

機関番号：32503

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20560533

研究課題名 (和文) 強震動水平上下 3 成分同時入力が高層免震建物の地震応答性状に及ぼす効果に関する研究

研究課題名 (英文) A study on effects of simultaneous seismic motion input of two horizontal and one vertical components on earthquake response of base isolated high-rise buildings

研究代表者

長橋 純男 (NAGAHASHI SUMIO)

千葉工業大学・工学部・教授

研究者番号：50016523

研究成果の概要 (和文)：1995 年兵庫県南部地震以降に各地に多くの高層免震マンションが建設されているが、これらアスペクト比の大きな高層免震建物を対象として、強震動 3 成分が作用する場合のアイソレータの引き抜きに関する地震応答性状について研究したものである。

研究成果の概要 (英文)：Many base-isolated high-rise apartment buildings have been built in Japan after the Hyogoken-nanbu earthquake of 1995. In this research project, the earthquake response properties were studied with respect to uplift of isolators under base-isolated high-rise buildings of large aspect ratio subject to simultaneous action of two horizontal and one vertical strong ground motion.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学、建築構造・材料

キーワード：高層免震建物、強震動 3 成分同時入力、アスペクト比、アイソレータの引き抜き、アイソレータの座屈、免震層変位応答量

1. 研究開始当初の背景

(1) 「免震建物」は世界有数の地震国である日本の建築界にとってかねてよりの夢であり、戦前から少なからざる試みが為されてきた。戦後四半世紀を経て中間鋼板の入った積層ゴムアイソレータが開発され、日本でも 1983 年に千葉県八千代市に初めて免震住宅が竣工し、以来 1995 年兵庫県南部地震が発生するまでに約 80 件の免震建物が設計・施工された。

(2) 多くの犠牲者が生じた阪神・淡路大震災では建物倒壊による死者の割合が高かったことから、建物に対する「安全・安心」の要望

が強まり、また前年の米国ノースリッジ地震や兵庫県南部地震において実在免震建物による有効性が実証されたことも相俟って、我が国における免震建物への期待は年々増大する傾向にあり、高層免震マンションも増加の一途を辿り、50 階建共同住宅も建設されるに至っている。

2. 研究の目的

(1) 高層免震建物では、地震動水平成分による転倒モーメントに起因する付加軸力に上下動成分による軸力が加わって生じるアイソレ

一タの引き抜きが構造安全上の大きな問題となる。

(2) 従来の耐震設計においては、(イ)上下動加速度は水平動の 1/2 程度であり、(ロ)動的相互作用効果により建物への入力加速度は減衰する、(ハ)上下動の主要動部は水平動のそれに対して時間差(位相差)がある、とみなされてきた。そこで、免震建物の設計では、(1)静的に鉛直震度 0.30~0.35 を付加する、(2)上下動時刻歴による最大応答量を水平動による付加軸力に SRSS で加算する、(3)既往観測波上下動による応答量を水平動による付加軸力に時刻歴で加算する、等が一般的である。

(3) しかしながら、免震建物の鉛直方向 1 次固有周期帯域で $S_a=1.5\sim 2.0G$ ($h=5\%$) の大きな加速度応答量を示す強震動も国内外で少なからず観測されていることに鑑み、特に直下地震を想定する場合には、上記(イ)~(ハ)の仮定や、(1)、(2)、(3)の方法による検討が免震建物の実際の地震応答性状に近い適切なものか、その妥当性については観測記録に基づく検証が必要である。

3. 研究の方法

(1) 高層免震建物(アスペクト比 3~4)を対象として、耐震壁及び床スラブの曲げ剛性を考慮した立体骨組振動系モデルを作成し、その地震応答解析プログラムを構築した。

(2) 国内外で観測された強震動のなかでアイソレータに引き抜きを生じさせる可能性の高い強震動記録を選定し、その水平動 2 成分及び上下動成分の同時入力による地震応答解析を行った。

(3) 日本において近い将来高い確率で発生が予想されている地震、および免震建物の設計において考慮されるべき地震を対象に、日本の主要都市において想定される模擬強震地動を作成し、その 3 成分同時入力による高層免震建物のアイソレータの引き抜きについて検討した。

