

上町断層帯地震に対する免震建物・超高層建物の応答性状

Seismic Response of Base-isolated Buildings and High-rise Buildings for Uemachi Fault Earthquake

森清 宣貴*¹
Nobuki Morikiyo

太田 寛*¹
Hiroshi Ohta

神澤 宏明*¹
Hiroaki Kamisawa

要旨

(社)日本建築構造技術者協会関西支部「大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および設計法に関する研究会」より、上町断層帯地震に対する建築設計用地震動および耐震設計指針が公開された。当社も研究会のメンバーとして検討を行うとともに、ケーススタディとして当社設計または施工の免震建物・超高層建物の応答解析を行っている。本報告では、上町断層帯地震に対する設計法の概要を示した上で、ケーススタディの一例を示し、告示レベル2相当の地震波の応答値を上回る可能性があることを確認した。また、上町断層帯地震に対する設計法に基づいた詳細解析を行えば、同研究会で示された目標耐震性能を満足する可能性があることを示した。

キーワード：上町断層帯 レベル3 既存建物 地震応答解析 質点系モデル

1. はじめに

2011年7月に(社)日本建築構造技術者協会関西支部「大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および設計法に関する研究会(以下、大震研)」より、上町断層帯地震に対する建築設計用地震動および耐震設計指針が公開された^{1)~5)}。当社も研究会のメンバーとして検討を行うとともに、ケーススタディとして当社設計または施工の免震建物・超高層建物の応答解析を行っている。

本報告では、上町断層帯地震に対する設計法の概要を示した上で、ケーススタディの一例を示し、得られた結果から上町断層帯地震に対する応答性状および既存建物の耐震性能について示す。

2. 上町断層帯地震に対する設計法の概要¹⁾

大震研にて策定された上町断層帯地震に対する設計法の概要を以下に示す。

2.1 適用範囲

大阪府域の新築および既存建物のうち、高層建物や免震建物等、時刻歴応答解析により耐震安全性を検討する必要がある建物が対象とされている。

また、建物の地震時挙動を時刻歴応答解析により予測し、その変形性能に照らして耐震性能を評価することを基本としていることから、当面は高層系建物や免震建物を対象と

するが、時刻歴応答解析を義務付けられていない規模の建物に対して適用することを妨げるものではない、とされている。

2.2 設計用入力地震動

2.2.1 ゾーニング

設計用入力地震動は、大阪府市予測波や地震学的知見をもとに、想定される幅の中で3段階の設計用地震動レベルが設定されている。また、大阪府域を合計32ゾーン(大阪市域は図1に示す6ゾーン)に分割しており、ゾーンごとに設計用地震動が定義されている。

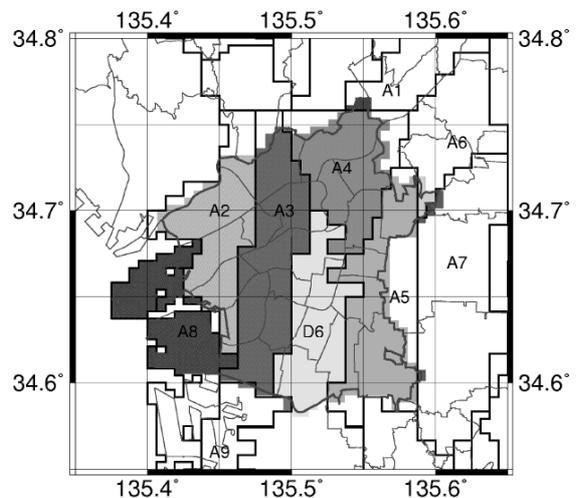


図1 大阪市域のゾーニング

*1 大阪本店 建築設計部

2.2.2 地震動レベル

建築の構造設計では不確定な要素の中から、発生確率・安全性・経済性などを総合的に判断して設計荷重を決定していかなければならない。大きなばらつきのある予測に対して、震災の教訓や設計実務上実効性のある対応も考慮した解決策として、想定される幅のなかで次の3段階の設計用地震動レベルが設定されている。いずれのレベルも法令で定める極めて稀に発生する地震動（告示波）を超えるレベルの地震動であることから、構造設計者は建築主など関係者との協議のもと、いずれかのレベルを設定して設計を進める必要があるとされている。

