

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：24860010

研究課題名(和文)鉛直動下における免震建物の機能保持性能評価の基礎的研究

研究課題名(英文) Fundamental study of functionality evaluation of base-isolated buildings under vertical motions

研究代表者

古川 幸 (Furukawa, Sachi)

東北大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：30636428

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,400,000円、(間接経費) 720,000円

研究成果の概要(和文)：実記録の収集、実大振動台実験、数値解析を通して、以下の知見を得た。実記録によると、免震建物の鉛直加速度応答倍率は、6倍以上になる可能性がある。免震建物の鉛直応答特性は、免震層、柱、床の3つの要素の組み合わせで把握が可能である。したがって、鉛直応答倍率を推定する指標として、免震層、柱、床の固有周波数の組み合わせが考えられる。低層の免震建物では、免震層と床の固有周波数が近い条件で鉛直床応答が大きくなる傾向にある。一方、中層以上では、床の固有周波数が小さいほど鉛直床応答が大きくなる傾向にある。特に床の固有周波数が、他の2つ以下となる場合、鉛直床応答は急激に上昇するため注意が必要である。

研究成果の概要(英文)：According to results of collecting on-site records, full-scale shaking table tests and analytical simulation of base-isolated buildings, the followings are found to be major conclusions: (1) According to on-site records, the vertical floor acceleration amplification may exceed 6. (2) According to on-site records, major amplification in the vertical direction of base-isolated buildings is due to a superstructure rather than a base isolation layer. (3) The trend of the vertical dynamic response characteristics of base-isolated buildings can be represented by the combinations of the natural frequencies of the base isolation layer, the columns and the slab. (4) The vertical floor response becomes larger for the low-rise buildings when the natural frequencies of the slab and the base isolation layer are close to each other. On the other hand, the vertical floor response becomes larger for the mid-to-high-rise buildings when the natural frequency of the slab is the smallest among three.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築構造・材料

キーワード：免震 鉛直動 機能保持性能 床振動

1. 研究開始当初の背景

「免震」は、震災時における建物内部の「機能保持」を可能にする構造形式として広く社会に認識されており、兵庫県南部地震以来、官庁、病院、情報センターなどの数多くの重要建物で採用されてきた。しかし、免震構造には「機能保持」性能が低下する可能性のある課題として鉛直地震動である。

「鉛直動」は、機能保持の観点からもこれまで問題視されてこなかった。従来基礎緊結型の建物の場合、地震時における建物の水平加速度応答が非常に大きくなり、鉛直動の有無にかかわらず建物内部における機能保持は困難であるためである。一方、「免震」化された建物では、水平加速度応答が大きく低減されることから、「鉛直動」の「機能保持」性能低下に対する寄与は、文字通り顕在化する。

近い将来の発生が予測されている首都直下型地震では、内陸部の比較的浅い位置での発生も予測されており、「免震」建物が多く採用されている都心部で、加速度振幅が大きい鉛直地震動が発生する可能性は高い。「免震」建物の「機能保持」性能への社会的な期待値は非常に高いものがあり、免震効果が期待できない鉛直動下における免震建物の室内機能保持性能を把握することは、早急に取り組むべき必須の課題である。

2. 研究の目的

本研究では、建物条件(規模・質量・剛性分布)に応じた「鉛直動下における免震建物の鉛直床加速度応答特性の把握」を最終目的とした、基本情報の収集、傾向の把握を目的とする。

3. 研究の方法

本研究では、以下の5項目の検討を行うことにより、所定の成果を得た。

(1)46棟の免震建物の鉛直応答の収集・解析
鉛直動の影響は実大実験で観察されたが、耐震工学においては「実際にフィールドで観察された」ことに勝るデータは存在しない。日本は世界的に見ても免震普及の先進国であり、地震が頻繁に発生することから、多くの免震建物について地震時における免震建物の挙動観測結果を得ることができる希少な国でもある。そこで、これまでの学会誌や民間誌、被害調査報告書等に発表された免震建物の鉛直応答に関するデータの収集・解析を行った。

(2)免震建物を構成する要素(免震-柱-床)と鉛直加速度応答倍率の関係のパラメトリックスタディーによる把握

本項では、免震建物を構成する要素を、「免震層」「柱」「床」の3つに分け、それぞれの応答を代表質点で表現し、建物条件(規模・質量・剛性分布)の一般化を行った。まず、3要素各々における鉛直加速度応答倍率の条件別一般化を行った。そして、3つの要素が組み合わさったモデルを用い、建物条件(規模・質量・剛性分布)に応じた鉛直動下における免