4. 研究成果

(1) アスペクト比 3 以上の高層免震建物の隅角部アイソレータの変動面圧は一般部アイソレータに比べて大きく、耐震性能目標値とされる最大引張面圧 $1N/mm^2$ を超え $2N/mm^2$ を上回る強震動、あるいはアイソレータのせん断歪みが 400%程度、最大圧縮面圧が圧縮限界強度を超え座屈状態となる強震動の存在が、少なからず確認されることを、整形立面形状の免震建物及び不整形立面形状(セット

バック)の高層免震建物について示した。

(2) 強震動が引き抜きに及ぼす「水平動効率」及び「上下動効率」を定義し、直下地震やプレート境界地震の地震タイプによって上下動と水平動による効率の相違があることを示し、特に直下地震による場合には、水平動によるよりも、上下動によって大きな引き抜きが生じる可能性が高いことを示した。

(3) 引き抜きに及ぼす地震動強さの簡便な評価尺度として、周期帯域 0.1~0.3 秒を対象とした「上下動実効加速度」、2~6 秒を対象とした「水平動や長周期実効加速度」を提案した。

(4) 仙台・本町、東京・丸の内、東京・新宿、横浜・みなとみらい、名古屋駅前地区、大阪・梅田及び福岡・天神の 7 地区を対象として、長町・利府断層地震、南関東地震、東京湾北部地震、東海・東南海・南海連動地震、東南海・南海連動地震、上町断層地震、警固断層地震を想定した模擬地震動を、山根・長橋による模擬地震動作成手法に関する一連の研究成果(2002~2011)を用いて作成した。模擬地震動の応答スペクトルを図 1 に示す。

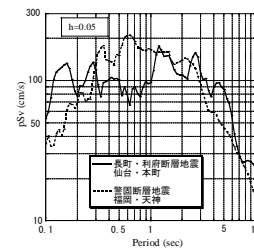


図 1-1 仙台・福岡

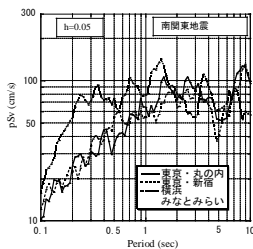


図 1-2 丸の内・新宿・横浜

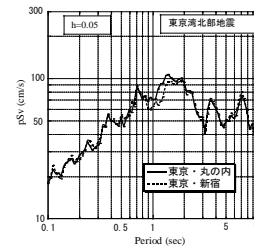


図 1-3 丸の内・新宿

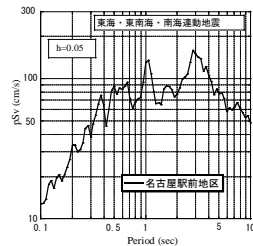


図 1-4 名古屋駅前

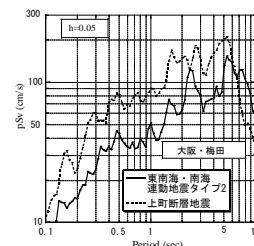


図 1-5 大阪

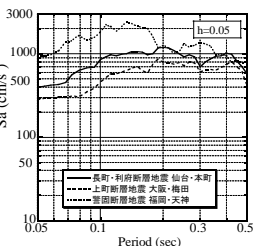


図 1-6 仙台・大阪・福岡の上下動 S_a

図 1 模擬地震動水平成分の速度応答スペクトル (図 1-6 は上下動成分の加速度応答スペクトル)

