

高層建築物の高さ方向の震度増幅に関する研究

D1-08051 大宮 憲司

1. はじめに

近年首都圏では、M8クラスの海溝型巨大地震やM7クラスの首都直下地震による大規模災害が危惧されている。また、2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、高層・超高層建築物が大きく揺れ様々な被害が確認された。今後、地震発生の可能性が高く首都機能に大きな影響を与えるといわれている想定東海・東南海連動地震¹⁾(以下、連動地震と呼ぶ)及び想定首都直下地震²⁾(以下、直下型地震と呼ぶ)において高層・超高層建築物では地表での震度が高さ方向に増幅されることが想定される。中央防災会議などで地表の震度マップが公開されているが、地表の震度だけでは高層・超高層建築物で高さ方向に揺れが増幅されるため、地表の震度よりも大きくなる可能性があり、在館者への情報として十分ではない。

本研究では、既往の研究³⁾で使用された質点系モデルを改善し、高層・超高層建築物の高さ方向における震度の増幅を考慮した各階震度分布を作成し、震災対策に役立てられるようにする。

2. 研究の流れ

本研究では、既往の研究^{4),5)}を参考に建物の固有周期から各階剛性を与えて作成した質点系モデル(以下、市村モデルと呼ぶ)の改善を行い、質点系の弾性地震応答解析をする。はじめに、東北地方太平洋沖地震の観測記録と比較し、改善した市村モデルの妥当性を確認する。次に、工学院大学高層棟(以下、大学棟と呼ぶ)とエステック情報ビル(以下、オフィス棟と呼ぶ)及び、2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録を得ることができた建物5棟において連動地震と直下型地震の解析を行い、各階の震度分布を予測する。

3. 対象建築物概要及びモデルの作成方法と補正

3.1 対象建物概要

今回は表1に示した主要構造が鉄骨造の建物を用い、市村モデルの妥当性の確認を行う。本報では紙面の都合上、大学棟での解析結果を中心に報告する。

表1 対象建物の概要

建物名	オフィス棟		大学棟		A		B		C		D		E	
	EW	NS	EW	NS	X	Y	X	Y	X	Y	EW	NS	EW	NS
1次固有周期(s)	3.181	2.981	3.001	3.110	3.321		3.060	3.580	4.430	4.391	4.97	4.64	3.659	3.839
2次固有周期(s)	1.145	1.073	1.080	1.116	1.196		1.102	1.289	1.596	1.582	1.791	1.672	1.318	1.382
地上階数	28		29		31		30		40		48		34	
建物高さ(m)	130		143		121.5		123.35		155.79		242.4		163.3	
基準階面積(m ²)	1499		1170		1810		2441.25		2458.36		3747		3709.31	
構造種別	S造													
単位面積当たりの質量(t/m ²)	0.78													

3.2 モデルの作成方法と補正

市村モデルは対象建築物の「地上階数」「建物高さ」「固有周期」「基準階面積」を用いた質点系モデルである。「地上階数」と「建物高さ」から「平均階高」を求め利用する。また、構造計算書⁶⁾から「各階面積」「層質量」を引用し、鉄骨造の「単位面積当たりの重量」を求める。そして「単位面積当たりの重量」「基準階面積」から「平均層重量」を求め利用する。

市村モデルでは上記のデータと式(1)、式(2)を利用し、各階剛性を求め作成する。しかし、これらの式から求めた剛性を用いてモデルを作成すると、下層階では剛性が過小評価され、上層階では剛性が過大評価されてしまうことが判明した。そこで、大学棟とオフィス棟の構造計算書から1階の剛性を求めるための補正值と、1階に対する各階の剛性の比率から近似式を用いてモデルの改善を行った。表2に改善前後の固有周期を、図1に各階の剛性を比較したものを示す。構造計算書の固有周期に比べ改善後の1次固有周期は0.2秒ほど過小評価されていることが確認できる。剛性は下層階において比較的良好一致していることが確認できる。

$$\bar{K} = \frac{16 \times \Delta W \times n^2}{T^2 \times g} \dots (1)$$

$$K_i = (1.5 - h_i) \bar{K} \dots (2)$$

T:1次固有周期 K:平均剛性 n:地上階数

Ki:各階剛性 ΔW:平均層重量 hi:軒高

$$H = \frac{T}{1.7} \dots (3)$$

$$\text{各階の剛性} = K_1 \times H \times 1.2929x^{-0.545} \dots (4)$$

H:補正值 T:1次固有周期 x:階数

K₁:(1),(2)式から求めた1階の剛性

表2 固有周期の比較

大学棟	構造計算書		改善前	改善後
	EW-1次	NS-1次		
固有周期	EW-1次	3.143	3.210	3.001
	NS-1次	3.309		3.110
	EW-2次	1.079	1.180	1.080
	NS-2次	1.084		1.116