震建物の鉛直床加速度応答特性の把握を行った。

(3)実大建物を用いた震動台実験結果の解析的検討

平成25年までに2棟の実大免震建物について振動台実験が行われている。1棟は上部構造が鉄筋コンクリート構造で免震層は積層ゴムだけで構成されており、もう1棟は上部構造が鋼構造で免震層は積層ゴムと滑り支承で構成されており、それぞれ条件が異なる。また、前者は1スパン-1スパン建物であるが、後者は2スパン-2スパン建物であり、より床鉛直応答が複雑な一般建物の応答に近い条件となっている。そこで、そこで(2)で行った免震建物鉛直応答の概略的把握(1次応答のみで評価)を、より実建物に近い本実験結果で検証した。

(4)免震層-床簡易試験体を用いた免震建物の減衰性状の把握

(3)の検証でも問題になったのが、免震建物の減衰性状がある。そこで簡易的に免震層と床だけで構成された試験体を作成し、振動台実験を行い、傾向を把握した。

(5)東北大学工学研究科免震新棟の常時微動計測による鉛直応答性状の把握

本項目は、簡略化のために1次モードのみを対象として検討した(2)の知見が、複数のモードが複雑に卓越する実建物においても適用可能かの検証を目的とする。残念ながら本研究の計画の段階では、本研究期間中(H24.4-H26.3)に竣工予定であったが、施工現場の大幅な遅れから、期間内での実験実施はできなかった。ここでは本研究期間中に行った実験計画のみ紹介する。

4. 研究成果

まず、3章で列挙した5項目別に、その成果概要を説明する。

(1)46棟の免震建物の鉛直応答の収集・解析
申請者が手に入れることができた免震建物の鉛直応答を46棟についての情報を整理・解析を行った。

図1,2に収集したデータの一部を示す。図1は免震建物における加速度増幅倍率であり、図2は免震建物の鉛直固有周波数である。本検討項目の主な知見を以下に列挙する。

鉛直加速度応答について:

(-a) 水平加速度入力 1 m/s^2 以上である場合には入力に対する加速度増幅倍率は1倍以下におさまり、上部構造での加速度増幅倍率はおおよそ1-2倍程度であった。一方、鉛直応答では、免震層での増幅は1-2倍程度であるが、屋上階もしくは最上階への鉛直加速度増幅倍率は1-3倍程度となっており、建物によっては6倍以上に達した。

(-b) 鉛直加速度応答の増幅は、免震層よりも、上部構造における増幅の方が顕著といえる。

(-c) 鉛直加速度増幅倍率が6.4倍、5.1倍、3.倍に達した建物では、センサーが床中

央に位置していたことが推察可能である。これより、上部構造のうち、床振動の鉛直加速度増幅への寄与が大きいといえる。前述の通り床中央で計測した事例が少ないため、実際は図1よりも個々の建物内における最大の鉛直加速度応答倍率は大きいものであった可能性が高い。

鉛直固有周波数について：

(-a) 46 棟の免震建物のうち鉛直固有周波数を得ることができた 22 棟鉛直固有周波数は、4-17Hz の範囲に分布しており、うち 36% が 6-8Hz の範囲であった。これは鉄骨鉄筋コンクリート建物の床固有周波数(一般的には 10Hz 以上)よりも低めであり、免震層の影響がうかがえる。

(-b) もっとも低い鉛直固有周波数 4Hz を記録したのは 20 階建ての免震建物であり、その他の中高層免震建物の鉛直固有周波数は全て 8 Hz 以下であった。これは建物の層数が鉛直固有周波数に影響する可能性を示唆する。

鉛直加速度応答特性について：

鉛直固有周波数を得ることができた建物のうち 6 棟については、免震層の固有周波数を得ることができた。免震層の固有周波数とは、上部構造を剛体としたときの免震層の剛性によって決定する免震建物の固有周波数 F_{BI} である。

(-a) このうち 3 棟については、免震層の固有周波数 F_{BI} と免震建物の固有周波数がほぼ同様であり、かつ 1 次が大きく卓越した。

(-b) 一方、のこりの 3 棟のうち 1 棟については長スパンの床を有する建物であり、複数のモードが卓越した。報告者は詳細な検討を行い、この免震建物では床の固有周波数が免震建物の各固有周波数を決定したと結論付けている。