その結果、次の知見を得た。

- ① 本研究では、東海・東南海・南海連動地震によるサイト波について、名古屋駅前地区に加えて名古屋市中区三の丸についても作成している。その作成したサイト波に対するアスペクト比 2.5~5 の建物モデル 6 種類について、高層免震建物の免震層変位応答量を求めた。アスペクト比 3.5~4 では名古屋駅前地区と名古屋・三の丸地区のサイト波の免震層変位応答量は同程度となるものの、他のアスペクト比では名古屋駅前地区の免震層変位応答量が多い。そこで、本論文では名古屋市の対象サイトとして名古屋駅前地区を選定したものである。なお、名古屋駅前地区については、アイソレータ周期を 5 秒のみとした。これは $T_f=3.5$ 秒の場合、周期 3 秒付近での速度応答量が大きく、 $T_f=3.5$ 秒ではアイソレータせん断歪み 400%を超えて大きな免震層変位応答量となるためである。このように、名古屋市においては、周期 3.5 秒のアイソレータを用いることは適正な選定とは見なし難しく、本研究では周期 5 秒のアイソレータを用いることとした。
- ② 東南海・南海連動地震のタイプ別（破壊開始点と破壊進行方向）による免震層変位応答量は、いずれのアスペクト比についてもタイプ 2（紀伊半島沖を破壊開始点として破壊が東西に進むパイ・ラテラル）の方がタイプ 1（足摺岬沖を破壊開始点として破壊が東方に進むユニ・ラテラル）よりも大きな地震応答量となる。よって、本研究ではタイプ 2 の大阪・梅田サイト波を用いることとした。また、大阪・梅田の高層免震建物のアイソレータには周期 3.5 秒を用いた。これは大阪・梅田の水平動速度応答スペクトルの周期 5 秒付近で非常に大きな速度地震応答量となるものであり、これによる免震層変位応答量はアイソレータせん断歪み 400%に達することとなる。よって、アイソレータ周期は、前述した東海・東南海・南海連動地震による名古屋駅前地区とは逆に、周期 3.5 秒のアイソレータを採用した。
- ③ 免震建物の終局耐震性能については、上部構造の塑性化、アイソレータの引張破断、アイソレータの座屈、免震部材のせん断破断、エネルギー吸収能力の喪失及び免震建物の擁壁への衝突が想定されると指摘されている。そこで、ここでは高層免震建物の免震層変位応答量と引張面圧を同時に表示して、免震層変位応答量と引張面圧を整理し、高層免震建物の免震層変位応答量と、特にアスペクト比に関するアイソレータの引張面圧との関係を対象サイト毎に定量的に検討した。
先ず長町・利府断層地震による仙台・本町の高層免震建物の応答について、 $T_f=3.5$ 秒では、免震層変位応答量はアスペクト比 2.5~3

（アイソレータのゴム総厚 176mm）において、アイソレータせん断歪み 400%に達する。アスペクト比 4 以上では、アイソレータのゴム総厚（200~241mm）が大きくなるため、せん断歪み 400%には達しないものの、免震層変位応答量は 70cm 程度となる。引張面圧はアスペクト比 2.5 からアイソレータに引き抜きが生じ、アスペクト比 4 以上では、引張面圧 $1\text{N}/\text{mm}^2$ を上回る。

次に、 $T_f=5$ 秒の場合には、アスペクト比 2.5~5 において、免震層変位応答量は 55~70cm に広く分布しており、アスペクト比 4 ではアイソレータせん断歪み 400%を超える。また、引張面圧については、 $T_f=3.5$ 秒に比して、アスペクト比 4~5 ではいずれも $1\text{N}/\text{mm}^2$ を下回っている。

④ 南関東地震を想定した東京・丸の内のサイト波による $T_f=3.5$ 秒の免震層変位応答量はアスペクト比に依らずおよそ 35~42cm である。引張面圧はアスペクト比が大きくなるに従い圧縮面圧は小さくなり（引き抜き力が大きく作用して）、アスペクト比による分布幅が大きくなる特徴をもっている。アスペクト比 4.5 になるとアイソレータに引き抜きが生じる。なお、 $T_f=5$ 秒では、免震層変位応答量が $T_f=3.5$ 秒に比べて、やや大きくなり 40cm 程度となるが、アイソレータには引き抜きが生じないことを確認している。これは、周期 5 秒程度になると速度応答量が周期 3 秒に比して小さくなり、水平動の転倒モーメントによる付加軸力が小さくなるためである。

東京・新宿の $T_f=5$ 秒の免震層変位応答量は、東京・丸の内に比べて免震層変位応答量が 32~35cm と小さくなる。アスペクト比が大きいほど免震層変位応答量がやや大きくなる傾向にある。なお、 $T_f=3.5$ 秒では、東京・丸の内と同じく免震層変位応答量は 40cm 程度となる。

$T_f=3.5$ 秒及び $T_f=5$ 秒の横浜・みなとみらいの免震層変位応答量と引張面圧の関係を検討すると、 $T_f=3.5$ 秒の場合には、免震層変位応答量はアスペクト比に依らずに 45~50cm であり、同じアイソレータ周期帯域の東京・丸の内や東京・新宿よりも大きい免震層変位応答量となっている。アスペクト比が大きくなるに従い圧縮面圧は小さくなり、アスペクト比 4 以上になるとアイソレータに引き抜きが生じて $0.5\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の引張面圧となる。また、 $T_f=5$ 秒では、アスペクト比 2.5~5 においてアイソレータに引き抜きは生じない。これは、周期 5 秒付近では周期 3 秒に比べて速度応答量がやや小さくさいため、水平動の転倒モーメントによる付加軸力が周期 3.5 秒に比して、小さくなることによるものと思われる。