レベル 3A

上町断層帯地震を考慮する際の基準となるレベルで、大阪府市予測波の発生シナリオ 35 ケースの平均的なレベルに相当する。

レベル 3B

基準のレベルより高い安全性を求めて設定するレベルで、より大きなばらつき範囲をカバーするレベル。大阪府市予測波の発生シナリオ 35 ケースの 70% 程度を含んだ地震動レベルに相当する。

レベル 3C

基準のレベルに比べ、特段に高い安全性を求めて設定するレベルで、さらに大きなばらつき範囲をカバーするレベル。大阪府市予測波の発生シナリオ 35 ケースの 85% 程度を含んだ地震動レベルに相当する。

2.2.3 地震動タイプ

水平地震動は、大阪府市の予測波形を分析すると、比較的フラットな応答スペクトル形状を示すケースがある一方で、応答スペクトルが非常に大きく、かつ周期特性の明瞭なケースがある。このような地震動の傾向を反映するものとして、①フラットタイプ地震動と②パルスタイプ地震動の2つのセットで設計に用いるものとし（レベル 3A には地震動②はなし）、地表面で定義した地震動が提示されている。

フラットタイプ地震動

フラットな速度応答特性を持つ設計用応答スペクトル pSv で入力地震動を定め、このスペクトルに適合する模擬地震動

パルスタイプ地震動

大阪府市予測波から選定された卓越周期特性の強いパルス性地震動

上下地震動も水平地震動と対応するように、地表面で定義した地震動が提示されている。

設計用応答スペクトル pSv が大阪市域で最大となる A4 ゾーンの東西方向地震動（以下、EW 方向）を例に、フラッ

トタイプ地震動の地震動レベルを示す。図 2 に示すように、レベル 3A でもフラットレベルの pSv が 130cm/s となっており、告示レベル 2 相当の地震動レベルを大きく上回る設定である。図 3, 4 にフラットタイプおよびパルスタイプのレベル 3B 地震動の Sv を示す。いずれも減衰定数は 5% である。フラットタイプは 200cm/s 程度、パルスタイプは周期 2~3 秒で 250cm/s を超える地震動となっている。