以上から、免震建物応答特性を決定づける要素として、免震層の固有周波数 F_{BI} 、床の固有周波数 F_S の影響が大きいと考えられる。また、層数が増えることで固有周波数が小さくなる傾向を示したことから、柱の影響も無視できないと考えられる。

(2)免震建物を構成する要素(免震-柱-床)と鉛直加速度応答倍率の関係のパラメトリックスタディーによる把握

(1)の検討からもわかったように、免震建物の鉛直加速度応答増幅率を決定する要素として、主に以下の三つが挙げられる。

免震層のモード

上部構造全体を剛としたときの免震層の剛性と上部構造の重量で決定するモード。対応する免震層の固有周波数は F_{BI}

柱のモード

上部構造のみを考慮したとき、各層の床を剛体としたときの柱の剛性で決定されるモード。対応する柱の固有周波数は F_C

床のモード

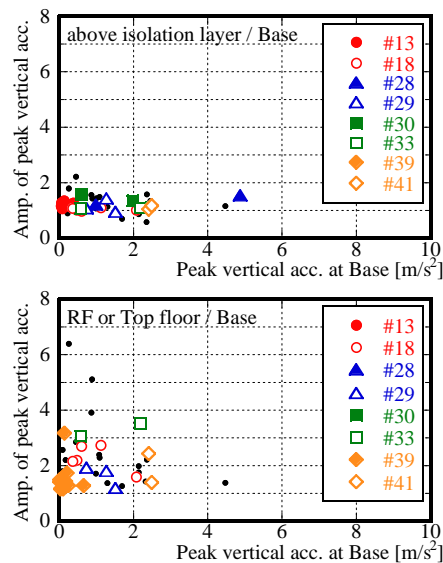


図1 免震建物における鉛直加速度増幅倍率

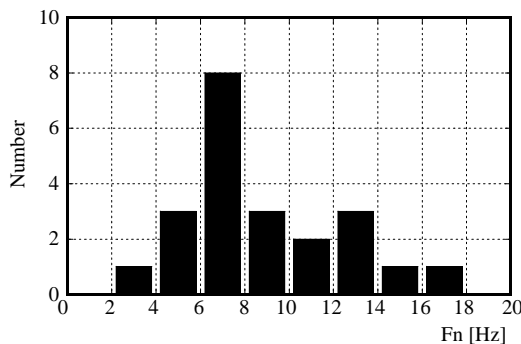


図2 免震建物の鉛直固有周波数

床が鉛直支持部材部で支持されている場合の、床単体のモード。対応する床の固有周波数は F_S

これらのモードの固有周波数の比を、建物の鉛直応答特性を決定する指標とし、鉛直応答特性の傾向をパラメトリック・スタディーによって評価した。その前準備として、1 質点に縮約した各モードにおける鉛直応答倍率比(最大となる点の鉛直応答倍率と等価 1 質点の鉛直応答倍率の比)を、解析によって検討した。

各要素における鉛直応答倍率：

(-a) 免震層のモードはもともと 1 質点であることから、鉛直応答倍率の検証は必要がない。

(-b) 柱のモードは、上部構造の層数だけモードの数が生じる。ここでは 1 次モードのみ考慮する。各層同じ重量、同じ剛性の無限に層がある建物の鉛直応答倍率比は、Rayleigh 法によって算定可能であり、1.28 である。数値解析を行うと、4 層で 1.25、10 層で十分に 1.28 に近づくことが分かった。

(-c) 床のモードは、最も複雑であるが、ここでは 1 スパン-1 スパンの床をまず対象とした。そして、床周囲の梁の剛性によって鉛直応答倍率比がどこまで上昇するかの検討を数

値解析によって検討した。その結果は以下の通りである。

- ・4 隅でピン支持された長方形の床の鉛直応答倍率比は、2 端でピン固定された梁部材の鉛直応答倍率比とほぼ等しくなり、1.27 倍となる。これが最も小さい鉛直応答倍率比であることを考えると、柱のモードによる増幅に比べ、床の鉛直応答増幅への寄与が如何に大きいか分かる。

- ・長方形断面においても、正方形断面においても周囲の梁の剛性が上がるにつれ、鉛直応答倍率比が上昇することが分かった。その大きさは、一般的なサイズの梁の場合には 1.63 倍、無限に硬い梁の場合は 1.72 まで増幅することが分かった。以上からも 3 つのモードのうち、床の鉛直応答増幅への寄与が如何に大きいか分かる。