⑤ 東京湾北部地震は、南関東地震に比べ地震規模は小さいが首都直下で発生する可能

性が高いため、首都圏に大きな被害が生じるとされる M7 クラスの地震である。Tf=3.5 秒では、免震層変位応答量は 30cm 以内となっている。アスペクト比の増加とともに圧縮面圧は小さくなり、アスペクト比 5 になるとアイソレータに引き抜きが生じる。地震規模が南関東地震に比べて小さいため、免震層変位応答量は 25cm 程度と小さくなる。引張面圧については、東京・丸の内と同じくアスペクト比 5 になるとアイソレータに引き抜きが生じる。なお、東京・丸の内及び東京・新宿の Tf=5 秒ではいずれの建物モデルにおいても、アイソレータに引き抜きは生じていないことを確認している。

⑥ 名古屋駅前地区の免震層変位応答量は、40～55cm の範囲に分布しており、アスペクト比が小さいほど免震層変位応答量は大きくなる傾向にある。

引張面圧は、他の地震と同じくアスペクト比が大きくなるに従い圧縮面圧は小さくなり、アスペクト比 5 になるとアイソレータに引き抜きが生じることとなる。連動地震のサイト波は、最も近い震源距離でも 150km と遠方であるが、名古屋駅前地区のアスペクト比 5 の高層免震建物アイソレータに引き抜きが生じている。

⑦ Tf=3.5 秒の東南海・南海連動地震タイプ 2 による大阪・梅田のサイト波についての免震層変位応答量は、40～47cm の範囲に分布している。アスペクト比が大きくなるに従い圧縮面圧は小さくなり、アスペクト比が 4.5 になるとアイソレータに引き抜きが生じることとなる。東海・東南海・南海連動地震による名古屋駅前地区のサイト波と同じように、連動地震による大阪・梅田のサイト波は、震源距離がかなり遠方であっても、アスペクト比 4.5 を超える高層免震建物のアイソレータには引き抜きが生じることとなる。

上町断層地震の大阪・梅田では、アスペクト比 2.5 においてアイソレータのせん断歪みが 400% を超える。これ以外では 400% を超えないものの、免震層変位応答量は 65～85cm と大きな応答量となる。

引張面圧は、アスペクト比に依らずアイソレータに引き抜きを生じる。これは、サイト波の上下動加速度応答スペクトルの周期 0.1～0.3 秒付近で大きな加速度応答量となるため、上下動の効果が大きく影響していることによるものと思われる。

⑧ Tf=3.5 秒の警固断層地震の福岡・天神における免震層変位応答量は、アスペクト比に依らずに 40cm 程度である。また、Tf=5 秒の場合でも免震層変位応答量は 40cm 程度であることを確認している。

引張面圧については、アスペクト比 2.5 以上からアイソレータに引き抜きが生じて、アスペクト比 4.5 では引張面圧 1.5N/mm² 以上、

アスペクト比 5 では 1.8N/mm² の大きな引張面圧となる。これは、警固断層地震による福岡・天神のサイト波の上下動成分は、同じく内陸直下地震の長町・利府断層地震による仙台・本町や上町断層地震による大阪・梅田の上下動成分に比して、周期 0.1～0.2 秒付近においてかなり大きな加速度応答量を有していることによるものと考えられる。

⑨ 高層免震建物の最大引張面圧に及ぼすサイト波の水平動 2 成分及び上下動成分の効果を考察した。そこで、3 成分同時入力時の最大引張面圧の発生時刻において最大引張面圧から長期圧縮面圧を差し引き算出した面圧を $\sigma_{H\&V}$ とし、同時刻の同じ方法で算出した水平動 2 成分単独入力時及び上下動単独入力時のそれぞれの面圧を σ_H 及び σ_V とし、これを 3 成分同時入力時の $\sigma_{H\&V}$ によってそれぞれ除した値を、「水平動寄与率」及び「上下動寄与率」と定義する。

アスペクト比 3, RS12F, Tf=3.5 秒の免震建物は、M8 クラスの地震によるサイト波によって、水平動寄与率が約 0.6 以上、上下動寄与率は約 0.4 以下となっており、上下動よりも水平動の効果が大きいことを示している。アスペクト比 5, RS20F, Tf=3.5 秒の免震建物は、高層化によって転倒モーメントによる付加軸力の増加に伴い、水平動寄与率約 0.8 以上、上下動寄与率約 0.2 以下となり、水平動の効果がさらに大きくなる。これに伴って、アイソレータに引き抜きを生じさせるサイト波の数も多くなっている。M7 クラスの直下地震によるサイト波では、M8 クラスの地震とは逆に、上下動寄与率の値が大きくなっている。特に、アイソレータに引き抜きを生じさせるサイト波は、上下動寄与率が 0.8 以上、水平動寄与率 0.6 以下に多く分布している。アスペクト比 5, RS20F, Tf=3.5 秒の免震建物は、M7 クラスの直下地震によって、高層化に伴う転倒モーメントによる付加軸力の増加があり、直下地震のサイト波も多くが水平動寄与率約 0.8 以上となり相対的に上下動の効果が小さくなるものの、依然として上下動寄与率が大きなサイト波もみられる。

次に、Tf=5 秒の場合については、アスペクト比 5, RS20F, Tf=5 秒の免震建物は、M8 クラスの地震によるサイト波によって、Tf=3.5 秒と同様に、アイソレータの長周期化により、転倒モーメントによる付加軸力が小さくなって水平動寄与率が小さくなり、相対的に上下動寄与率が大きくなっている。水平動寄与率が約 0.4～1.0 と広く分布し、Tf=3.5 秒の場合では上下動寄与率が 0.4 以下であるが、Tf=5 秒の場合では、上下動寄与率が約 0.6 程度までと大きな寄与率となっていることが知れた。また、M7 クラスの直下地震によるサイト波は、特にアイソレータに引き抜きが生じるサイト波に注目すると、Tf=3.5 秒よりも

さらに上下動寄与率の値が大きくなり、水平動寄与率が小さくなっている。これは、アイソレータ周期の長周期化によりアイソレータの引き抜きに及ぼす水平動の影響を小さくしても、上下動成分の強さを有する直下地震のサイト波は、アイソレータの引き抜きに及ぼす影響が大きいことを示唆している。

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)

[雑誌論文] (計2件)

- ①池田雄一、長橋純男、日本における想定被害地震を対象とした高層免震建物の地震応答性状とアスペクト比効果に関する一考察 強震動水平・上下両成分同時入力が高層免震建物の地震応答性状に及ぼす効果に関する研究 その3、日本建築学会構造系論文集、査読有、660号、2011、281-290
- ②池田雄一、長橋純男、セットバック立面形状を有する高層免震建物の積層ゴムアイソレータの引き抜きに関わる地震応答性状 強震動水平・上下両成分同時入力が高層免震建物の地震応答性状に及ぼす効果に関する研究 その2、日本建築学会構造系論文集、査読有、651号、2010、913-922

[学会発表] (計4件)

- ①池田雄一、長橋純男、アスペクト比の大きな高層免震建物の積層ゴムアイソレータの引き抜きに着目したクライストチャーチ地震の強震動特性に関する一考察、日本建築学会大会学術講演梗概集<B-2>、2011年8月24日、(掲載予定)、早稲田大学(東京都)
- ②池田雄一、長橋純男、アスペクト比の大きなセットバック及び整形立面形状を有する高層免震建物の積層ゴムアイソレータの引き抜きに及ぼす強震動水平成分及び上下動成分の強震動特性、日本建築学会大会学術講演梗概集<B-2>、2010年9月9日、259-260、富山大学(富山県)
- ③池田雄一、長橋純男、セットバック立面形状を有する高層免震建物の強震動水平2成分・上下動合計3成分同時入力による積層ゴムアイソレータの地震応答性状、日本建築学会大会学術講演梗概集<B-2>、2009年8月29日、935-936、東北学院大学(宮城県)
- ④池田雄一、長橋純男、強震動水平2成分・上下動合計3成分同時入力によるセットバックした立面形状を有する高層免震建物のアイソレータの地震応答性状、日本建築学会大会学術講演梗概集<B-2>、2008年9月18日、307-308、広島大学(広島県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長橋 純男 (NAGAHASHI SUMIO)
千葉工業大学・工学部・教授
研究者番号：50016523

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携研究者 なし