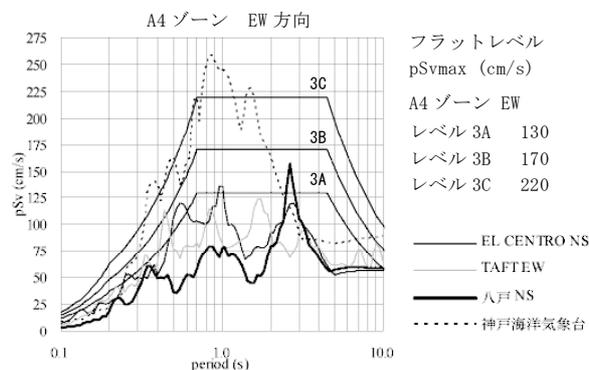


図 2 フラットタイプ地震動 設計用応答スペクトル

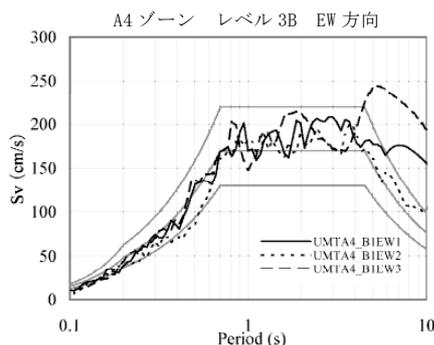


図 3 フラットタイプ地震動 A4 ゾーン レベル 3B EW

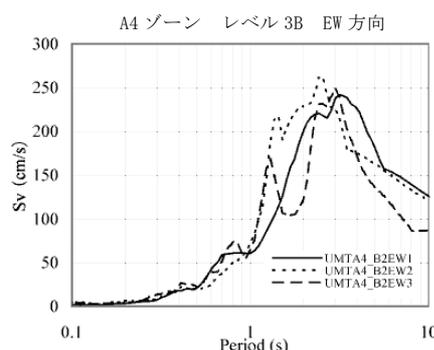


図 4 パルスタイプ地震動 A4 ゾーン レベル 3B EW

2.3 目標とする耐震性能

内陸直下型地震は、今後 30 年以内の発生確率は 2~3% と言われている一方で、多くのケースが考えられる断層破壊パターンに応じて予測地震動の大きさに大きな幅があり、個々の建設地において大きな影響を及ぼす地震の発生確率は、海洋型地震に比べて、かなり低い確率であると考えら

れている。したがって、大震研の耐震設計指針では高層建築物等の一般的な耐震性能目標よりも、倒壊・崩壊に対して、より踏み込んだ次の状態に至ることが許容されている。

限界状態Ⅰ

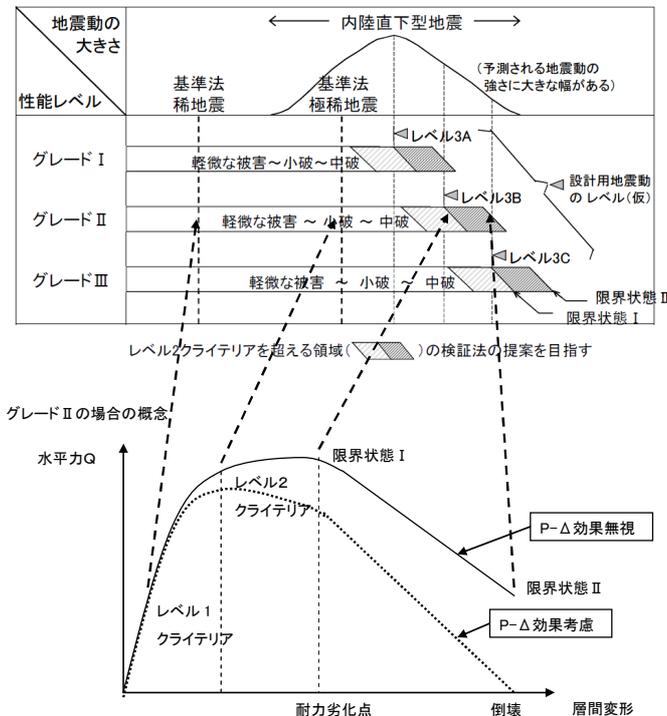
下記の終局的な限界状態Ⅱに対してある程度の余裕があり、非倒壊の保証を目標とする限界状態として設定する。「本震でこの状態におさまっていればある程度の余震にも耐えることができ、一定期間の使用が可能な状態（応急対策が必要な場合もある）」と位置づける。

限界状態Ⅱ

最新の研究レベルを踏まえて設定する建築物が倒壊しない限界の状態。この状態を確認するためには詳細な解析や、さらなる調査・研究を必要とする場合がある。

以上のように、3段階の設計用地震動レベルと、2段階の終局安全性に対する耐震クライテリアが設けられている。設計者はこれらについて建築主に背景を十分説明し、どの組み合わせを採用するかを協議し、設定する。

図5に、これら設計用地震動レベルと耐震クライテリアの関係の概念を示す。



グレードⅠは、レベル3Aの設計用地震動に対して限界状態Ⅰ以下に留まることを目標としたもので、相対的な関係として、基準法の極稀地震に対してはそれ以下の損傷に、

また限界状態Ⅱに達するのはレベル3Aより大きな地震動となる。同様にグレードⅡはレベル3Bの、グレードⅢはレベル3Cの設計用地震動に対して限界状態Ⅰ以下に留まることが目標とされている。なお、限界状態は検証方法の違い等によって若干幅のある評価となるので、その領域が斜め線で示されている。