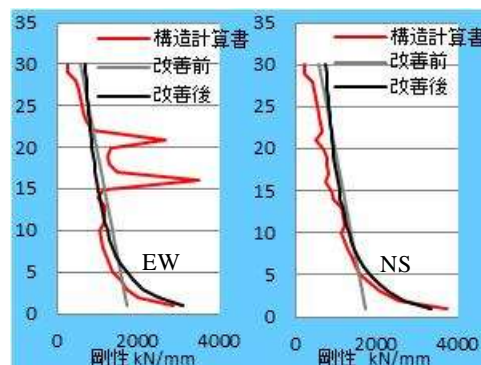


図1 各階の剛性比較

4. 入力地震波及び解析条件

4.1 入力地震波

大学棟 1 階で観測された 2011 年東北地方太平洋沖地震 (図 2) の他、連動地震 (図 3、4) 及び直下型地震 (図 5) を用いた。連動地震については、今まで短周期成分が含まれていない地震波 (図 3) を使用していたが今回新しく東海地震⁷⁾から短周期成分のみを抜き取り補完したものの (図 4) を作成し解析を行った。

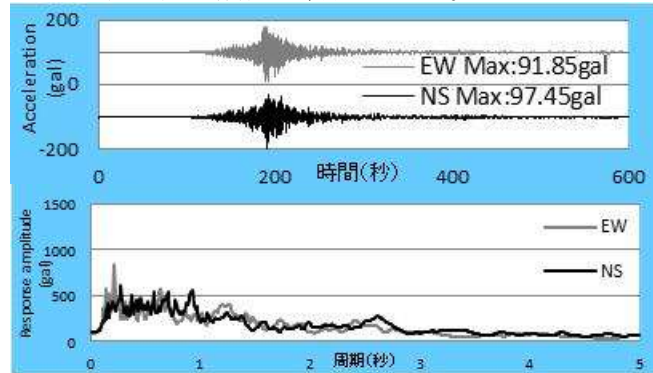


図 2 上：東北地方太平洋沖地震加速度・時刻歴波形
下：加速度応答スペクトル

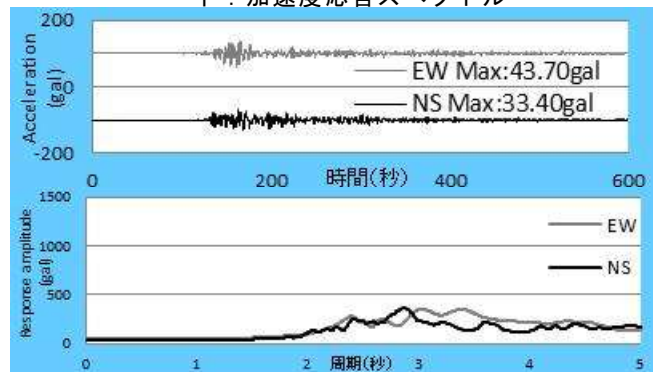


図 3 上：連動地震 加速度・時刻歴波形
下：加速度応答スペクトル

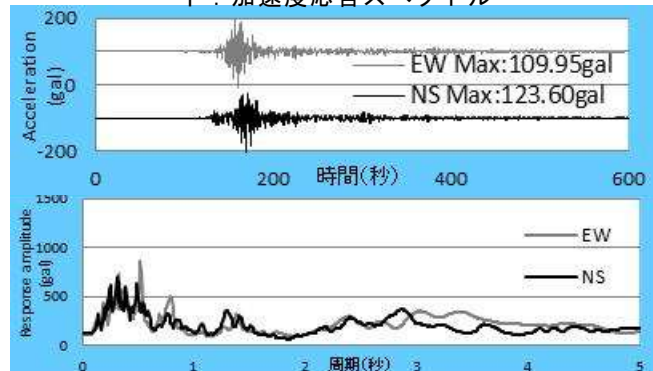


図 4 上：連動地震+短周期成分 加速度・時刻歴波形
下：加速度応答スペクトル

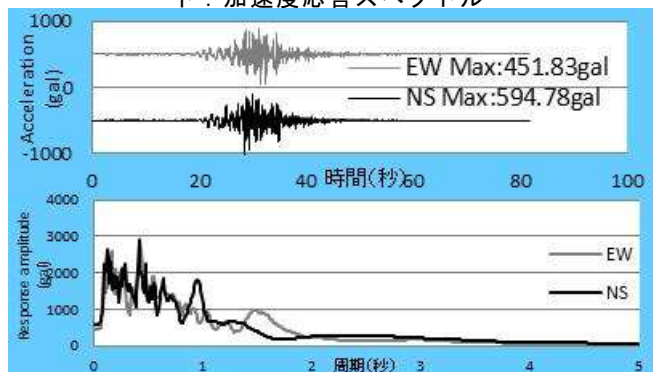


図 5 上：直下型地震 加速度・時刻歴波形
下：加速度応答スペクトル

4.2 解析条件

入力地震波は EW, NS 成分をそれぞれ入力し、1 成分ずつ解析を行う。減衰は初期剛性比例型 1%と仮定。各階の床は剛床と仮定し質点系による弾性解析を行う。

5. 解析結果

5.1 東北地方太平洋沖地震

