

(117) 中・高層建築物における高さ方向の震度増加について
—アンケート調査の結果とその地震応答解析による検証—

○楢橋 秀衛(九産大・工) 表 俊一郎(元九産大・工)

§ 1 緒言

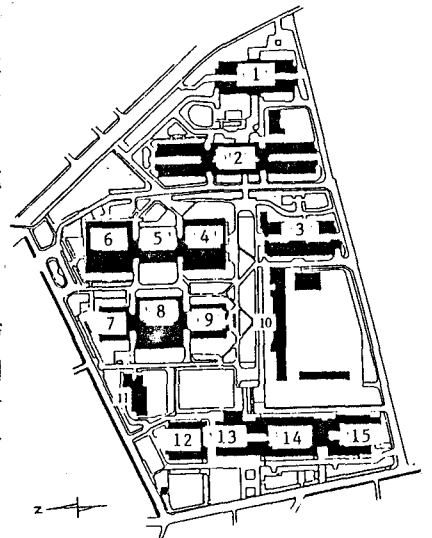
1978年宮城県沖地震では高層建築物の倒壊はなかったものの、仙台市の中・高層集合住宅の上層階では冷蔵庫、食器棚、タンス、本箱等の転倒が著しく生じた。また、SRC12階建の福島県庁舎では、11階に設置されていた電子計算機室の電子計算機架が床を滑り互いに衝突したりしたため破損し、電算機の機能を喪失するに至った。これらの事例から、中・高層建物に係わる地震災害の新しい局面が認識された。建物の高さ方向へ震度がどの程度増幅するかを明らかにすることは、これらの地震災害の防止対策を考えるための基本であり、なお充分な観測・調査が行なわれなくてはならないと言える。筆者らは、1978年の宮城県沖地震の際に仙台市内の建物各階の震度をアンケート調査法によって調べて以来、同様の調査を重ねてきている。この調査法の利点は、地震を経験した人さえあれば地震の強さが決められることである。本論では、川崎市河原町団地9-14階建てアパート群について、三つの地震(1978年宮城県沖地震、1980年伊豆半島沖地震、1983年神奈川・山梨県境地震)の際に行なったアンケート調査の結果に基づいて、建物の高さ方向への震度増幅の問題を論ずる。また、アンケート調査の結果を理論的に確かめるため行なったアパート群の地震応答解析について述べる。この理論解析は、必要なデータの不足を多くの仮定で補ってはいるが、計算により求められた建物各階の震度(最大絶対加速度より換算)とアンケート調査による震度とのある程度の整合性は確かめられた。

§ 2 川崎市河原町団地の概要

川崎市河原町団地の住棟配置を図1に示す。団地内建物には1から15までの番号が付けられているが、番号10、11の建物は小学校、幼稚園等の施設であり、住棟ではない。河原町団地の特徴は次の通り。①住棟は全てがツインコリダー型で、各住棟は殆ど同一のプラン・構造を有するブロックを並置して構成されている。例えば、1号棟(14階建)といっても構造上は2つの建物であることは注意する必要がある。2号棟(14階建と9階建)は例外で、上記のツインコリダー型住棟を3棟エキスパンションジョイントで繋いだものである。②番号の異なる住棟でも同一のプラン・構造を有するものがある。4・6・8号棟(14階建)は逆Y字型の特徴的な立面を有する住棟で、構造は皆同じと考えてよい。5・7・9号棟(9階建)も構造上は同一視できる。③13-15号棟はメゾネット型であり、住戸が2つの階により構成されている。④全ての住棟はSRC造9-14階建である。

§ 3 アンケート調査の概要と結果

アンケート調査には、太田裕の調査票を用いた。アンケート調査票は、1階から最上階迄の各階にもれなく20枚以上が配布されるようにした。回収した有効回答票について、まず個々の回答の震度値を算出し、次にこの震度値を各階毎に平均してそれぞれの階の震度と定めた。表1に調査を行なった三つの地震のマグニチュード、東京の震度(JMA)、および河原町団地までの震央距離を示す。以下には3地震の調査概要および結果を記す。