いずれも法を超えるレベルの地震動を対象とするものであるため、その適用は、建築主と設計者の自主的な判断によるものであるが、新築建物については、「3Bレベルに対して、限界状態Ⅰ以下とする。」ことが推奨されている。

3. 質点系モデルを用いた地震応答解析

ケーススタディとして当社設計または施工の建物に対し、質点系モデルを用いた地震応答解析を行い、上町断層帯地震に対する応答性状を確認する。全ての建物は、設計時期は異なるが構造性能評価を受け、大臣認定を取得している。

3.1 検討用地震動

検討用地震動は、図1に示す大阪市域のA4ゾーン（上町台地の北側地域）およびA8ゾーン（湾岸地域）を対象とした地震動とし、地震動レベルは一般的な超高層建物での使用が想定されるレベル3A、レベル3Bとする。図6に検討用地震動の速度応答スペクトルを示す。

3.2 解析モデル

解析モデルは、各層1質点とした質点系モデルとする。復元力特性は、構造性能評価時の設定を用いることとし、等価せん断型モデル（Tri-linear形）もしくは曲げせん断型モデル（曲げ：弾性、せん断：Tri-linear形）とする。また、超高層建物の応答解析においては、1/100を超える変形となるため、P-Δ効果を考慮した解析を行う。

減衰も基本的には構造性能評価時の設定を用いることとする。ただし、RC造（一部CFT造）で瞬間剛性比例型減衰を用いている場合は、1/100を超える大変形領域において剛性低下に比例して減衰が小さくなるため、特定層に変形が集中する傾向があり、立体フレームモデル（部材レベルモデル）での応答解析結果と異なる値になることが多い。そのため本検討では、質点系モデルにおける瞬間剛性比例型 $h=3\%$ と初期剛性比例型 $h=1\%$ の減衰が吸収エネルギーで概ね等価になるという報告²⁾に基づき、RC造（一部CFT造）超高層建物の応答解析においては初期剛性比例型 $h=1\%$ とする。