図 6 から図 17 に各建物における最大加速度、速度、変位を比較したものと、加速度・時刻歴波形から求めた震度の比較を示す。建物 D においては頂いた観測記録が PDF 形式だったため最大加速度と最大変位は観測記録と比較できなかったが、最大速度はモデルの改善前後のみ示す。また、震度は翠川らによる手法⁸⁾ (式 5) を用いて求めた。また、建物 E においては得られた観測記録が最上階の変位だけだったため、本報での比較は省略する。

$$I = 0.32 + 2 \log(|a|_{max}) + 0.3 \cdot \cdot \cdot (5)$$

I: 震度 $|a|_{max}$: 最大加速度

図 6、7 に示す大学棟では剛性の評価方法を変えたことにより最大加速度や速度、変位、震度が観測記録と一致していることが確認できる。

図 8、9 に示すオフィス棟では最大変位や震度において若干改善されたことが確認できる。しかし、大学棟程観測記録と一致しているわけではない。これはオフィス棟における偏心が原因の一つであると考えられる。

図 10、11 に示す建物 A ではモデルを改善したことにより最大速度や変位、震度が若干観測記録に近づいたことが確認できる。しかし、最上階において震度が過小評価されてしまっている。

図 12、13 に示す建物 B では、最大加速度、速度、変位、震度の全てにおいてモデルを改善したことで観測記録に若干近づいたことが確認できる。

図 14、15 に示す建物 C では、モデルを改善したことで最大加速度が観測記録と一致するようになったことが確認できる。しかし、速度や変位、震度を比較すると既往の手法を用いてモデルを作成したほうが観測記録に近いことが確認できる。

図 16、17 に示す建物 D では、剛性の評価方法を変えてもあまり変化は見られなかった。

全体的に比較すると、建物の階数が 30 階前後のものに関しては、剛性の評価方法を変えたモデルのほうが観測記録に近い結果が得られたが、40 階建ての建物においては、あまり変化しないことが確認できた。