つまり、この床における床の鉛直応答増幅を抑えることが、鉛直加速度応答を抑えるカギとなるといえる。

各要素の相対関係と鉛直応答倍率

そこで、各モードを 1 質点に縮約したモデルを使用し、各モードの全体系への寄与を各モードの固有周波数の相対関係を指標とし、系全体の鉛直応答倍率を求めた。以下に得た知見を列挙する。

(-a) 免震層直上の層の重量が建物全体に対して相対的に大きくなる低層建物においては、免震層と床の固有周波数が近い条件で、床の鉛直応答倍率が最も大きくなることが分かった。この条件が当てはまるのは、1 層~2 層建物のみである。

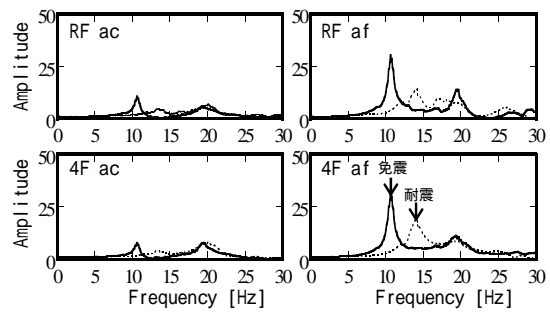
(-b) 3 層以上の建物については、床の固有周波数が 3 つのモードのうち相対的に最も小さくなる条件において、床の鉛直応答倍率が最も大きくなることが分かった。この条件によると、1 次モードが卓越する条件では、免震建物よりも免震層がない耐震の方が床の鉛直応答倍率が大きくなることを示している。

(-c) 3 層以上の建物については、床の固有周波数が免震層の固有周波数と等しくなる付近、もしくは床の固有周波数が柱の固有周波数と等しくなる付近で最も床の鉛直応答倍率に大きな変化が生じる。したがって、床の固有周波数が免震層の固有周波数以下もしくは柱の固有周波数以下となる場合は、床の鉛直加速度応答が大きくなる可能性が高い。

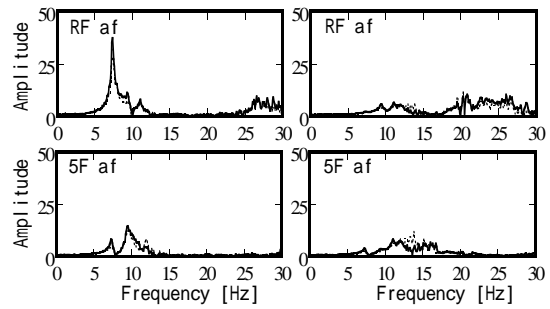
各要素の固有周波数の範囲：

より、各固有周波数が近くなる場合に床の鉛直応答倍率が大きくなることが分かった。各固有の範囲については項目(1)と同様今後も情報の収集が必要な課題であるが、おおむね以下のような考察が可能である。

積層ゴムの鉛直剛性の水平剛性に対する比は 2000~3000 程度であり、水平固有周期を 2~5 秒とすると、鉛直固有周波数は 9~30Hz 程度となる。一方、床の固有周波数は構造形式にもよるが 5 ~20 Hz 程度である。以上から、床と免震層の固有周波数は、非常に近い範囲にあることから、得た知見は十分に適用可



(a) 4層RC構造免震建物



(b) 5層S構造免震建物

図3 免震試験体の鉛直加速度応答倍率

表1 免震試験体各要素の固有周波数

(a) 4層RC構造免震建物

	slab F_S		column F_C	base isolation F_{BI}
	fix	pin		
RF	19.6	14.2	46.5	20.3
4F	18.7	13.1		
3F	18.7	13.8		
2F	20.0	14.4		
1F	23.7	16.6		

(b) 5層S構造免震建物

	slab F_S		column F_C	base isolation F_{BI}
	fix	pin		
RF	13.4	8.7	16.3	-
5F	13.1	9.8		
4F	13.3	10.2		
3F	13.8	10.5		
2F	13.8	10.5		

能と考えられる。

(3) 実大建物を用いた震動台実験結果の解析的検討

項目(2)で得た知見はあくまで各階に渡って複数個あり、複雑なモードを持つ床を 1 質点に縮約した、極めて単純な条件下での知見である。この知見の一般的に評価するため、実大の免震建物を用いた震動台実験結果を検討した。前述の通り、1 棟は上部構造が鉄筋コンクリート構造で免震層は積層ゴムだけで構成されており、もう 1 棟は上部構造が鋼構造で免震層は積層ゴムと滑り支承で構成されており、それぞれ条件が異なる。また、前者は 1 スパン-1 スパン建物であるが、後者は 2 スパン-2 スパン建物であり、より床鉛直応答が複雑な一般建物の応答に近い条件となって