解析対象建物の概要を表1に示す。ただし、本検討はケーススタディの一例で、上町断層帯地震の対象ゾーンと対

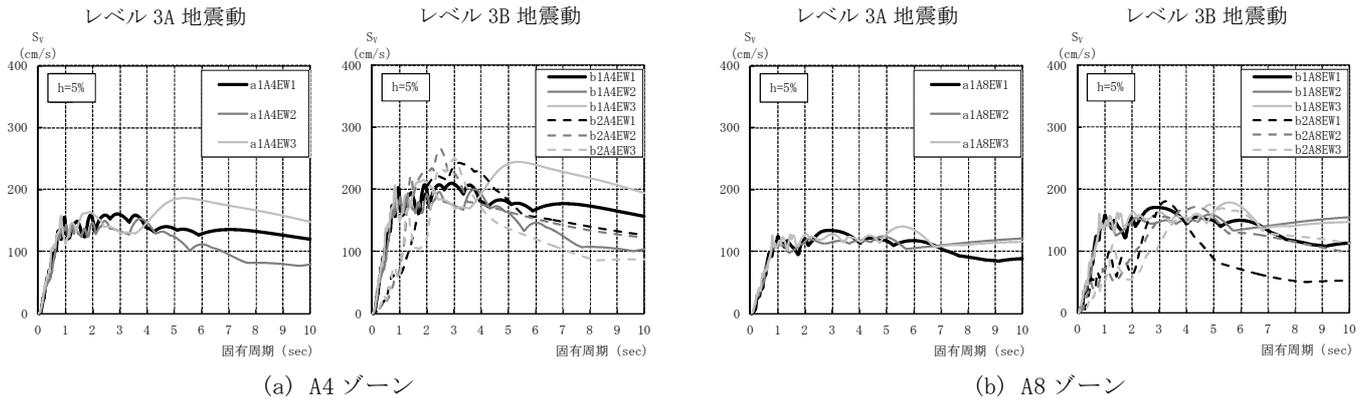


図6 速度応答スペクトル

表1 解析対象建物概要

【免震建物】

建物 No.	階数		高さ	骨組種別	設計用せん断力係数 C_B	1次固有周期 T_1 ($\gamma=200\%$ 時) [s]	水平クリアランス
	地上	地下					
I-1	2階	-階	7 m	RC造	0.150	2.531	500 mm
I-2	4階	-階	20 m	RC造	0.130	3.033	500 mm
I-3	6階	1階	25 m	RC造	0.100	2.718	500 mm
I-4	7階	-階	25 m	RC造	0.120	2.335	450 mm
I-5	9階	1階	35 m	S造	0.135	3.829	500 mm
I-6	12階	1階	35 m	RC造	0.100	2.632	500 mm
I-7	15階	2階	50 m	RC造	0.110	3.108	500 mm
I-8	17階	1階	55 m	RC造	0.091	4.720	600 mm
I-9	36階	-階	115 m	RC造	0.065	5.921	600 mm

【超高層建物】

建物 No.	階数		高さ	骨組種別	設計用せん断力係数 C_B	1次固有周期 T_1 [s]	$C_B \times T_1$
	地上	地下					
H-1	23階	1階	70 m	RC造	0.100	1.540	0.154
H-2	19階	2階	80 m	CFT造	0.119	1.950	0.232
H-3	26階	1階	90 m	RC造	0.100	2.100	0.210
H-4	31階	1階	95 m	RC造	0.120	1.670	0.200
H-5	35階	1階	120 m	CFT造	0.070	3.650	0.256
H-6	36階	-階	120 m	RC造	0.076	2.509	0.191
H-7	36階	-階	120 m	RC造	0.063	3.061	0.193
H-8	40階	1階	125 m	CFT造	0.091	3.430	0.312
H-9	42階	-階	140 m	RC造	0.054	3.482	0.188
H-10	46階	3階	145 m	RC造	0.079	3.566	0.282

象建物建設地は無関係であり、実際の建物被害とは一致しないことに留意する必要がある。

免震建物は、設計用せん断力係数：0.065～0.150、積層ゴム200%変形時の1次固有周期：2.335～5.921秒、免震層水平クリアランス：450～600mmとなっている。一方、超高層建物は、設計用せん断力係数：0.054～0.120、1次固有周期：1.540～3.650秒となっている。ここで挙げた超高層建物の設計用せん断力係数と1次固有周期の関係を示す $C_B \cdot T_1$ は、RC造：0.154～0.282、CFT造：0.232～0.312となっており、超高層建物として標準的な耐力（RC造：平均0.18、CFT造：平均0.20～0.30）を持つものと判断できる。

3.3 免震建物の応答解析結果

免震建物9棟の免震層最大応答変位および上部構造最下層の最大応答層せん断力係数を図7に示す。免震層変位に

ついては、レベル3Aの地震動で概ねクリアランス以内となるのに対して、レベル3Bの地震動では擁壁との衝突が避けられないと推察される。また、上部構造への影響については、評価時の1.3～2.4倍の地震力が作用することになる。

しかしながら、大震研から公開された設計指針では擁壁への衝突を許容する検証法や、上部構造は各種構造の耐震クライテリアを用いる方法が提案されている⁴⁾ため、それらの検証を行えば目標耐震性能を満足する可能性があると思われる。

図8には、免震層変位を変位応答スペクトル ($h=5\%, 25\%$) とともにプロットしたものを示す。ここでは、A4ゾーンのレベル3A”a1A4EW3”地震波について示す。免震層最大応答変位は最大変位時の等価1次固有周期と対応させてプロットしている。検討対象建物では最大変位時の免震層の等価粘性減衰定数が概ね $h=25\%$ となっており、 $h=25\%$ の変位応