これは、大学棟及びオフィス棟の構造計算書に書かれている剛性を参考に、各階における剛性の評価方法を変えたからだと考えられる。

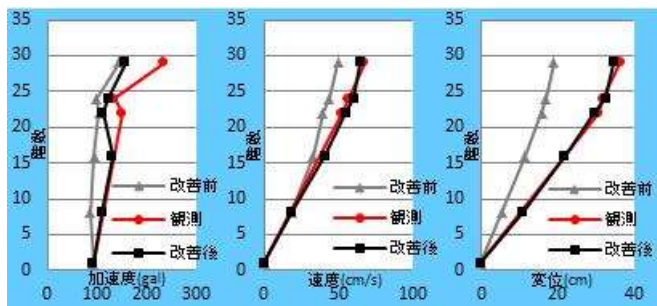


図6 東北地方太平洋沖地震 最大値比較
左から大学棟 EW方向の加速度、速度、変位

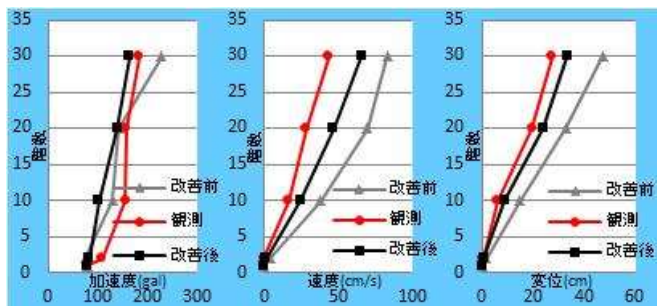


図12 東北地方太平洋沖地震 最大値比較
左から建物BのX方向 加速度、速度、変位

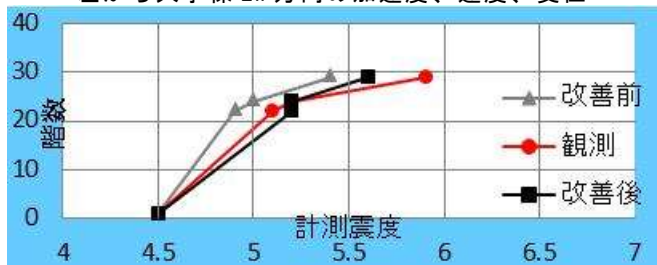


図7 大学棟 震度比較

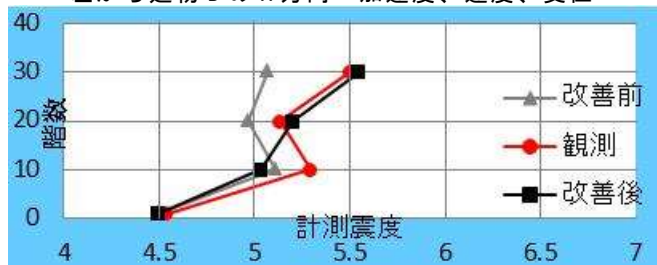


図13 建物B 震度比較

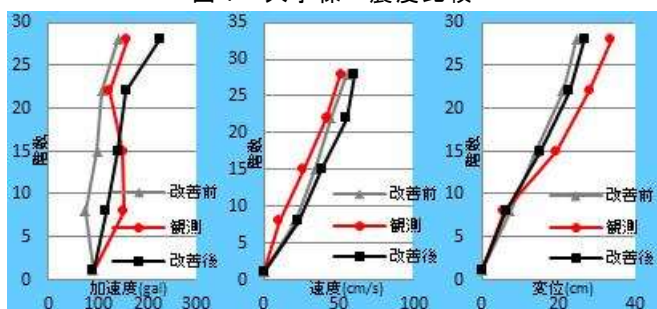


図8 東北地方太平洋沖地震 最大値比較
左からオフィス棟 EW方向の加速度、速度、変位

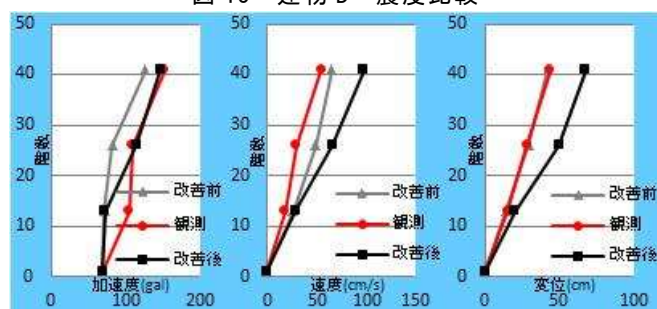


図14 東北地方太平洋沖地震 最大値比較
左から建物CのX方向 加速度、速度、変位

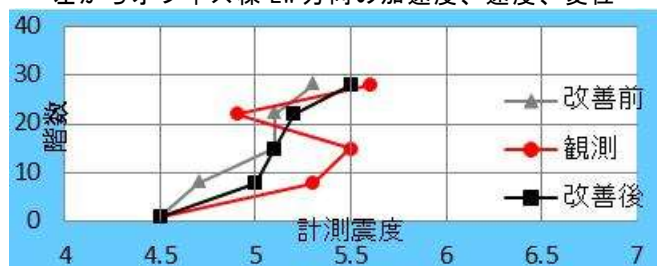


図9 オフィス棟 震度比較

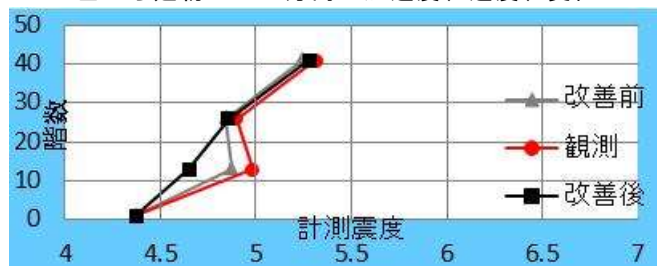