いる。

鉛直応答倍率の比較(実験結果)：

図 3 に 2 棟の免震建物の鉛直応答倍率(抜粋)を示す。以下に主な知見を列挙する。

(-a) 4 層 RC 免震建物、5 層 S 構造免震建物ともに、柱付近から床中央にかけて大きな増幅が見られた。1 例を挙げるならば、JMA 神戸波(1995 年兵庫県南部地震)入力時に 4 層 RC 免震建物においては、振動台から柱付近まで 2 倍、柱付近から床中央にかけて 2.5 倍に増幅した。

(-b) 免震層を積層ゴムのみで構成されている 4 層 RC 免震建物においては耐震の場合に対して免震の場合では固有周波数が顕著に下がり、また 1 次モードが高次モードから独立、卓越した。一方、免震層を積層ゴムの他、滑り支承で構成されている 5 層 S 構造免震建物では、耐震、免震ともに鉛直応答倍率は同様であった。

(-c) 鉄骨造である 5 層 S 構造免震建物の方が減衰が小さくなった。

各モードの固有周波数の同定(数値解析)：

項目(2)で得た知見を基に、本試験体についても免震層、柱、床の固有周波数を数値快適によって推定した。数値解析モデルの構築においては、本試験体の詳細な 3D モデルを作成し、実験結果と比較することで調整を行った。ここで、剛床仮定が成立する水平応答と比較して格段に複雑になる鉛直応答においても、コンクリートのヤング係数の調節という微調整のみで免震、耐震(上部構造のみ)試験体の固有周波数に合わせることができたことは特筆に値する。

以上から作成した数値解析モデルを用いて推定した各要素の固有周波数を表 1 に示す。主な知見を以下に列挙する。

(-a) 4 層 RC 免震建物では 4 層の、5 層 S 構造免震建物では R 層の床の固有周波数が最も小さくなった。これはそれぞれの試験体において 1 次モードで最も卓越した層と一致する。

(-b) 4 層 RC 免震建物では、柱の固有周波数が相対的にかなり大きいため、鉛直応答増幅にはあまり寄与しないと考えられる。一方で、5 層 S 構造免震建物の柱の固有周波数は前者に比べて比較的柱の固有周波数が床の固有周波数に近く、応答への寄与も大きいと考えられる。

(-c) 4 層 RC 免震建物では床の固有周波数(2 層以上)が 13.1~14.2Hz の範囲でばらついたが 1 次モードが大きく卓越した。一方、5 層 S 構造免震建物は床の固有周波数(2 層以上)が 8.7~10.5Hz の範囲でばらつき、かつ最も固有周波数の低かった最上層と、2 番目に低かった 5 層の床の振動が卓越するモードが見られた。

(-d) 5 層 S 構造免震建物については数値解析の他、米国や英国の鋼構造協会 AISC や SCI が発行する指針に従って床固有周波数を計算した。その結果、数値解析結果を良い対応を

示した。元々常時の床振動が問題になりやすい鋼構造では床振動の研究が盛んに行われているが、当分野で提案されている床固有周波数の計算方法を使用することで、簡便に床固有周波数を求めることが可能であることが分かった。

免震層が鉛直応答倍率に与える影響：

4 層 RC 免震建物では、上部構造のみの耐震構造に対して、免震構造の場合では 1 次モードが他のモードから独立し、卓越するという現象が見られた。これは、項目(2)で得た知見に反する。そこで、詳細な検討を行うため、試験体を模した詳細な数値解析モデルを用いて、免震層の支持条件や剛性を変化させた検討を行った。その結果、以下の知見を得た。

(-a) 耐震から免震に鉛直応答倍率が増加する現象は、免震層の剛性には関係せず、系全体の減衰が上昇したためである。この理由は、項目(4)の検討項目とする。

(-b) 減衰が建物の支持条件によって変化しない条件では、耐震建物が免震建物になることで鉛直応答倍率が大きくなることはないことを確認した。これは、項目(2)で得た知見が、実建物により近い条件においても適用可能であることを示す。

(-c) 免震建物としての鉛直床加速度応答が大きくなる目安は、床の固有周波数 F_S が免震層の固有周波数 F_{B1} 以下となる条件であった。これもやはり項目(2)で得た知見と同様であり、項目(2)で得た知見が、実建物により近い条件においても適用可能であることを示す。