答スペクトルと良く対応していることがわかる。

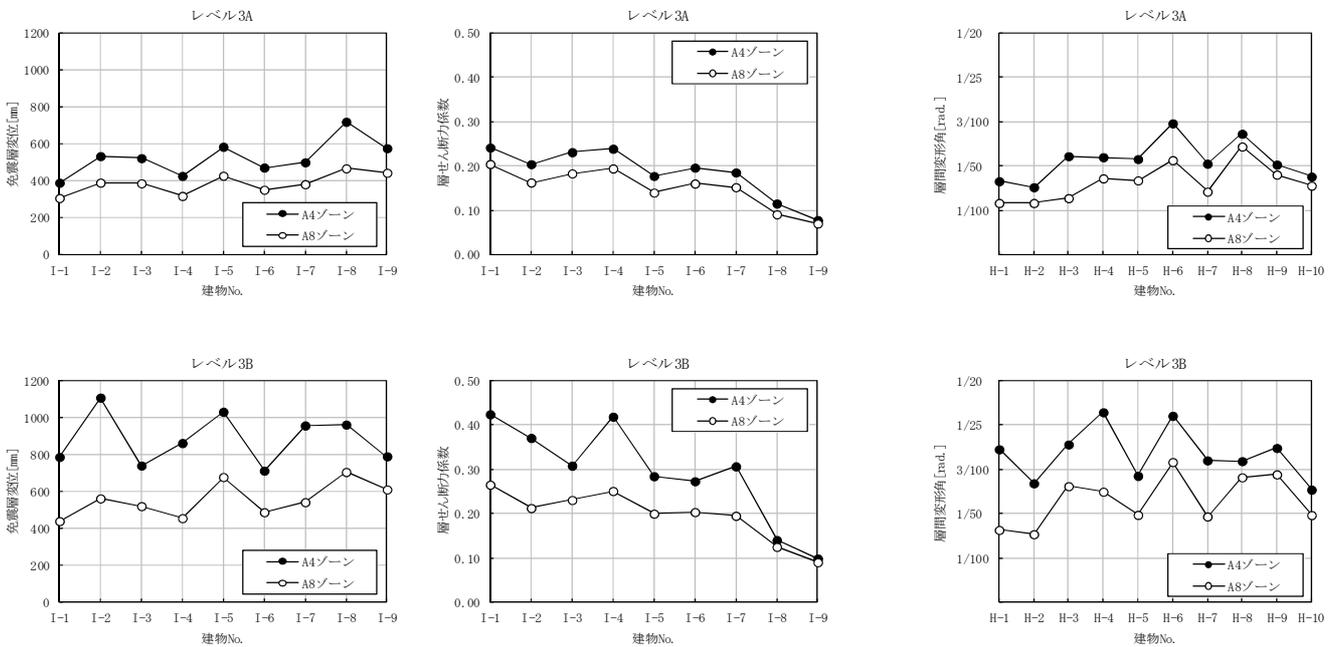
3.4 超高層建物の応答解析結果

超高層建物 10 棟の最大応答層間変形角を図 9 に示す。最大応答層間変形角は、応答値の小さい A8 ゾーンのレベル 3A でも 1/100 を上回っており、A4 ゾーンのレベル 3B では 1/23 と 1/100 を大きく上回る結果となる。

図 10 には、建物代表変位を変位応答スペクトル (h=5%) とともにプロットしたものを示す。ここでは、変位応答スペクトルとの比較のため、建物代表変位を用いる。建物代表変位は、質点系モデルから得られた時刻歴応答解析結果を用いて等価 1 自由度系に縮約して求めた⁶⁾。免震建物と同様に、A4 ゾーンのレベル 3A” a1A4EW3” 地震波について

示す。建物代表変位は最大変位時の等価 1 次固有周期と対応させてプロットしている。応答値とスペクトルを比較すると、固有周期が長い部分でスペクトルのラインと外れるが、変位応答スペクトル (h=5%) と同様の傾向を示しており、概ね対応していることがわかる。

超高層建物の建物 No. H-6 は、質点系モデルでの検討に加えて、立体フレームモデルでの検討を行っているため、詳細検討の参考例として検討結果を示す。検討地震波は A4 ゾーンのレベル 3B” b1A4EW1” である。図 11 には、立体フレームモデルと質点系モデルの最大応答層間変形角の比較結果を示す。質点系モデルでは 2,3 階に損傷が集中して 1/23[rad.]の変形となっているが、立体フレームモデルでは全体崩壊形が表現できるため、最大変形層の周辺層にも



(a) 免震層最大応答変位 (b) 上部構造最下層最大応答層せん断力係数

図 7 応答結果一覧 (免震建物)

図 9 応答結果一覧 (超高層建物) [最大応答層間変形角]

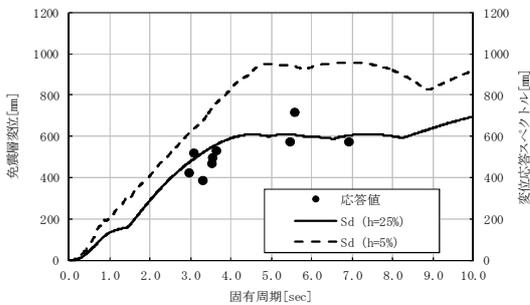


図 8 免震建物の免震層変位と変位応答スペクトルとの対応 (地震波: a1A4EW3)

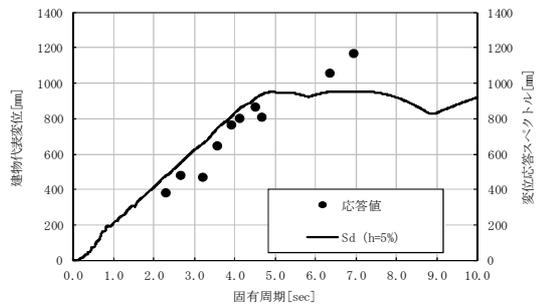


図 10 超高層建物の建物代表変位と変位応答スペクトルとの対応 (地震波: a1A4EW3)

変形が分散しており、著しく損傷が集中する階は無く 3/100 [rad.] 程度の変形となっている。この立体フレームモデルの解析結果を基に、応答値と RC 造の耐震クライテリア²⁾との検証の一部を図 12, 13 に示す。1 階柱脚の一部で応答部材角が限界部材角を超えるが、概ねクライテリアを満足しており、図 12, 13 に示した検証以外でも一部でクライテ

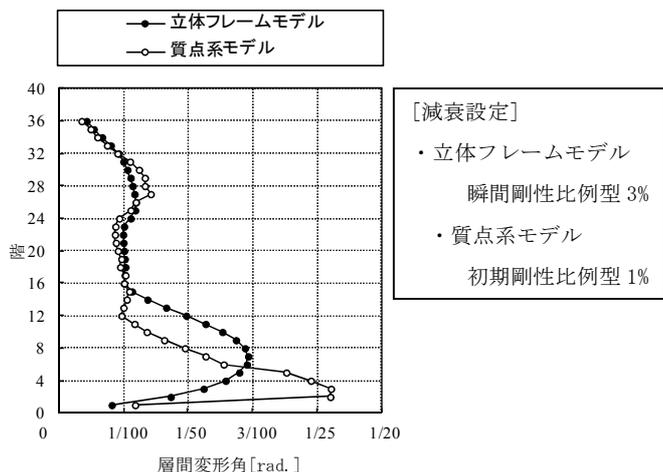


図 11 最大応答層間変形角の比較

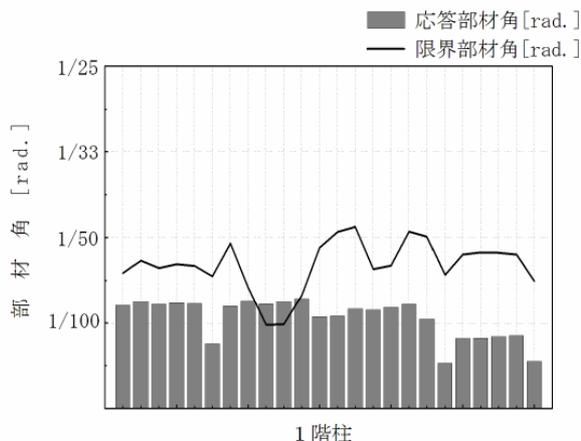


図 12 限界部材角と応答部材角の比較(1 階柱脚)

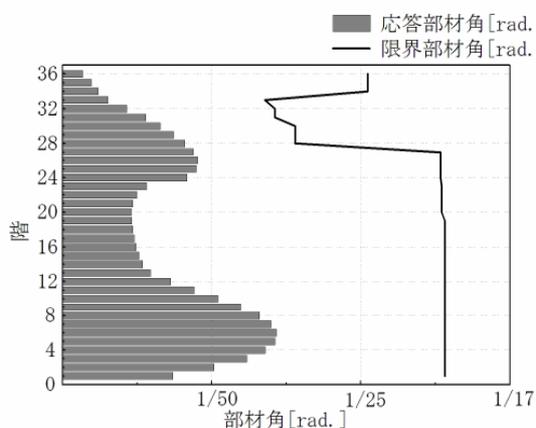


図 13 限界部材角と応答部材角の比較(梁)

リアを満足しない箇所があるが、概ね満足する結果となった。

以上の結果より、立体フレームモデルでの検証、もしくは質点系モデルの解析結果に静的荷重増分解析を組み合わせた部材レベルでの検証を行えば、1/100 を超える大変形になっても、「レベル 3B 地震動に対して、限界状態 I 以下とする。」という目標耐震性能を満足する可能性があると思われる。

4. おわりに

(社)日本建築構造技術者協会関西支部の大震研から公開された上町断層帯地震に対する設計法の概要を示し、ケーススタディとして当社設計または施工物件の上町断層帯地震に対する応答解析を行った。

質点系モデルによる応答解析の結果、免震建物・超高層建物ともに告示レベル 2 相当の地震波の応答値を上回ることを確認した。しかしながら、大震研の設計法に基づいた詳細検討を行えば、目標耐震性能を満足する可能性が高いと思われる。

本報告で用いた地震波および設計法は、(社)日本建築構造技術者協会関西支部が主催して活動する「大阪府域内陸直下型地震に対する建築設計用地震動および設計法に関する研究会」の研究結果を用いています。

参考文献

- 1) 多賀謙蔵, 亀井功ほか: 上町断層帯地震に対する設計用地震動ならびに設計法に関する研究 (その 1, 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 I, pp. 127-130, 2011. 8
- 2) 太田寛, 國末晃寛ほか: 上町断層帯地震に対する設計用地震動ならびに設計法に関する研究 (その 3, 4), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 IV, pp. 731-734, 2011. 8
- 3) 福本義之, 西村勝尚ほか: 上町断層帯地震に対する設計用地震動ならびに設計法に関する研究 (その 5, 6, 7), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 III, pp. 689-694, 2011. 8
- 4) 小倉正恒, 貝谷淳一ほか: 上町断層帯地震に対する設計用地震動ならびに設計法に関する研究 (その 8, 9), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 II, pp. 551-554, 2011. 8
- 5) 長瀬正, 中川佳久ほか: 上町断層帯地震に対する設計用地震動ならびに設計法に関する研究 (その 10), 日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 IV, pp. 735-736, 2011. 8
- 6) 倉本洋: 多層建築物における等価 1 自由度系の地震応答特性と高次モード応答の予測, 日本建築学会構造系論文集, pp. 61-68, 2004. 6