図15 建物C 震度比較

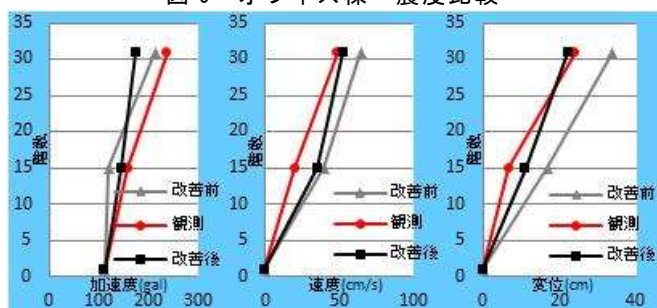


図10 東北地方太平洋沖地震 最大値比較
左から建物AのX方向 加速度、速度、変位

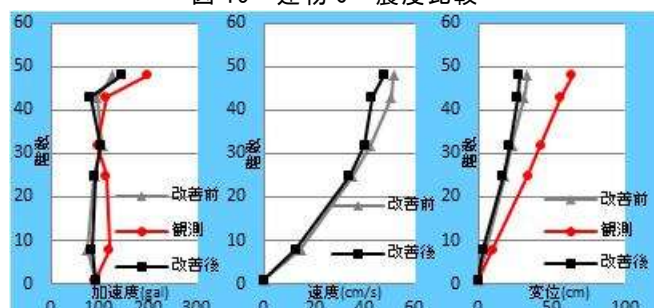


図16 東北地方太平洋沖地震 最大値比較
左から建物DのX方向 加速度、速度、変位

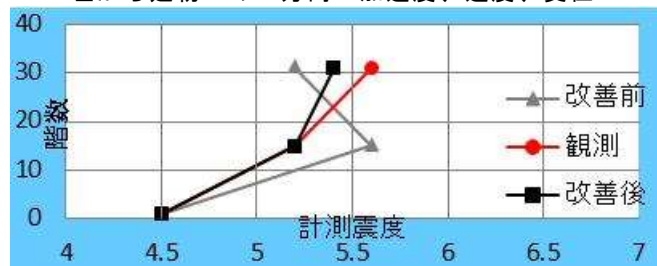


図11 建物A 震度比較

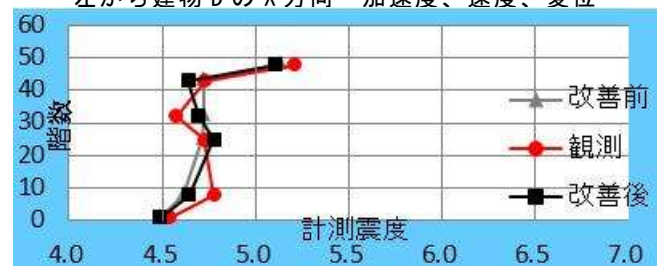


図17 建物D 震度比較

5.2 連動地震

図 18 は連動地震による解析結果から求めた各階の震度を示したものである。どの建物においても上層階になるにつれ震度が増幅していることが確認できる。これは建物が 1 次モードで揺れているためと考えられる。

図 19 は大学棟における各階の最大加速度、速度、変位を示したものである。地表面での加速度は約 123gal だが EW 方向の最上階では約 500gal まで増幅している。

連動地震では、1 次固有周期が 3 秒程度の建物において一番揺れやすく、同じ建物においても地表階と最上階で震度に大きな差が生じていることが確認できる。そのため、上層階においては家具の転倒防止など事前の対策を十分しておく必要がある。