(4)免震層-床簡易試験体を用いた免震建物の減衰性状の把握

項目(3)で指摘があった通り、4 層 RC 免震建物では耐震よりも免震で減衰が小さくなり、免震で鉛直応答倍率が增大するという結果を得た。逆の現象であれば免震層を構成する積層ゴムの影響と考えることができるが、免震層が上部構造の減衰を低下させたということは考えにくい。そこで以下に実大振動台実験時の条件を整理する。

- ・ 上部構造は複数回にわたる振動実験によって一部鉄筋が降伏
- ・ 耐震試験体の鉛直応答倍率を計測するために入力したホワイトノイズの振幅は免震の 2 倍

以上の 2 点から、強非線形応答を示す上部構造に大きな振動を入力したことで、見かけの減衰が上昇したと推察される。そこで、以上の考察を免震層と床のみで構成される簡易試験体を用いて検証した。本実験では使用した免震を想定したゴムが床に比べて非常に高い減衰を保有していることが判明したため、目的の検討がし難い条件ではあったが、以下のように十分な知見を得た。

- ・ 無損傷下においては耐震(床のみであるが)における減衰はほぼない。
- ・ 床スラブを損傷させた後、耐震状況での減衰が増大した。また、耐震においては入



図4 免震層-床簡易試験体を用いた振動台実験

力振幅に比例して減衰が上昇する傾向が見られた。一方、免震では元々の減衰が大きい影響もあるが、床損傷後の減衰に大きな変化が生じず、かつ入力振幅に対する変化も見られなかった。

以上から、耐震においては上部構造(この場合は床のみ)の損傷状態に敏感であり、減衰も入力振幅に応じて増大する傾向がみられたことから、項目(3)の実大試験体においても同様な現象が生じていたと考えられる。つまり、免震構造になることで減衰が減少する、もしくは耐震建物になることで減衰が増大するという現象は、一般的なものではないことが以上の検討から分かった。

(5) 東北大学工学研究科免震新棟の常時微動計測による鉛直応答性状の把握

本項目は、項目(1)~(4)で得た知見を、実免震建物を用いた検証を行うことを目的としている。しかし対象建物である東北大学の免震新棟は、本研究課題の計画段階ではH25年度中に竣工予定であったが、資材・職人不足から工期に大幅な遅れがあり、H26年度春現在も建設中のため、期間中に実験を実施できなかった。したがって、本研究課題中では計測計画の立案、計測機器の手配、現場との調整のみを行った。計測はH26年7月から8月に実施予定である。

以上から項目(5)の検討が期間中に終了しなかったという事情はあるが、項目(1)~(4)の検討を終了して得た主な知見を以下に列挙する。

- ・実記録によると、免震建物の鉛直加速度応答倍率は、6倍以上になる可能性がある。
- ・実記録によると、免震建物の鉛直加速度応答の増幅は、免震よりは、上部構造の寄与が大きい。
- ・免震建物の鉛直応答特性は、免震層、柱、床の3つの要素の組み合わせで把握が可能である。したがって、鉛直応答倍率を推定する指標として、免震層、柱、床の固有周波数の組み合わせが考えられる。
- ・免震層、柱、床の固有周波数の範囲は重複関係にある。
- ・低層の免震建物では、免震層と床の固有周波数が近い条件で鉛直床応答が大きくな

る傾向にある。一方、中層以上では、床の固有周波数が小さいほどに鉛直床応答が大きくなる傾向にある。特に床の固有周波数が、他の2つ以下となる場合、鉛直床応答は急激に上昇するため注意が必要である。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計3件)

Furukawa, S., Sasaki, T., Sato, E., Okazaki, T. and Ryan, K. L., Comparison of Vertical Dynamic Response Characteristics of Two Base-isolated Buildings based on Full-scale Shaking Table Test, 13th World Conference on Seismic Isolation, Energy Dissipation and Active Vibration Control of Structures, September 24-27, 2013, Paper No. 865233, Sendai, Japan.

古川 幸、46棟の観測記録に基づく免震建物の鉛直床加速度応答特性の把握、日本建築学会東北支部研究報告会、2014年6月21-22日、福島

S. Furukawa and E. Sato, Contribution of Base Isolation Response of Base-isolated buildings, 1st Huixian International Forum on Earthquake Engineering for Young Researchers, August 16-19, 2014, Harbin, China.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古川 幸(FURUKAWA SACHI)
東北大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：30636428

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし