん断力係数が高い値になったものと考えられる。

最上階と構造物の最下階の設計用地震層せん断力係数比を図 2.3-18 に示す。0.70～6.08 まで分布し、平均値は 2.43 である。最小値 0.70 の場合は、鉛プラグ入り積層ゴムを用いた 4 層事務所ビルの例であり、最下階の設計用地震層せん断力係数が抽出データのうちの最大である 0.35 の建物である。また、6.08 の例は、最上階の設計用地震層せん断力係数が最大値 0.79 の建物である。設計用地震層せん断力係数（最上階／最下階）と上部構造の基礎固定時 1 次固有周期との関係を図 2.3-19 に示す。ばらつきはあるものの図中の直線で示すような右肩上がりの傾向がよみとれ、これより上部構造の周期が長いほど地震層せん断力係数の高さ方向への増幅が大きいものとして設計用地震層せん断力係数を設定していることがわかる。

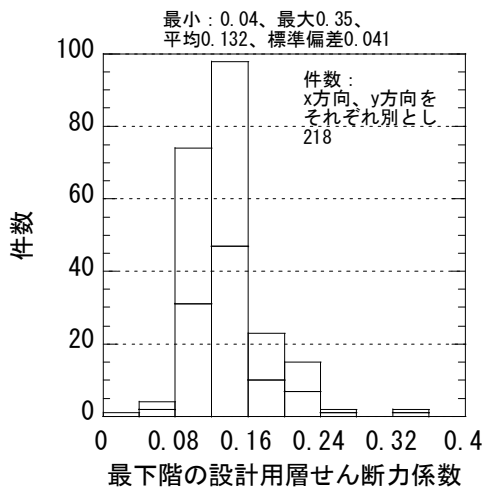


図 2.3-16 最下階の設計用地震層せん断力係数

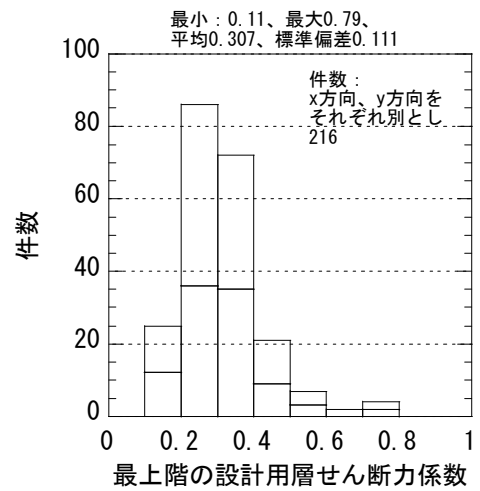


図 2.3-17 最上階の設計用地震層せん断力係数

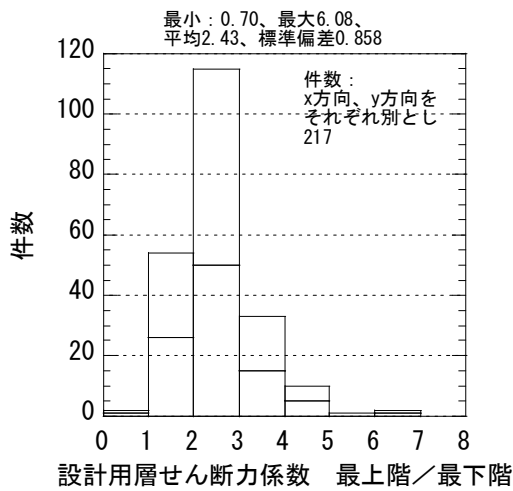


図 2.3-18 設計用地震層せん断力係数
最上階／最下階

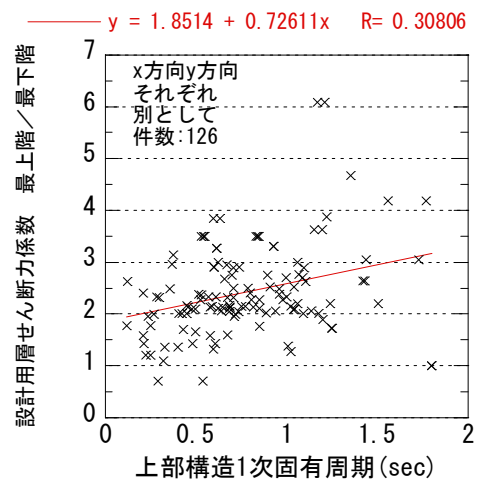


図 2.3-19 設計用地震層せん断力係数の
最上階／最下階と上部構造1次固有周期

(7) レベル2 地震時応答

ここではレベル2（極めて稀に発生する）地震時における応答解析結果を示す。応答解析の入力地震波は観測波、告示波（平成12年建設省告示第1461号（以下、告示1461号）第四号イに示す「極めて稀に発生する地震動」の解放工学的基盤における減衰定数5%の加速度応答スペクトルに適合し、かつ表層地盤の増幅特性を考慮して作成された模擬地震動）および案件によってはサイト波といった数波を適用している。また免震層の材料特性のばらつきを考慮し、免震層の力学特性にばらつきを与えた応答解析を実施している。調査対象であるビルディングレターの性能評価シートにおいて掲載されている応答値は、種々の入力地震動に対して免震層の力学特性のばらつきを与えた解析結果の最大値が記載されている。本節にて記載するデータには上記に示した種々の解析結果の最大値が示されている。

a. 免震層の最大変位

レベル2地震時における免震層最大変位を図2.3-20に示す。平均値は35.8cmであり、13.2cmから

52.6cm の間に分布している。13.2cm の事例は、増幅機構付き減衰装置（減衰こま）を用いた中間階免震の事例である。また、最大変位が大きい53cm の例は、地盤特性が第3種地盤の場合である。レベル2地震時における免震層変位が最大となる入力地震動を図2.3-21に示す。事例の大多数において告示波（全体の83%）あるいはサイト波（全体の13%）により免震層の変位が最大となっていることがわかる。

b. 免震層の最大地震層せん断力係数

レベル2地震時における免震層の最大地震層せん断力係数を図2.3-22に示す。平均値は0.113であり、0.061~0.255まで分布している。0.061の事例は、天然ゴム系積層ゴム、鉛プラグ入り積層ゴム、弾性すべり支承、直動すべり支承およびオイルダンパーを併用した7層の鉄骨造事務所である。また、0.062の事例として、高減衰積層ゴムを用いた20層の耐力壁付きラーメンRC構造の集合住宅もある。0.255（X方向）及び0.215（Y方向）の事例は、増幅機構付き減衰装置（減衰こま）を用いた中間階免震の事例で、免震層の最大変位が13.2cmと最小の建物の事例である。また0.190の事例は、1階柱頭部と2階床梁下との間に天然ゴム積層ゴム、鉛プラグ入り積層ゴムの設置した4層のRC造耐震壁付きラーメン構造とした医療施設のケースである。免震層の地震層せん断力係数が最大となる入力地震動は、図2.3-23より免震層の最大変位と同様に大半の事例において告示波あるいはサイト波である。

c. 頂部の最大絶対加速度

レベル2地震時における頂部の最大絶対加速度を図2.3-24に示す。ビルディングレターの性能評価シートにおける応答結果の記載欄に上部構造の最大絶対加速度が記載されているが、「頂部の絶対加速度」、「最上階の絶対加速度」、「最上階床位置の絶対加速度」と記載事項が事例により異なっている。ここではこれらを併せて「頂部の最大絶対加速度」として表記している。平均値は252cm/s²であり、89cm/s²~559cm/s²に分布している。89cm/s²の事例は、免震部材に天然ゴム系積層ゴム、低摩擦弾性すべり支承、鋼製ダンパー及びオイルダンパーを併用した5層PCaPC造の事務所ビルである。559cm/s²の事例は、柱CFT梁S造の5層事務所ビルの事例であり、免震部材は天然ゴム系積層ゴムと鉛ダンパーからなる。最下階の最大せん断力係数は0.12である。頂部の絶対加速度から最上階の最大応答地震層せん断力係数 C_t は、 $C_t \doteq a/g$ （ a ：頂部の最大加速度、 g ：重力加速度）と近似的に表すと、この事例では $C_t \doteq 0.57$ となる。これより、最下階に対する最上階の地震層せん断力係数比は4.75となる。これは、図2.3-18で示した最上階と最下階の設計用地震層せん断力係数比の平均値2.43の約2倍であり、このケースでは高さ方向への地震層せん断力係数の増幅が大きいことがわかる。図2.3-25に示すように、頂部の絶対加速度が最大となる入力地震動は、免震層の最大変位、地震層せん断力係数の場合とは傾向が異なり、告示波（全体の42%）、サイト波（全体の6%）のみならず、EL Centro波（28%）、TAFT波（17%）といった観測波である事例も見られる。免震層の最大変位と頂部の絶対加速度の関係を図2.3-26に示す。今回の調査結果において、免震層応答変位が大きくなれば応答加速度は小さくなる傾向は明瞭に見られなかった。

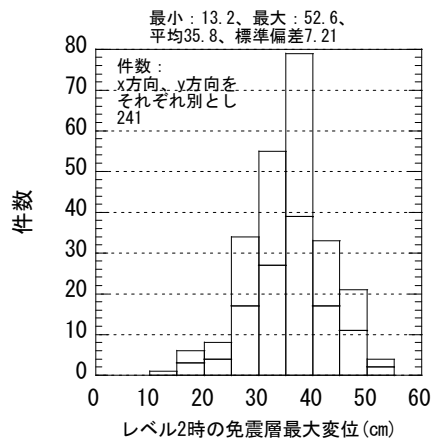


図 2.3-20 レベル 2 地震時
免震層最大変位

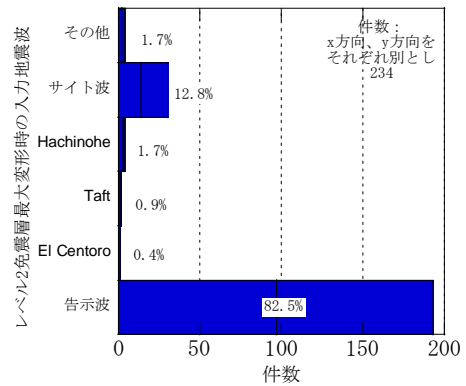


図 2.3-21 レベル 2 地震時
最大免震層変位の入力地震動

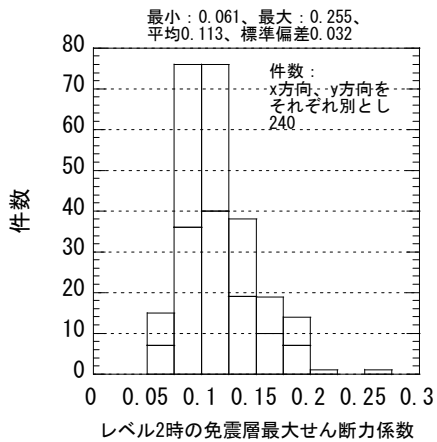


図 2.3-22 レベル 2 地震時
免震層の最大地震層せん断力係数

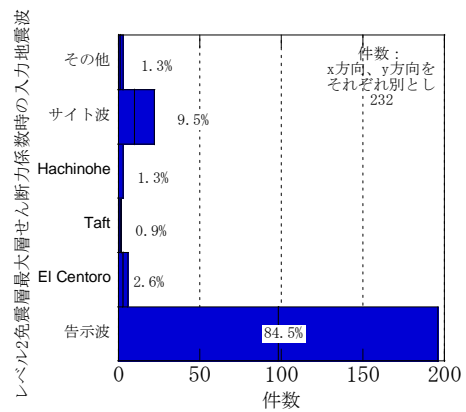


図 2.3-23 レベル 2 地震時
免震層の地震層せん断力係数が最大の入力地震動

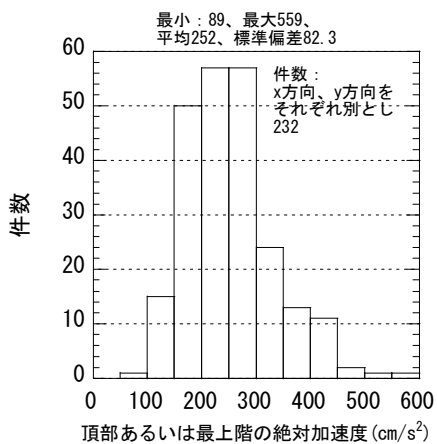


図 2.3-24 レベル 2 地震時
頂部の最大絶対加速度

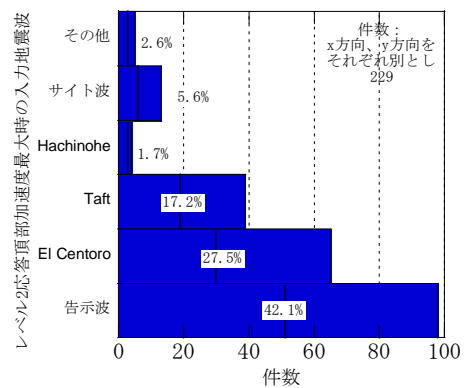


図 2.3-25 レベル 2 地震時
頂部の絶対加速度が最大時の入力地震動

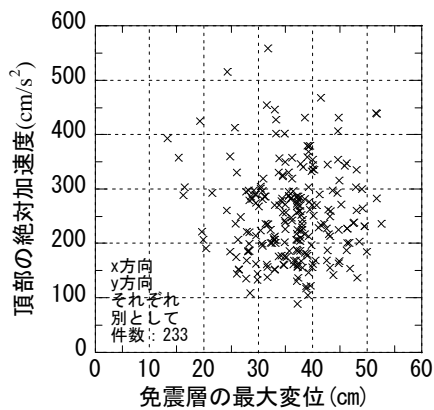


図 2.3-26 レベル 2 地震時

免震層の最大変位と頂部絶対加速度

(8) 地震層せん断力係数の高さ方向比

上部構造の地震層せん断力係数の増幅傾向を調査するために、レベル 2 地震時の上部構造最上階の地震層せん断力係数 C_i を免震層の地震層せん断力係数 C_0 で除した値（以下、応答地震層せん断力係数比 C_i/C_0 と記す。）を求めた。上部構造最上階の地震層せん断力係数は、(7) レベル 2 地震時応答の「c. 頂部の最大絶対加速度」で用いた頂部の最大絶対加速度 a より、最上階の最大応答地震層せん断力係数 C_i は、 $C_i \doteq a/g$ (a : 頂部の最大加速度、 g : 重力加速度) として求めた。ただし、上部構造最上階の地震層せん断力係数が最大になる地震波と免震層の地震層せん断力係数が最大になる地震波は同一であるとは限らないため、本節で求めた地震層せん断力係数比 C_i/C_0 は同一地震波における免震建築物の増幅特性を必ずしも表しているわけではないことに注意する必要がある。

a. 全体傾向

度数分布図を図 2.3-27 に示す。値は 1.00 から 6.64 の間に分布している。平均値は 2.42 であり、設計用せん断力係数における最上階と最下階との比の平均値 2.42 と同じ値である。1.0 以下の小さな値 ($C_i/C_0=0.995$) は、高さ 60m の鉄塔を有する 3 階建て RC 造の耐震壁付きラーメン構造の放送局のケースである。免震部材は、天然ゴム系積層ゴム、直動転がり支承、鋼材ダンパー及び鉛ダンパーを併用している。最大値となる 6.64 (X 方向)、6.22 (Y 方向) の事例は、地上 7 階建ての S 造ブレース付きラーメン構造の事務所であり、平面形状が T 字型となっている。免震部材は、鉛プラグ入り積層ゴム、天然ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承、直動転がり支承、オイルダンパーを併用している。また次に大きな値となっている 5.76 の事例は、8 層の柱 CFT 梁 S 造の事務所ビルであり、免震部材は天然ゴム系積層ゴムと鉛ダンパーを併用している。

b. 他の抽出データとの関係

免震層の最大変位と地震層せん断力係数比 C_i/C_0 (図中では「応答 C_i/C_i 」と表記) の関係を図 2.3-28 に示す。免震層の最大変位と地震層せん断力係数比 C_i/C_i の間には明瞭な関係が確認されなかった。免震層の最大地震層せん断力係数と地震層せん断力係数比 C_i/C_i の関係を図 2.3-29 に示す。図 2.3-29 は右

肩下がりにデータがプロットされており、免震層の地震層せん断力係数が小さいほど地震層せん断力係数比 C_t/C_0 は大きくなることを示している。図 2.3-30 は、免震層固定時の上部構造 1 次固有周期と地震層せん断力係数比 C_t/C_0 の関係である。右肩上がりの傾向が現れているが、ばらつきは大きい。免震層固定時の上部構造 1 次固有周期が比較的長い場合において、図 2.3-30 より地震層せん断力係数比 C_t/C_0 は大きくなる傾向にあることから、図 2.3-26 で示す免震建築物頂部の応答加速度の平均値 250cm^2 程度までに抑えるには、上部構造の 1 次固有周期を小さく設定することが必要となると考えられる。

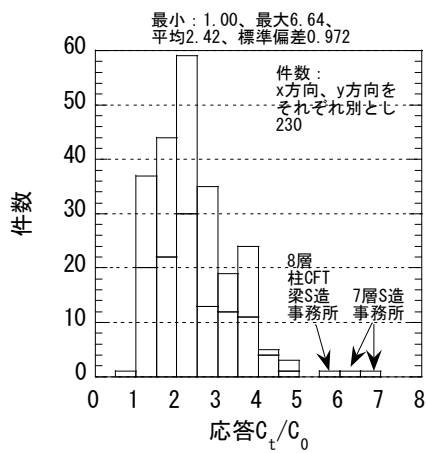


図 2.3-27 レベル 2 地震時
応答地震層せん断力係数比 C_t/C_0

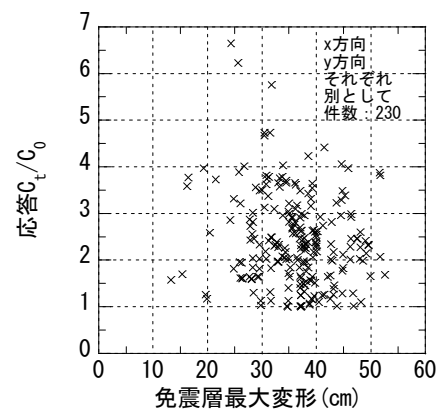


図 2.3-28 免震層最大変位と
応答地震層せん断力係数比 C_t/C_0

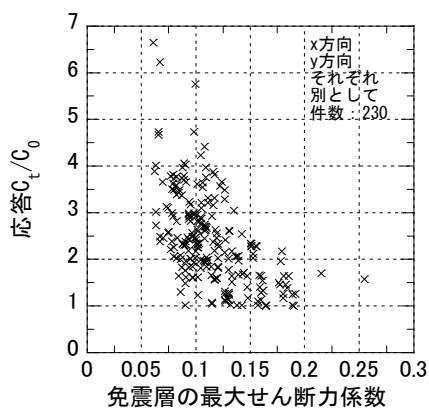


図 2.3-29 免震層の最大せん断力係数と
応答地震層せん断力係数比 C_t/C_0

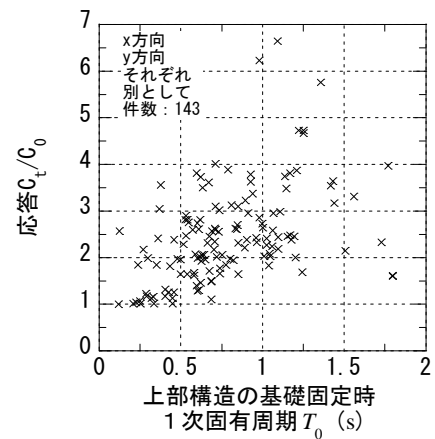


図 2.3-30 上部構造 1 次固有周期と
応答地震層せん断力係数比 C_t/C_0

(9) まとめ

日本建築センター発行の機関誌「ビルディングレター」に掲載された2005年～2008年の「性能評価シート」から高さ60m以下の免震建築物を対象として現状建物の実情を調査した。以下に調査結果を列挙する。

(建物の概要について)

- ・建物の階数は、平屋建てから最大20階までであった。
- ・構造種別はRC造が全体の80%、S造が15%、その他の構造（SRC造およびPC造他）が5%であった。
- ・地盤種別は、第2種地盤が全体の75%程度、第1種および第3種地盤がともに12%程度であった。
- ・上部構造の免震層固定時における1次固有周期は0.12s～1.8sに分布していた。ただし、この固有周期は略算式によるものか、固有値解析によるものかは不明である。
- ・免震層固定時における上部構造の固有周期を軒高で除した値について、RC造では0.003～0.04に分布しており、平均は0.02程度であった。S造は0.035～0.075の間に分布し、これは略算値の0.03に対して大きめの値であり、略算式による固有周期よりも長い。

(免震部材について)

- ・鉛プラグ入り積層ゴムは全調査対象事例の約6割に使用されており、積層ゴムの中で適用件数は最も多い。
- ・すべり・転がり系支承の適用事例は、弾性すべり支承が全体の約4割であり、直動転がり支承の適用事例は全体の約1割であった。
- ・減衰材の適用事例は、オイルダンパーが全体の3割程度であり、鋼材系ダンパー、鉛ダンパー（ともに約1割）よりも多い。

(応答解析モデルについて)

- ・振動解析における免震部材の復元力特性は、鉛プラグ入り積層ゴム、高減衰積層ゴムともにバイリニア特性としてモデル化されているものが多く、歪み依存型のバイリニアを用いた事例が鉛プラグ入り、高減衰ともに全体の7割程度となっている。
- ・弾性すべり支承、剛すべり支承および直動転がり支承の復元力特性は、バイリニアとしているものがほとんどであった。
- ・弾塑性ダンパー（鋼材系、鉛）および摩擦ダンパーについては、すべてがバイリニアとしてモデル化されており、依存性に関する記述はなかった。
- ・オイルダンパーは、すべて変形速度と減衰係数の関係がバイリニアとしてモデル化されており、中には速度依存性を考慮したものが見られた。
- ・上部構造の減衰は瞬間剛性比例型が最も多く、全体の約6割を占める。その他は初期剛性比例型が

約4割であり、ほぼこの2つのタイプが適用されている。

- ・基礎固定時の1次振動モードに対する上部構造の減衰定数の設定値は0.02が全体の5割強と最も多く、上部構造がRC造であっても0.02として設定している事例はRC造の約半数である。0.02もしくは0.03と設定している事例が全体の97%を占めている。

(応答解析結果について)

- ・レベル2地震時応答において、免震層の最大変位は13cmから53cmまで分布している。
- ・免震層の最大地震層せん断力係数は0.06~0.26まで分布し、平均は0.11であった。
- ・上部構造最上階の地震層せん断力係数を免震層の地震層せん断力係数で除した値(応答地震層せん断力係数比 C_i/C_0)は、1.00から6.64の間に分布しており、平均値は2.42であった。応答地震層せん断力係数比 C_i/C_0 が6程度となっている事例は、上部構造がS造あるいはCFT柱といったRC造以外の構造においてであった。
- ・免震層の地震層せん断力係数が大きいほど応答地震層せん断力係数比 C_i/C_0 は小さくなり、免震層固定時の上部構造1次固有周期が長いほど応答地震層せん断力係数比 C_i/C_0 は大きくなる傾向がみられた。

2-3-2 設計例の詳細情報調査結果

(1) 調査対象と調査件数

2-3-1 では、免震建築物設計例の各調査項目に対する全体的傾向を示した。2-3-1 の調査対象はビルディングレターの性能評価シートである。これより得られる各設計例における地震層せん断力係数の情報は、免震層、最上階および最下階に対してのみであった。ここでは、設計例の詳細情報の調査結果を示す。主な調査項目としては、実設計例における地震層せん断力係数の高さ方向の分布である。

調査対象は、一般社団法人日本免震構造協会の会員企業から提供された設計事例データである。2-3-1 同様、2005 年以降の設計事例を調査対象としている。また、高さ 60m を超える建物事例は告示第 2009 号第 6 の適用範囲外であるため、調査対象には含まれていない。調査件数は 5 である。ここで示した設計例はすべて時刻歴応答解析によるものである。

(2) 調査事例

各事例のデータは、1.建物概要、2.免震部材概要、3.振動系モデル、4.レベル 2 応答結果、5.各階の質量・剛性および 6.各階の地震層せん断力係数の順に表形式にて示している。

各層の地震層せん断力係数は、地震層せん断力係数の高さ方向分布を設計用ならびに応答解析結果の両方に対して求めている。告示第 2009 号における地震層せん断力係数分布は、減衰材及びこれと同等の減衰特性を有する支承材の部分の負担せん断力に対してのみ A_i 分布 (A_i 分布算出時の固有周期は基礎固定時の上部構造 1 次固有周期を用いる) での増幅を考え、支承材および復元材といった弾性部材については上部構造へ増幅しないものとして求めている。ここでは、免震構造の応答せん断力係数分布が A_i 分布により表現可能であるかを調べるために免震層固定時の 1 次固有周期から A_i 分布を求め、実応答の分布形と A_i 分布を比較する。これは、告示第 2009 号の地震層せん断力係数分布に支承材および復元材といった弾性部材にも A_i 分布による増幅を考慮した場合に相当し、告示第 2009 号よりも地震層せん断力係数の増幅を大きく評価することとなる。

a. 例 1～e. 例 5 における各層の質量・剛性及び各層の地震層せん断力係数を示す表内で使用する記号の意味を以下に示す。

Σm_i	: 当該階と当該階より上階の質量和
α_i	: 全質量に対する Σm_i の比
K_i/K_1	: 構造物最下階剛性に対する当該層剛性の比
設計用 C_i	: 設計用地震層せん断力係数
応答 C_i	: レベル 2 地震時の最大応答地震層せん断力係数
A_i	: 昭和 55 年建設省告示第 1793 号にて示される A_i の式より算出した値

$$A_i = 1 + (1/\sqrt{\alpha_i} - \alpha_i) \cdot \frac{2T}{1 + 3T}$$

ただし、 T は免震層固定時の 1 次固有周期であり、 X 方向、 Y 方向の平均値。また、

免震層を基準値 1 として表記。

- A_i' : 上記の A_i と同じ分布形であるが、質量が明記されている階のうち、最下階を基準値 1 として表記した値
- 設計 C_i/C_1 : 上部構造の最下階設計用地震層せん断力係数に対する当該層の設計用地震層せん断力係数の比
- 応答 C_i/C_0 : 免震層の最大応答地震層せん断力係数に対する当該層の最大応答地震層せん断力係数の比
- 応答 C_i/C_1 : 上部構造最下階の最大応答地震層せん断力係数に対する当該層の最大応答地震層せん断力係数の比

次ページ以降に、a. 例 1 から e. 例 5 の 5 つの事例についての調査結果を示す。

a. 例 1 16 階建 RC 造免震建築物

本例は、16 階建ての RC 造免震建築物である。免震層は鉛プラグ入り積層ゴム、天然ゴム系積層ゴム及び弾性すべり支承からなる。弾性すべり支承の軸力負担率は全軸力に対して 0.03 となっており、本例におけるすべり支承は補助的に用いられていると考えられる。表 2.3-4 に建物概要を、表 2.3-5 に免震部材の概要を、表 2.3-6 に振動系モデルを、表 2.3-7 にレベル 2 時の応答結果をそれぞれ示す。

表 2.3-8 より 1 階から 3 階までは 4 階以上に対し質量が倍程度異なっている。4 階から上の各階質量はほぼ均一である。なお免震層直上の質量は不明である。地階の剛性は地上部の剛性より 15 倍以上大きい。地上 1 階に対する最上階の剛性比は 0.36 である。

設計用地震層せん断力は、最下階である地階では 0.098、最上階では 0.377 であり、最上階と最下階との比は 3.85 である。応答解析による地震層せん断力係数は、地階で 0.093、最上階で 0.340 となっている。また各階において設計用地震層せん断力係数は応答解析から得られた地震層せん断力係数を少し上回る程度となっている。これより本例における設計用地震層せん断力係数は応答解析の結果に基づき設定された可能性がある。各層の応答 C_i/C_0 と A_i' （上部構造の最下階を基準階とした A_i ）を比較すると、その比は 0.87~1.10 となっており、本例における応答地震層せん断力係数の高さ方向分布は概ね A_i' 分布にて表現されるものとみなせる。また、応答 C_i/C_1 と A_i' との比は 0.91~1.14 となっており、

表 2.3-4 建物概要

地上階数	16
地下階数	1
塔屋	1
軒の高さ(m)	58.32
構造種別	RC
地盤種別	第 2 種

表 2.3-5 免震部材概要

積層ゴム主要外径(mm)	1200
天然ゴム系積層ゴム台数	2
鉛プラグ入り積層ゴム台数	28
高減衰積層ゴム台数	-
弾性すべり支承台数	9
剛すべり支承台数	-

表 2.3-6 振動系モデル

上部構造固有周期(s)	X 方向	1.037	Y 方向	1.044
免震層初期剛性(kN/m)	X 方向	798,568	Y 方向	798,568
摩擦係数	0.136			
すべり支承軸力分担比	0.03			
1 次固有周期(s)	微小変形 X	-	微小変形 Y	-
	レベル 2	4.465	レベル 2	4.467
解析モデル	天然ゴム：Linear，鉛プラグ入り積層ゴム：菊地モデル 弾性すべり支承：Bi-Linear			
減衰	瞬間剛性比例型 1 次固有振動数に対して 0.02			

Ai' と応答地震層せん断力係数の高さ方向分布との対応は比較的良好であった。

表 2.3-7 レベル2 時応答結果

免震部材	最大相対変位(cm)	X	33.2	告示波
		Y	32.8	告示波
	最大地震層せん断力係数	X	0.088	告示波
		Y	0.089	告示波
上部構造	頂部最大絶対加速度 (cm/s)	X	343	EL CENTRO NS
		Y	354	EL CENTRO NS
	最下階の最大地震層せん断力係数	X	0.093	告示波
		Y	0.093	告示波

表 2.3-8 各階の質量・剛性

階	質量(t)	Σm_i	α_i	剛性 K_i (MN/m)	K_i/K_1
R	1,556	1,556	0.050		
16	1,625	3,181	0.102	2,018	0.013
15	1,398	4,579	0.147	5,219	0.033
14	1,448	6,027	0.194	6,384	0.041
13	1,398	7,425	0.239	7,323	0.047
12	1,448	8,873	0.285	7,930	0.051
11	1,398	10,271	0.330	8,335	0.053
10	1,457	11,728	0.377	8,797	0.056
9	1,409	13,137	0.422	9,394	0.060
8	1,460	14,597	0.469	9,691	0.062
7	1,409	16,006	0.514	10,016	0.064
6	1,480	17,486	0.562	10,349	0.066
5	1,374	18,860	0.606	9,935	0.064
4	3,886	22,746	0.731	10,954	0.070
3	2,137	24,883	0.800	6,437	0.041
2	2,807	27,690	0.890	5,727	0.037
1	3,420	31,110	1.000	5,618	0.036
B1	-	-	-	156,394	1.000

表 2.3-9 各階の地震層せん断力係数

階	設計用 C_i	応答 C_i	A_i'	設計 C_i/C_1	応答 C_i/C_0	応答 C_i/C_1	A_i'	A_i'
							応答 C_i/C_0	応答 C_i/C_1
16	0.377	0.340	3.95	3.85	3.82	3.66	1.03	1.08
15	0.323	0.300	3.02	3.30	3.37	3.23	0.89	0.94
14	0.292	0.270	2.64	2.98	3.03	2.90	0.87	0.91
13	0.265	0.240	2.39	2.70	2.70	2.58	0.88	0.92
12	0.245	0.220	2.21	2.50	2.47	2.37	0.89	0.93
11	0.227	0.205	2.06	2.32	2.30	2.20	0.89	0.93
10	0.211	0.200	1.94	2.15	2.25	2.15	0.86	0.90
9	0.197	0.180	1.83	2.01	2.02	1.94	0.91	0.95
8	0.184	0.170	1.74	1.88	1.91	1.83	0.91	0.95
7	0.171	0.160	1.66	1.74	1.80	1.72	0.92	0.97
6	0.161	0.150	1.59	1.64	1.69	1.61	0.94	0.98
5	0.153	0.135	1.51	1.56	1.52	1.45	1.00	1.04
4	0.146	0.120	1.45	1.49	1.35	1.29	1.08	1.13
3	0.125	0.105	1.29	1.28	1.18	1.13	1.10	1.14
2	0.117	0.100	1.21	1.19	1.12	1.08	1.08	1.13
1	0.107	0.098	1.11	1.09	1.10	1.05	1.01	1.06
B1	0.098	0.093	1.00	1.00	1.04	1.00	0.96	1.00
免	-	0.089	-	-	1.00	-		

b. 例2 3階建RC造免震建築物

本例は、3層のRC造免震建築物である。上部構造の1次固有周期は0.2秒程度と短い。免震層は鉛プラグ入り積層ゴム、弾性すべり支承およびオイルダンパーからなる。表2.3-10に建物概要を、表2.3-11に免震部材の概要を、表2.3-12に振動系モデルを、表2.3-13にレベル2時の応答結果をそれぞれ示す。検討地震動に対する免震層最大変位は34cm、免震層の最大応答せん断力係数は0.18となっている。表2.3-14より質量は各階でほぼ均一とみなせる。ただし、免震層直上の質量と各階の剛性は不明である。各階の地震層せん断力係数を表2.3-15に示す。応答 C_i/C_0 において1.0~1.1となっており、上部の地震層せん断力係数の増幅はほとんどみられず、上部はほぼ剛体的に挙動しているものと考えられる。

設計用 C_i/C_1 は1.00~1.35であり、 A_i と近い値となっている。本例では設計用地震層せん断力係数を A_i 分布として設定した可能性がある。 A_i は2層目および3層目ともに応答 C_i/C_0 を上回っている。

表 2.3-10 建物概要

地上階数	3
地下階数	0
塔屋	1
軒の高さ(m)	15.7
構造種別	RC
地盤種別	第1種

表 2.3-11 免震部材概要

積層ゴム主要外径(mm)	1200
天然ゴム系積層ゴム台数	-
鉛プラグ入り積層ゴム台数	8
高減衰積層ゴム台数	-
弾性すべり支承台数	12
剛すべり支承台数	-
オイルダンパー台数	4

表 2.3-12 振動系モデル

上部構造固有周期(s)	X 方向	0.171	Y 方向	0.200
免震層初期剛性(kN/m)	X 方向	495,944	Y 方向	495,944
摩擦係数	0.015			
すべり支承軸力分担比	0.71			
1次固有周期(s)	微小変形 X		微小変形 Y	
	レベル2	3.769	レベル2	3.769
解析モデル	鉛プラグ入り積層ゴム：菊地モデル 弾性すべり支承：Bi-Linear オイルダンパー：Bi-Linear ($c_i=2500\text{kNs/m}$, $V_y=0.32\text{m/s}$)			
減衰	瞬間剛性比例型 1次固有振動数に対して0.02			

表 2.3-13 レベル2 時応答結果

免震部材	最大相対変位(cm)	X	34.6	サイト波
		Y	34.8	サイト波
	最大地震層せん断力係数	X	0.18	サイト波
		Y	0.18	サイト波
上部構造	頂部最大絶対加速度 (cm/s)	X	201	El Centro NS
		Y	232	El Centro NS
	最下階の最大地震層せん断力係数	X	0.182	サイト波
		Y	0.182	サイト波

表 2.3-14 各階の質量

階	質量(t)	Σm_i	α_i
R	1,565	1,565	0.354
3	1,349	2,913	0.659
2	1,506	4,420	1.000
1	-	-	-

表 2.3-15 各階の地震層せん断力係数

階	設計用 C_i	応答 C_i	A_i'	設計 C_i/C_1	応答 C_i/C_0	応答 C_i/C_1	$\frac{A_i'}{\text{応答 } C_i/C_0}$	$\frac{A_i'}{\text{応答 } C_i/C_1}$
3	0.270	0.200	1.31	1.35	1.099	1.099	1.19	1.19
2	0.240	0.182	1.13	1.20	1.000	1.000	1.13	1.13
1	0.200	0.182	1.00	1.00	1.000	1.000	1.00	1.00
免	0.200	0.182	-	-	1.000	-		

c. 例4 16階建RC造免震建築物（第1種地盤）

本例は、第1種地盤に立地するRC造16階建ての免震建築物である。免震層は鉛プラグ入り積層ゴムと弾性すべり支承からなる。表2.3-16に建物概要を、表2.3-17に免震部材の概要を、表2.3-18に振動系モデルをそれぞれ示す。弾性すべり支承の軸力負担率は、全体に対して35%を占める。表2.3-19にレベル2時の応答結果を示す。表2.3-20に各階の質量および剛性を示す。免震層直上の質量を除けば、各階とも均一な質量分布となっている。剛性分布は、最下階の剛性を1とすれば0.12~1.35である。

表2.3-21に示す各階の地震層せん断力係数より応答 C_i/C_1 は1.0~4.22となっている。 A_i' は1.0~2.95である。各階において A_i' と応答 C_i/C_1 を比較すると0.59~1.0となり、本例では A_i' 分布の方が実応答の地震層せん断力係数分布よりも小さめの値となった。

表 2.3-16 建物概要

地上階数	16
地下階数	-
塔屋	1
軒の高さ(m)	47.80
構造種別	RC
地盤種別	第1種

表 2.3-17 免震部材概要

積層ゴム主要外径(mm)	900
天然ゴム系積層ゴム台数	-
鉛プラグ入り積層ゴム台数	9
高減衰積層ゴム台数	-
弾性すべり支承台数	5
剛すべり支承台数	-

表 2.3-18 振動系モデル

上部構造固有周期(s)	X 方向	0.848	Y 方向	1.216
免震層初期剛性(kN/m)	X 方向	211,952	Y 方向	211,952
摩擦係数	0.01			
すべり支承の軸力分担比	0.35			
1次固有周期(s)	微小変形 X	-	微小変形 Y	-
	レベル2	4.00	レベル2	4.07
解析モデル	鉛プラグ入り積層ゴム：修正HDモデル 弾性滑り支承：Bi-Linear			
減衰	瞬間剛性比例型 1次固有振動数に対して0.03			

表 2.3-19 レベル2 時応答結果

免震部材	最大相対変位(cm)	X	38.5	告示波
		Y	34.2	告示波
	最大地震層せん断力係数	X	0.081	告示波
		Y	0.080	告示波
上部構造	頂部最大絶対加速度 (cm/s)	X	282	El CentroNS
		Y	177	Hachinohe NS
	最下階の 最大地震層せん断力係数	X	0.081	告示波
		Y	0.083	告示波

表 2.3-20 各階の質量・剛性

階	質量(t)	Σm_i	α_i	剛性 K_i (kN/m)	K_i/K_1
R	655	655	0.065		
16	618	1273	0.126	702000	0.122
15	618	1891	0.187	1080600	0.188
14	618	2509	0.248	1398400	0.243
13	618	3128	0.310	1691000	0.294
12	618	3746	0.371	1964800	0.342
11	618	4364	0.432	2234100	0.389
10	618	4982	0.493	2519300	0.438
9	618	5601	0.554	2809200	0.489
8	618	6219	0.616	3133000	0.545
7	618	6837	0.677	3519700	0.612
6	622	7459	0.738	3954800	0.688
5	624	8083	0.800	4512700	0.785
4	630	8714	0.863	5190700	0.903
3	633	9346	0.925	6236900	1.085
2	756	10102	1.000	7752700	1.349
1	1934	12036	1.191	5748700	1.000

表 2.3-21 各階の地震層せん断力係数

階	応答 C_i	A_i'	応答 C_i/C_0	応答 C_i/C_1	A_i' ―― 応答 C_i/C_1
16	0.343	2.947	4.217	4.218	0.70
15	0.315	2.356	3.871	3.871	0.61
14	0.286	2.070	3.514	3.515	0.59
13	0.258	1.886	3.173	3.173	0.59
12	0.233	1.750	2.859	2.859	0.61
11	0.209	1.641	2.573	2.574	0.64
10	0.188	1.549	2.313	2.314	0.67
9	0.169	1.469	2.074	2.074	0.71
8	0.150	1.397	1.850	1.850	0.76
7	0.133	1.332	1.639	1.640	0.81
6	0.120	1.271	1.472	1.473	0.86
5	0.111	1.214	1.362	1.362	0.89
4	0.102	1.160	1.259	1.259	0.92
3	0.095	1.108	1.162	1.163	0.95
2	0.087	1.058	1.074	1.074	0.99
1	0.081	1.000	1.000	1.000	1.00
免	0.081	0.861	1.000	1.000	0.86

d. 例4 6階建RC造免震建築物

本例は、6階RC造免震建築物である。免震層は鉛プラグ入り積層ゴムと弾性すべり支承から構成されている。上部構造の1次固有周期は0.3秒程度である。表2.3-22に建物概要を、表2.3-23に免震部材の概要を、表2.3-24に振動系モデルを、表2.3-25にレベル2時応答結果を、表2.3-26に各階の剛性および質量をそれぞれ示す。表2.3-27より応答地震層せん断力係数は頂部においても0.168となっている。応答 C_i/C_0 は0.99~1.46の間に分布し、上階への地震層せん断力係数の増加は比較的小さい。 A_i を応答 C_i/C_0 にて除した値は1.0から1.37であり、 A_i は実応答の増幅よりも大きめの値となっている。

表 2.3-22 建物概要

地上階数	6
地下階数	1
塔屋	-
軒の高さ(m)	19.97
構造種別	RC

表 2.3-23 免震部材概要

積層ゴム主要外径(mm)	800
天然ゴム系積層ゴム台数	-
鉛プラグ入り積層ゴム台数	32
高減衰積層ゴム台数	-
弾性すべり支承台数	10

表 2.3-24 振動系モデル

上部構造固有周期(s)	X 方向	0.308	Y 方向	0.212
免震層初期剛性(kN/m)	X 方向	424,000	Y 方向	424,000
摩擦係数	0.015			
すべり支承の軸力分担比	0.294			
1次固有周期(s)	微小変形 X	-	微小変形 Y	-
	レベル2	3.140	レベル2	3.134
解析モデル	鉛プラグ入り積層ゴム：修正HDモデル 弾性滑り支承：Bi-Linear ：			
減衰	瞬間剛性比例型 1次固有振動数に対して0.03			

表 2.3-25 レベル 2 時応答結果

免震部材	最大相対変位(cm)	X	29.1	告示波
		Y	29.1	告示波
	最大地震層せん断力 係数	X	0.115	告示波
		Y	0.134	告示波
上部構造	頂部最大絶対加速度 (cm/s)	X	203	告示波
		Y	134	告示波
	最下階の最大地震 層せん断力係数	X	0.114	
		Y	0.139	

表 2.3-26 各階の質量・剛性

階	質量(t)	Σm_i	α_i	剛性 Ki(kN/m)	Ki/K ₀
R	1,251	1,251	0.081	3279000	0.114
6	1,754	3,005	0.194	5395000	0.188
5	2,063	5,068	0.327	8472000	0.294
4	2,377	7,445	0.481	11400000	0.396
3	2,282	9,727	0.628	14310000	0.497
2	2,340	12,067	0.779	28770000	1.000
1	3,417	15,484	1.000		

表 2.3-27 各階の地震層せん断力係数

階	設計用 C _i	応答 C _i	A _i	設計 C _i /C ₁	応答 C _i /C ₀	応答 C _i /C ₁	$\frac{A_i}{\text{応答 } C_i/C_0}$
6	0.270	0.168	2.004	2.077	1.461	1.473	1.37
5	0.213	0.141	1.606	1.638	1.224	1.234	1.31
4	0.182	0.126	1.415	1.400	1.100	1.109	1.29
3	0.161	0.114	1.281	1.238	0.994	1.003	1.29
2	0.144	0.114	1.185	1.108	0.988	0.997	1.20
1	0.130	0.114	1.103	1.000	0.991	1.000	1.11
免		0.115	1.000		1.000		1.00

e. 例5 14階建RC造免震建築物

本例は、地上14階地下2階のSRC造建物である。免震層は鉛プラグ入り積層ゴムのみからなる。基礎固定時の上部構造1次固有周期は2秒である。表2.3-28に建物概要を、表2.3-29に免震部材の概要を、表2.3-30に振動系モデルを、表2.3-31にレベル2時応答結果を、表2.3-32に各階の剛性および質量をそれぞれ示す。免震層の最大変位は約28cm、最大せん断力係数は0.105である。設計 C_i/C_1 は1.0から2.70となっており、 A_i' の値と各層で同様な数値となっていることから、設計用地震層せん断力係数は A_i' 分布により設定した可能性がある。また応答 C_i/C_1 と A_i の比は0.97から1.09となっており、 A_i' 分布と実応答の地震層せん断力係数の分布がよく対応している。

表 2.3-28 建物概要

地上階数	14
地下階数	2
塔屋	1
軒の高さ(m)	57.95
構造種別	SRC
地盤種別	第2種

表 2.3-29 免震部材概要

積層ゴム主要外径(mm)	1000
天然ゴム系積層ゴム台数	-
鉛プラグ入り積層ゴム台数	22
高減衰積層ゴム台数	-
弾性すべり支承台数	-
剛すべり支承台数	-

表 2.3-30 振動系モデル

上部構造固有周期(s)	X方向	1.96	Y方向	2.03
免震層初期剛性(kN/m)	X方向	465,940	Y方向	465,940
摩擦係数	-			
すべり支承の軸力分担比	-			
1次固有周期(s)	微小変形 X	2.64	微小変形 Y	2.70
	レベル2	3.66	レベル2	3.70
解析モデル	鉛プラグ入り積層ゴム：修正HDモデル ： ：			
減衰	瞬間剛性比例型 1次固有振動数に対して0.02			

表 2.3-31 レベル2 時応答結果

免震部材	最大相対変位(cm)	X	27.7	告示波
		Y	26.0	告示波
	最大地震層せん断力係数	X	0.105	告示波
		Y	0.105	告示波
上部構造	頂部最大絶対加速度 (cm/s)	X	295	El Centro NS
		Y	331	Taft EW
	最下階の最大地震 層せん断力係数	X	0.105	告示波
		Y	0.105	告示波

表 2.3-32 各階の質量・剛性

階	質量(t)	Σm_i	α_i	剛性 K_i (kN/m)	K_i/K_0
R	1,317	1,317	0.098	281357	0.015
14	732	2,049	0.153	471790	0.026
13	698	2,747	0.205	497187	0.027
12	700	3,447	0.257	521661	0.028
11	702	4,149	0.309	531835	0.029
10	706	4,854	0.362	553427	0.030
9	707	5,562	0.415	572312	0.031
8	714	6,276	0.468	620490	0.034
7	718	6,994	0.522	641513	0.035
6	721	7,714	0.575	662964	0.036
5	724	8,438	0.629	713596	0.039
4	727	9,165	0.684	745562	0.040
3	793	9,959	0.743	788898	0.043
2	1,200	11,159	0.832	1181996	0.064
1	2,250	13,408	1.000	18481434	1.000
B1	1,693	15,101			

表 2.3-33 各階の地震層せん断力係数

階	設計用	応答	Ai'	設計	応答	応答	Ai'
	Ci	Ci		Ci/C ₁	Ci/C ₀	Ci/C ₁	応答 Ci/Ci
14	0.324	0.241	2.77	2.700	2.295	2.654	1.04
13	0.279	0.217	2.37	2.325	2.066	2.389	0.99
12	0.252	0.195	2.15	2.100	1.861	2.152	1.00
11	0.233	0.175	1.98	1.942	1.670	1.932	1.02
10	0.218	0.158	1.85	1.817	1.502	1.737	1.07
9	0.206	0.145	1.74	1.717	1.379	1.594	1.09
8	0.195	0.143	1.65	1.625	1.361	1.574	1.05
7	0.185	0.140	1.57	1.542	1.335	1.544	1.02
6	0.177	0.136	1.49	1.475	1.297	1.500	1.00
5	0.169	0.132	1.42	1.408	1.253	1.449	0.98
4	0.161	0.127	1.36	1.342	1.208	1.397	0.97
3	0.154	0.122	1.30	1.283	1.159	1.340	0.97
2	0.147	0.116	1.24	1.225	1.103	1.275	0.97
1	0.137	0.106	1.15	1.142	1.014	1.172	0.98
B1	0.120	0.091	1.00	1.000	0.865	1.000	1.00
免	-	0.105			1.000		

(3) まとめ

性能評価シートよりも詳細な情報を含む 5 例の設計事例から、特に各階の地震層せん断力係数に関する分析を実施した。設計用地震層せん断力係数は、応答解析に基づいて設定されているものもあれば、Ai 分布として地震層せん断力係数の高さ方向分布を設定していると見なされる事例もみられた。応答結果における地震層せん断力係数の高さ方向分布と Ai 分布との比較を実施し、6 階以下の比較的低層の建物では、Ai 分布は実際の応答よりも同等もしくはやや大きめの評価となった。また 14 階以上の高層建物では、Ai 分布は実際の応答よりも同等もしくはやや過小評価となる傾向がみられた。ここで求めた Ai 分布は告示第 2009 号による分布よりも大きく評価されるため、上部構造が高層の場合、告示第 2009 号による地震層せん断力係数分布は実応答に対して過小評価となることが考えられる。

2-3-3 免震部材種別による水平特性の変動に関する調査結果

免震建築物の応答値を求めるにあたっては、各種免震部材の基準値に対する特性変動を考慮する必要があり、告示第 2009 号においてもこれを考慮することとなっている。

各免震部材の特性変動要因は、

- ①製造ばらつき
- ②環境温度
- ③経年劣化
- ④面圧、速度依存（すべり支承のみ考慮）

などである。よって、ここでは種々の免震部材からなる免震層の復元力特性における変動幅の整理を実施した。この調査結果は、免震部材の各製造会社発行の技術資料³⁾および国土交通大臣の認定を受けた免震部材について告示第 1446 号で要求する性能（基準値）を掲載した一般社団法人日本免震構造協会発行の免震部材標準品リスト-2005-⁴⁾に基づいている。詳細は付録 1 にて別掲する。なお転がり系支承については摩擦係数が小さいことから、本検討では検討対象外としている。文献 4)は発刊後 8 年が経過しており、現状の特性変動の基準値は、製造実績等の反映から文献 4)の値から変化している可能性がある。よってここで示す特性変動値は、目安としての参考資料の位置づけであることを付記する。免震部材構成別の力学特性変動幅の目安値を表 2.3-34～36 に示す。本検討より以下のことがわかった。

- a. 層全体の 2 次剛性のばらつき幅は、積層ゴムの剛性のばらつきに等しくなる。弾塑性ダンパーを用いる場合は、弾塑性ダンパーの 2 次剛性のばらつきは 0 と評価されているために、免震層全体の 2 次剛性のばらつき幅はさらに小さくなる。ばらつき幅は±30%以内となる。ただし、HDR は等価剛性で評価されており、そのばらつき幅は+50%～-30%となっている。
- b. 減衰機構を有する免震装置の切片荷重および摩擦係数の基準値に対するばらつき幅の比率は、弾塑性系ダンパー<LRB<すべり系支承の順に大きくなっている。これらの装置が組み合わさる場合には、水平力の負担比率により層全体の切片荷重のばらつき幅が変化する。ビルディングレターの性能評価シートに示された上記装置を組み合わせた例において免震層全体の切片荷重のばらつき幅は±40%程度であった。

以上のばらつき幅は 3 章の層せん断力の設定に用いた免震層のパラメータに対して影響の大きな値となっており、設計用地震層せん断力の設定においては、パラメータ変動を別途考慮する必要がある。

表 2.3-34 免震層復元力特性値のばらつき幅（積層ゴムのみ）

特性		・LRBのみ ・NR+LRB	・HDRのみ*
2次剛性	＋側	0.26～0.31	—
	－側	-0.15～-0.30	—
切片荷重	＋側	0.33～0.44	—
	－側	-0.27～-0.31	—
等価水平剛性	＋側	—	0.37～0.51
	－側	—	-0.12～-0.27
等価減衰定数	剛性＋側	—	-0.06～-0.16
	剛性－側	—	-0.01～+0.12

* 等価水平剛性と等価減衰定数のばらつきは独立に変化しないため、等価水平剛性の変化率の最大・最小を示し、それに対応する等価減衰定数の変化率を示した。

表 2.3-35 免震層復元力特性値のばらつき幅（積層ゴム+すべり）

特性		・NR+すべり	・LRB+すべり ・NR+LRB+すべり
2次剛性	＋側	0.21～0.30	0.26～0.31
	－側	-0.12～-0.20	-0.15～-0.30
切片荷重	＋側	0.60～1.17（低摩擦） 0.46～0.70（高摩擦）	負担力割合による 検討例:0.41
	－側	-0.65～-0.89（低摩擦） -0.58～-0.85（高摩擦）	負担力割合による。 検討例:-0.37

表 2.3-36 免震層復元力特性値のばらつき幅（弾塑性ダンパーを有する場合）

特性		・NR+ 弾塑性系ダンパー	・NR+LRB+ 弾塑性系ダンパー	・積層ゴム+ すべり支承+ 弾塑性系ダンパー
2次剛性	＋側	～0.31	0.26～0.31	0.26～0.31
	－側	～-0.30	-0.15～-0.30	-0.15～-0.30
切片荷重	＋側	0.20程度	～0.44	負担力割合による 検討例:0.37
	－側	-0.13～-0.17	～-0.31	負担力割合による 検討例:-0.32