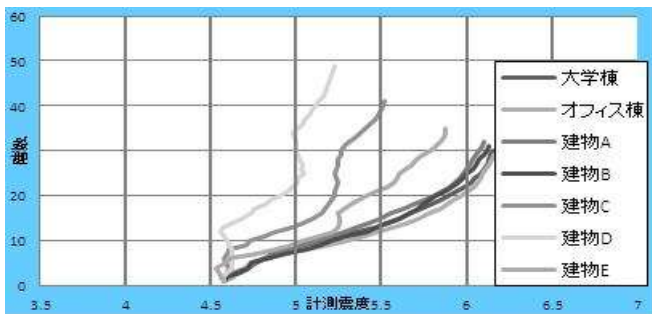


図 18 連動地震 各階震度

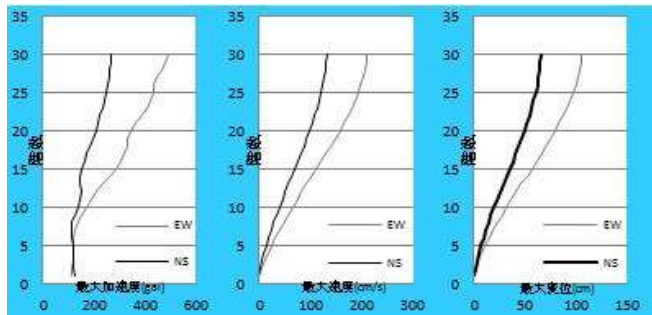


図 19 連動地震 最大値比較

左から大学棟の最大加速度、速度、変位

5.3 直下型地震

図 20 は直下型地震の解析結果から各階の震度を求めたものである。連動地震と比較すると高さ方向における震度の増幅はあまり見られない。

しかし、中層階において震度が大きくなっていることが確認できる。これは、建物が 2 次モードで揺れていることが原因だと考えられる。また、最大加速度は連動地震より大きい、速度や変位はあまり大きくないことが確認できる。

連動地震のときは、建物が 1 次モードで揺れているため上の階になるにつれ大きく揺れ、高さ方向に震度が増幅されていたが、直下型地震では、建物が複雑に揺れ中層階などでも震度が大きくなってしまうことがあるため、上層階だけでなく、中層階においても家具の転倒防止など事前の対策をする必要がある。



図 20 直下型地震 各階震度比較

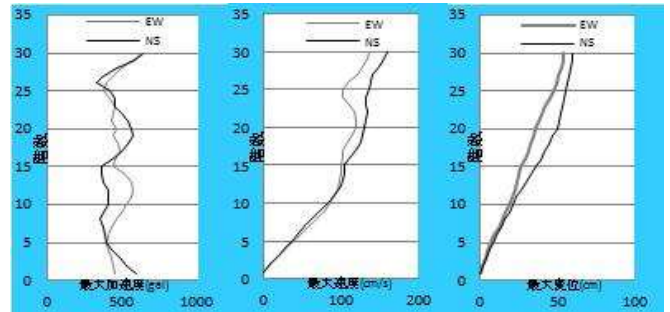


図 21 直下型地震 最大値比較

左から大学棟の最大加速度、速度、変位

6. まとめと今後の課題

モデルの改善を行い大学棟やオフィス棟の他、東北地方太平洋沖地震の観測記録を得られた建物において解析をした。次に連動地震および直下型地震の解析を行い、各階の震度分布を求めた。連動地震では、建物が 1 次モードで揺れるため震度が高さ方向に増幅していることが確認できた。直下型地震では、建物が 2 次モードで揺れるため上層階だけでなく中層階においても震度が大きくなっていることが確認できる。

今回モデルを改善するに当たり、大学棟とオフィス棟の構造計算書から 1 階に対する各階の剛性の比を求め、近似曲線を用いたが、大学棟にあるスーパーフレームにより上層階の剛性がやや過大評価されてしまった。40 階以上の建物においては既往の手法を用いた方が良い結果が得られた。また、今回解析モデルの妥当性を確認するために用いた建物はすべて 30 階建て以上だったため、今後はこの手法を低層や中層の建物に適応した場合どの程度モデルの妥当性を示せるのか検討する必要がある。

参考文献

- 大成建設株式会社:新宿センタービルの長周期・長時間地震動対策、POST EEC 資料、2008.8.5
- 田中良一他:首都圏に建つ超高層キャンパスと地域連携による地震防災に関する研究(その2)首都直下地震の強震動予測、日本建築学会大会学術講演梗概集(中国)、構造II、pp.815-816、2008.9
- 立原久照:東京湾北部地震における高層建築物の震度増幅に関する研究 工学院大学 2010 年度卒業論文
- 市村将太、福島東陽、寺本隆幸:鋼構造超高層建築物の設計用パラメータに関する研究-その1-剛性分布・固有周期・ベースシャー係数- 日本建築学会 1999 年
- 市村将太、福島東陽、寺本隆幸:超高層鋼構造建物の弾性設計用パラメータに関する研究(その1)各パラメータの定式化 日本建築学会 2000 年
- ㈱日本設計事務所:KDN 街区再開発計画 1987 年
- 土方勝一郎、植竹富一、金谷淳二、真下貢、早川崇、渡辺基史、佐藤俊明:関東平野における東海地震の広帯域な強震動予測 2005.12.26
- 翠川三郎、藤本一雄、村松郁栄:計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指摘との関係、地震安全学会論文集 pp.51-56、1999 年 11 月