(1)1978年宮城県沖地震 1号棟から15号棟までの全ての住 図1 川崎市河原町団地の住棟配置

棟について、各棟各階20枚ずつの調査票を配布した。回答票の回収率は非常に高かったが、地震が発生したのが午後5時15分頃のため外出者が多く、有効回答数が僅かに2-3枚に止まった階も生じた。配布2500枚に対し有効回答数1,106枚と全体的には高い回答数が得られた。特に、1号棟、2号棟および

表1 アンケート調査を行なった地震

Date	Name of Earthq.	M	Seismic Intensity in Tokyo JMA	Epicentral Distance to Kawara-machi
1978 06.12	Miyagiken-Oki Earthquake	7.4	4	370 km
1980 06.29	Izuhanto-Toho-Oki Earthquake	6.7	4	85
1983 08.08	Yamanashi-Kanagawa-Border Earthquake	6.0	4	64

8号棟(いずれも14階建)で全階にわたる有効回答を得た。

(2)1980年伊豆半島東方沖地震 総数7,314枚のアンケート調査票が配布され、5,282枚が回収された(回収率72.3%)。本研究の3ケースの中で最も規模の大きい調査である。全ての住棟の殆ど全ての階で20枚以上の有効回答を得た。

(3)1983年神奈川・山梨県境地震 調査の主たる目的は、宮城県沖地震および伊豆半島東方沖地震について得られている結果の検討を行なうことであった。上記2つの地震の場合に比較的多数の有効回答が得られており、地震時の揺れ方がある程度把握されていた第1号、2号、13号及び15号棟の4棟だけについて調査票の配布を行なった。これらの4棟に合計3,000枚の調査票を配布し、1,502枚の回答を得た。このうち782枚の回答が調査対象住棟内で地震を体験した人からのものであった。

(4)結果 紙数の都合上、ここでは三つの地震について2号棟の結果のみを示す(図2)。図に現れている傾向は、他の住棟でも変わらない。

§4 アンケート調査結果の検討

3つの地震について、河原町団地住棟の1階から最上階までの各階の震度を知ることができた。本節ではその結果を検討する。

(1)建物1階の震度 1階の震度はその場所の地表の震度であると考えられる。宮城県沖地震の場合、1号棟から15号棟までの1階の震度はいずれも3.4-3.5である。伊豆半島東方沖地震の場合、1階の震度はいずれの棟の場合も3.8前後となり、宮城県沖地震の場合より大きい。また、建物の違いによる1階震度の差は小さく、この程度の回収票があれば、推定される震度の信頼性はかなり高いことを示している。神奈川・山梨県境地震の場合は、数棟についてだけ調査が行なわれたのであるが、1階の震度は3.0と求められている。

(2)地上階震度と最上階震度との差異 住棟の高さ方向へ震度が増大する有様は地震により異なる。その問題は次項で考察することとして、ここでは1階の震度と最上階の震度との差について述べる。表2は、三つの地震について住棟の1階と最上階との震度の差をまとめたものである。次のことが言える。

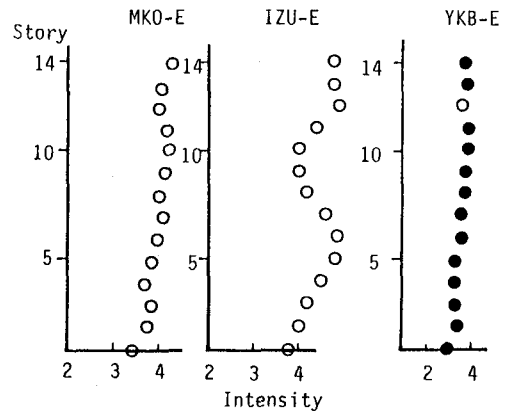


図2 アンケート調査による各階震度(2号棟)

表2 地上階震度と最上階震度との差異

MKO-E	Blg.	No.1	No.2	No.8	No.14	No.15
		0.9	1.0	1.0	0.95	1.0
IZU-E	Blg.	No.1	No.2	No.4	No.6	No.8
		1.0	1.0	1.0	1.0	0.9
YKB-E	Blg.	No.1	No.2	No.13		
		1.0	1.0	1.1		

①14階建の住棟の1階と最上階との震度の差は、地震によらず、気象庁震度階でちょうど1階級である。表2には示していないが、9-11階建の住棟の場合1階と最上階との震度の差の平均は1未満、0.8前後の値である。②最上階の震度が1階の震度に較べて1階級程度大きいということは、最上階は地上の3倍程度の加速度になることに当たる。建物躯体の耐震設計は充分でも、建物の内外装材、室内の重家具等に大な被害が発生する可能性は指摘する必要がある。③中・高層建物の最上階は1階と較べて震度5または6の再現間隔が非常に短くなる。東京・川崎地域の場合、統計上2年に1回の割合で震度5を経験することになる。

(3)震度増加の地震による相違 図2から分るように、建物の高さ方向への震度の増大する有様は地震によって異なっている。宮城県沖地震の場合、ほぼ単調に増加している。伊豆半島東方沖地震の場合、1階から6階までは震度の増大が急であるが、それより上層では高さと共に震度が減少し10階を越えるあたりから再び震度が大きくなっている。河原町団地の住棟は構造上幾つかのグループに分類されるが、同一グループに属する住棟の各階の震度はほとんど一致しており、両地震間で住棟の揺れに差があった事は確かのようなのである。

§5 地震応答解析による震度分布の検討

図2に見たように、住棟の高さ方向への震度増大の有様は、宮城県沖地震の場合と伊豆半島東方沖地震の場合とで著しく異なっている。このことを物理的に検証してみよう。河角に従って、震度階と対応する物理尺度として加速度の最大値を用いることにする。河原町団地では、住棟および敷地いずれにも地震計は設置されていない。ここでは、次の二つの方法で地震応答を推定した。

(1)応答スペクトルを用いる方法 経験的に求められている一般的な地震動の応答スペクトルを利用して、簡単に建物の最大応答加速度を推定した。宮城県沖地震と伊豆半島東方沖地震のマグニチュード、震源距離はそれぞれ $M=7.4$ 、 $\Delta=370$ kmおよび $M=6.7$ 、 $\Delta=85$ kmである。これらの値と表3に示す住棟の固有周期から計算される。ただし、減衰定数は振動次数に係わらず一律5%とした。得られた最大加速度 α (gal)を次頁の式(1)によって震度に換算した。解析の結果は、宮城県沖地震の場合は1次モードが、また伊豆半島東方沖地震の場合は2次モードがそれぞれ相対的に支配的となることを示した。図2のアンケート調査の結果と比較すると、宮城県沖地震の場合よりむしろ伊豆半島東方沖地震の場合の方が、良く対応している。

(2)推定入力地震動を用いた応答解析 河原町団地から10-15km距った京浜港湾の港湾技術研究所の二つの強震計(以下、YH-S、KJ-Sと呼ぶ)が宮城県沖地震および伊豆半島東方沖地震について記録を得ている。また、東京芝浦にある清水建設KKの鉛直アレー(以下、SA-Sと呼ぶ)により宮城県沖地震および伊豆半島東方沖地震の記録が得られている。これらの記録から河原町団

表3 河原町団地住棟の固有振動周期(秒)

period (sec)	1st order		2nd order		3rd order		4th order	
	X	Y	X	Y	X	Y	X	Y
building								
No.12	0.65	0.69	0.23	0.24	0.14	0.15	0.11	0.11
No.13	1.14	1.23	0.45	0.48	0.27	0.30	0.20	0.22
No.15	0.97	0.89	0.38	0.35	0.23	0.22	0.16	0.17

X: longer side, Y: shorter side

表4 3観測点の記録の最大加速度値(gal)

Station	YH-S		KJ-S		SA-S	
	N33E	S57E	N33E	S57E	N35E	S55E
Earthq.						
MKO-E	14.0	14.4	27.8	21.0	25.2	32.8
IZU-E	69.6	58.4	29.5	30.8	14.6	16.4

地サイトの地震動を推定し、これを住棟への入力として応答解析を行なった。各観測点の記録の最大加速度は表4に示している。入力地震動の推定は次の様に行なった。①地表面下のやや浅い地盤の増幅効果を考慮する。モデルは、水平成層内のS波の鉛直重複反射を用いる。観測点および敷地に共通する層（解析用の地震基盤）はボーリング資料に示された最下層とする。②伊豆半島東方沖地震については、計算された地表面地震動の最大加速度値がアンケート調査による地表面震度と対応するよう調整した。③検定を目的として、計算された地表面地震動のフーリエスペクトルを比較した。宮城県沖地震の場合、観測点および観測成分による差は小さい。伊豆半島東方沖地震の場合、4 Hz以上の成分においてSA-Sの方がYH-SおよびKJ-Sより勢力が大きいという差がある。④尚、宮城県沖地震、伊豆半島東方沖地震いずれの場合も、観測波形のランニングスペクトルでは分散性は認められない。ただ、宮城県沖地震の記録は周期1秒程度の成分が大きな勢力を持っている。これは観測点の地盤の1次卓越周期よりも長い周期であり、上に述べた解析用地震基盤の設定は意味が薄い。

(3)結果 SA-Sの記録から作成した入力地震動による、12、13および15号棟についての応答計算結果を図3に示す。ただし、応答の最大加速度 α は下式(1)によって震度Iに変換している。

$$\alpha = 0.253 \times 10^{0.5I} \quad (1)$$

図3の中の黒丸は、住棟各階のアンケート震度の平均値 μ を示し、黒丸の左右にのびる線分は $\mu \pm \sigma$ の範囲を現わしている。また、白丸は応答計算の結果である。図から明らかなように、住棟の高さ方向へ震度が増大する有様は、宮城県沖地震の場合上階に向かって緩やかに増加する傾向を示すのに対して、伊豆半島東方沖地震の場合中間階にくびれのある形状を示しており、アンケート調査による結果と概ね同様の傾向を示している。しかし、前項に述べた簡単な解析の結果を大きく改善してはいない。12号棟については、むしろ対応は悪くなっている。

§6 結語

三つの地震について、アンケート調査から求められた川崎市河原町団地住棟の高さ方向への震度増大の傾向は、住棟の簡単な応答解析からも物理的に検証された。中・高層建物の最上階の震度は1階の震度より1階級、最大加速度で3倍程度大きくなることはアンケート調査の分解能でも確認できる、といえる。

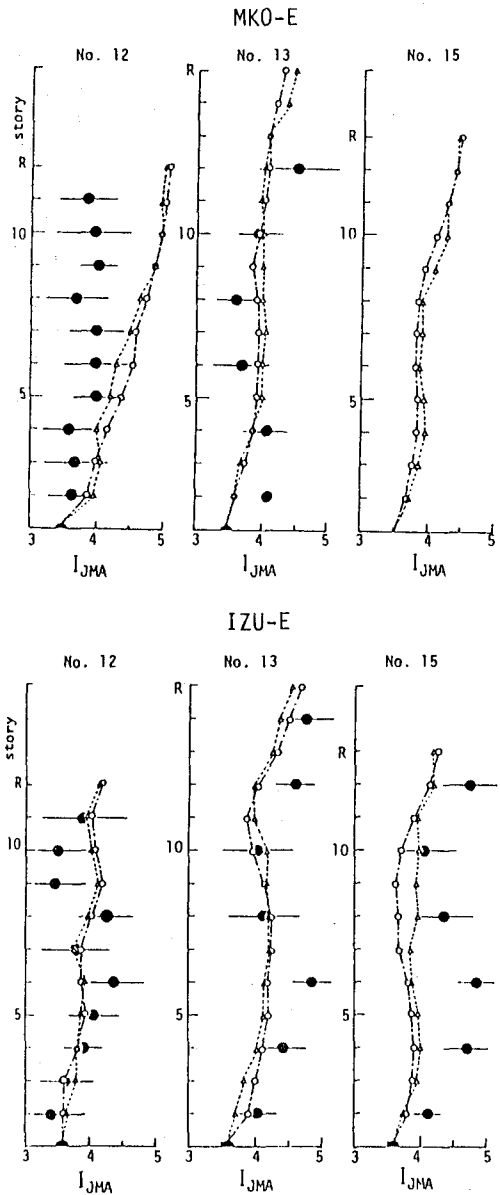


図3 アンケート調査および地震応答解析による各階震度の比較(12、13、15号棟)