

超高層鉄筋コンクリート建物の耐震設計法に関する研究 (その4)

—30層モデル建物を対象とした6層RC骨組の地震動破壊実験—

江戸 宏彰 武田 寿一

Study on Aseismic Design of High-rise Reinforced Concrete Buildings (Part 4)

—Simulated Earthquake Tests of 6-Story Reinforced Concrete Frame Structures for a 30-Story Prototype Building—

Hiroaki Eto Toshikazu Takeda

Abstract

Simulated earthquake tests, static loading tests and their analyses were carried out on 6-story reinforced concrete model frame structures. The specimens were models of the bottom part of a 30-story prototype reinforced concrete building. It was possible for the aseismic safety of this prototype building and the reliability of the inelastic frame earthquake response analysis method employed in the design work to be confirmed.

The principal results of these tests and their analyses are summarized as follows: (1) Against input earthquake waves assuming strong and severe earthquakes, the maximum response ductility factors (μ) were 0.96 and 1.36, respectively. The design targets of $\mu < 1, 2$, were respectively satisfied by test results. (2) In subsequent input earthquake waves assuming the test target of $\mu = 4$, the specimens, as aimed for in design, were of total collapse form of beam-yielding type, and demonstrated hysteretic response characteristics of good ductility. (3) The calculated results according to the inelastic frame earthquake response analysis method were roughly equal to measured ones.

概要

本論文では、(その1)¹⁾で設計した30層RCモデル建物の最下層部をモデル化した、6層RCラーメン骨組の振動実験、静加力実験およびそれらの解析を行ない、この30層モデル建物の耐震性能の確認、梁降伏形RC骨組の地震時の弾塑性挙動の把握および設計で用いた弾塑性地震応答フレーム解析法の妥当性確認を行なった。

これらの結果をまとめると、次のようになる。(1) 中地震および大地震を想定した実地震波による振動実験において、試験体の最大応答塑性率 μ はそれぞれ0.96, 1.36で、設計で設定した条件(それぞれ $\mu < 1, 2$)を満足している。(2) その後の $\mu = 4$ 程度の大変形に至る振動実験においては、試験体は設計で意図したように、梁降伏形の全体崩壊形となり、靱性の良好な復元力特性を示した。(3) 弾塑性地震応答フレーム解析結果は、実験結果とおおむね良く一致している。

1. 序

(その1)¹⁾で、靱性の良好な梁曲げ降伏形の30階建鉄筋コンクリート(以後、RCと略す)造モデル建物を設計し、さらに弾塑性地震応答フレーム解析法によって大地震時の弾塑性応答の把握および耐震安全性の検討を行なった。

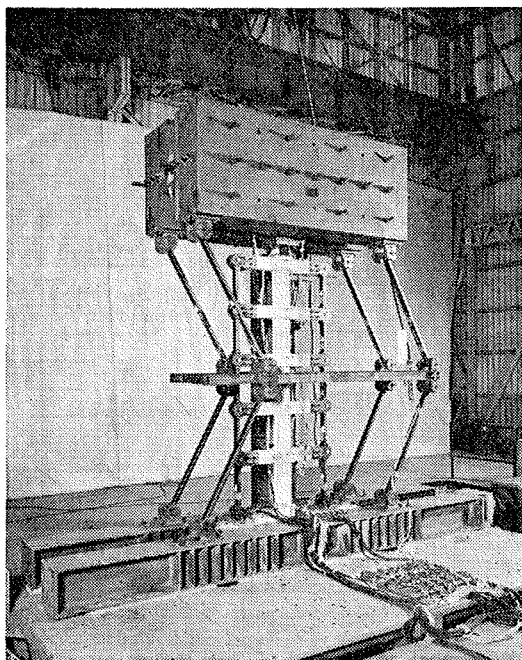
この30層モデル建物の耐震性能の確認および梁降伏形RC骨組の地震時の弾塑性挙動の把握を、振動実験を通して行なうことを目的として、30層モデル建物の中柱部

の最下層部をモデル化した6層RCラーメン骨組の振動実験および静加力実験を行なった。さらに、30層モデル建物の設計で用いた弾塑性地震応答フレーム解析法によって、これらの実験結果の解析を行ない、この解析法の妥当性を確認した。

本論文では、これらの実験結果、解析結果およびそれらの検討結果について述べる。

2. 試験体

2.1. 30層モデル建物の試験体へのモデル化



図—4 振動実験状況

め、崩壊機構を梁端および1層の柱脚が降伏する梁降伏形として、仮想仕事の原理を用いて求めると、 $C_u=0.22$ である。これは、同様にして求めた30層モデル建物の $C_u=0.23$ (1質点系に換算した値) とほぼ等しい。

なお、4章で述べるフレーム解析法で求めた試験体の弾性固有周期 $T_{ca1}=0.370$ 秒で、30層モデル建物の弾性1次周期 $T_{30}=1.813$ 秒の約 $1/5$ である。

2.3. 使用材料の性質

コンクリートは豆砂利普通コンクリートで、圧縮強度 $\sigma_B=523 \text{ kg/cm}^2$ 、ヤング係数 $E=254 \text{ t/cm}^2$ (3試験体の平均値) である。鉄筋 D 6, 4 ϕ , 3.2 ϕ は、それぞれ降伏強度 $s\sigma_y=3,770, 2,940, 3,290 \text{ kg/cm}^2$ である。

3. 実験方法

振動実験を2体 (YD 61, YD 62)、静加力実験を1体 (YS 61) 行なった (表—1 参照)。

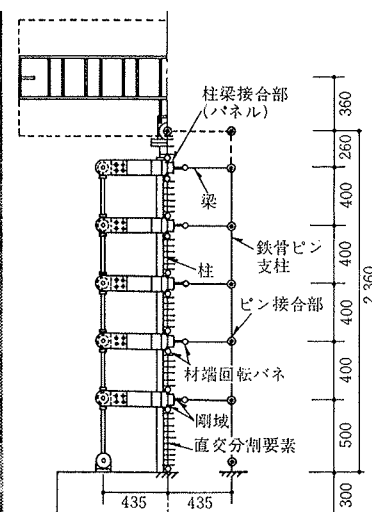
3.1. 振動実験方法

図—4 に振動実験状況を示す。

振動実験は、前述のように、振動台の入力地震波をいずれも八戸 1968 NS 地震波として行なった。

30層モデル建物の設計では、地震動の大きさを中地震 (地震最大加速度を 250 gal とする) と大地震 (400 gal とする) の2段階に分けて考え、設計条件としてそれぞれ層の塑性率 $\mu < 1, 2$ としている。

そこで、YD 61, YD 62 は、最初にそれぞれ中地震時、大地震時の30層モデル建物の弾塑性応答を再現する実験を行ない、その後 $\mu=4$ 程度の大変形に至る実験を行なった。なおこれらの振動実験の前に、試験体の変形が非



図—5 解析モデル

常に小さいレベルで自由振動実験を行なっている。

中・大地震を再現する実験では、試験体の弾性周期が30層モデル建物の弾性1次周期の約 $1/5$ であるが、振動台へ入力する地震波は、入力地震波作製の都合上から時間軸を $1/4$ に縮小したものとした。入力地震波の最大加速度は、試験体と30層モデル建物の崩壊機構時のせん断力係数がほぼ等しいことから、30層モデル建物の設計時と同じ値にすればよいので、中地震時 (YD 61) は 250 gal (以後、HACH $1/4-250$ とよぶ) とした。

大地震時 (YD 62) は振動台の特性上の制約から 350 gal (HACH $1/4-350$) とした。

$\mu=4$ 程度の大変形に至る実験では、あらかじめ予備地震応答解析を行ない、その結果を参考にして、YD 61, YD 62 ともに入力地震波の時間軸を実時間、最大加速度を 400 gal (HACH $1/1-400$) とした。

3.2. 静加力実験方法

静加力実験 (YS 61) は、6層鉄骨梁端部中央でオイルジャッキによって水平力を正負71回繰返し加えて行なった。繰返しは変位制御とし、振動実験との対応をみるため、振動実験結果を忠実にトレースすることを目標にして、YD 62 の HACH $1/4-350$ (静加力実験では、 $\pm 1 \sim \pm 25$ サイクルとなる) と HACH $1/1-400$ ($\pm 26 \sim \pm 71$ サイクル) の6層の相対変位波形の各波の最大値と最小値で順次行なった。

4. 解析方法

解析は、試験体を図—5 に示すようにモデル化し、設計で用いた弾塑性平面フレーム地震応答解析法^{3),4)}を用いて行なった。

解析では、柱の曲げの弾塑性性状は、材軸に直交に分割した要素と材端に挿入した仮定の剛塑性回転バネで表わす。回転バネは柱梁接合部からの主筋の抜け出しによる付加変形を考慮するためのものである。梁の曲げの弾塑性性状は、材軸に沿った弾塑性性状と主筋の抜け出しによる付加変形を考慮に入れた、材端の仮定の剛塑性回転バネで表わす。

柱・梁・柱梁接合部のせん断変形および柱の軸方向変形は弾性とする。

直交分割要素および材端バネの復元力特性は、Degrading Tri-Linear 形モデル (Takeda モデル) とする。

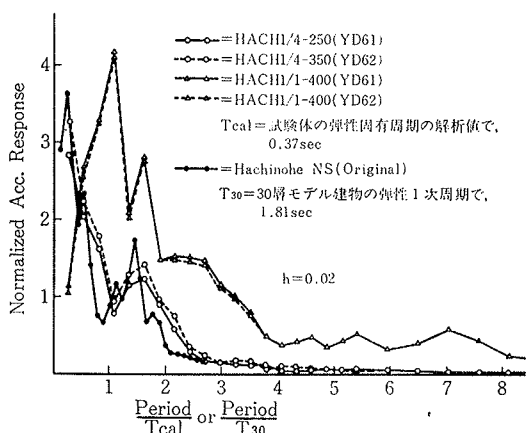


図-6 入力地震波の加速度応答スペクトル

部材の復元力特性のモデル化にあたって、柱・梁のモーメント～曲率関係は鉄筋コンクリートの塑性理論によって求める。材端バネの降伏回転角のうち、柱梁接合部からの主筋の抜け出しによる付加変形は、主筋降伏時の平均付着応力度を、主筋に用いたD6が最小異形鉄筋で、一般に主筋に用いられている鉄筋よりフシの山が小さくて付着性能が劣るため、文献5)による値の1/2の20kg/cm²とする。

動的解析は、振動実験で測定された基礎の加速度(A0)を入力地震波として用い、計算時間きざみを0.005秒、減衰を内部減衰瞬間剛性比例型とし、減衰定数を2%として行なった。

5. 実験および解析結果とその検討

5.1. 固有周期

自由振動実験結果では、YD61, YD62の固有周期はそれぞれ0.488, 0.466秒、また減衰定数は約3%であった。固有周期は、弾性固有周期の解析値 T_{cal}=0.370秒の約1.26~1.32倍と大きい。これは、試験体の運搬や

鉄骨ピン支柱を梁にとりつける際に試験体にひび割れが生じて、初期剛性が低下したためと思われる。

5.2. 入力地震波の性質

図-6に、YD61とYD62の基礎の加速度(A0)の測定波形と、八戸1968NS実地震波の加速度応答スペクトルを比較して示す。図の縦軸は、A0の場合は測定波形の最大加速度、八戸1968NSの場合は地震波の最大加速度で基準化した加速度応答倍率を表わす。横軸は周期を、A0の場合は試験体の弾性周期の解析値、八戸1968NSの場合は30層モデル建物の弾性1次周期で基準化したものである。

中、大地震を再現する実験HACH1/4-250(YD61)とHACH1/4-350(YD62)のA0の応答スペクトルはほぼ等しく、試験体の弾塑性振動に影響を及ぼす弾性周期以後にもピークがあり、この部分の応答スペクトルの大きさと傾向は、30層モデル建物の1次周期と八戸1968NSの応答スペクトルとの関係と良く対応している。

$\mu=4$ 程度の大変形に至る実験HACH1/1-400においては、YD61とYD62のA0の応答スペクトルはほぼ等しく、試験体の弾性周期以後の部分ではA0の応答スペクトルはHACH1/4-250, 350および八戸1968NSの応答スペクトルより著しく大きい。これは、設計で想定しているよりも入力著しく大きいことを示している。

5.3. 最大応答値

表-1に、YD61, YD62, YS61の加速度、慣性力(F:6層の質量(MASS)と6層の絶対加速度(A6)との積)または水平力(P)および6層の基礎に対する相対変位(Y6)の最大応答値を示す。

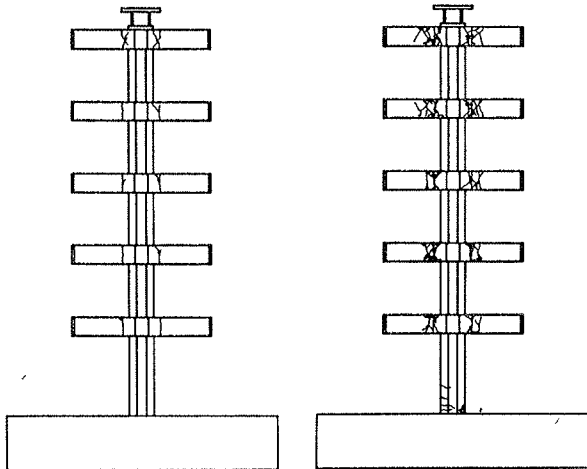
YD61, YD62の実験結果をみると、A6の最大値は214~255galで、A0の最大値の0.61~0.87倍、Y6の最大値は2.40~9.31cmで、塑性率($\mu=Y6/\delta y; \delta y$ =後述する静加力実験の降伏点の変位)で0.96~3.72であ

試験体	実験名称 または 加力サイクル	基礎の 加速度 A0 (gal)	6層の絶対加速度 A6 (gal)			慣性力*2または水平力 F(t) P(t)				6層の相対変位 Y6 (cm)				全体 変形角 R	塑性率 μ
			実験値	解析値	実験値	FまたはP		実験値	Y6						
						解析値	Y6		解析値	Y6					
YD61 (振動 実験)	① HACH1/4-250 (中地震時の応答)	246 (5.76)	214 (9.01)	164 (8.99)	1.30	1.95 (9.01)	2.40 (9.03)	1.49 (9.00)	1.31	2.40 (9.03)	1.88 (9.03)	1.45 (9.00)	1.66	1/98	0.96
	② HACH1/1-400 (μ=4の大変形)	395 (18.17)	255 (18.30)	244 (18.46)	1.05	2.33 (18.30)	6.33 (18.41)	2.14 (18.91)	1.09	8.57 (36.82)	2.00 (36.78)	7.58 (18.91)	1.13	1/28	3.43
YD62 (振動 実験)	① HACH1/4-350 (大地震時の応答)	342 (5.16)	226 (7.53)	211 (8.18)	1.07	2.07 (7.53)	2.94 (7.58)	1.94 (8.18)	1.07	3.40 (9.30)	1.98 (9.28)	2.89 (8.18)	1.18	1/69	1.36
	② HACH1/1-400 (μ=4の大変形)	406 (18.18)	249 (18.31)	240 (18.90)	1.04	2.27 (18.31)	7.87 (18.52)	2.18 (18.91)	1.04	9.31 (36.88)	1.92 (36.86)	6.55 (18.91)	1.42	1/25	3.72
YS61 (静加力 実験)	① ±1~±25サイクル (YD62の①)	—	—	—	—	2.07 (-10)	2.95 (-10)	Y6=2.95 P=1.89	1.10	3.40 (+13)	1.90 (+13)	Y6=3.40 P=1.93	0.98	*7 1/69	1.36
	② ±26~±71サイクル (YD62の②)	—	—	—	—	2.18 (+41)	7.86 (+41)	Y6=7.86 P=2.15	1.01	9.29 (+59)	1.77 (+59)	Y6=9.29 P=2.21	0.80	*7 1/25	3.72

*1 ()内の数字は生起時刻(sec)または加力サイクル、*2 F=(6層の質量)・A6、*3 FまたはPが最大となる前後でのY6の極大値、*4 Y6が最大となる前後でのFまたはPの極大値、*5 R=Y6/h、h:1層柱脚から6層の柱のピン接合部までの高さ、*6 μ=Y6/δy、δy:静加力実験の降伏点の変位、*7 Pの比較

表-1 最大応答値

る。
HACH1/4-250(YD61), 350(YD62)はそれぞれ $\mu=0.96, 1.36$ で、HACH1/4-350は若干設計時より入力が小さかったが、設計時に意図したように、中地震時に $\mu<1$,大地震時に $\mu<2$ の条件を満足している。



(a) HACH1/4-350 (b) HACH1/1-400
図-7 破壊状況 (YD62)

5.4. 破壊状況

YD 62 の破壊状況を図-7 に示す。

HACH1/4-250 (YD 61), 350(YD 62) では, それぞれ3~5層, 1~5層の梁端で主筋が降伏したが, 1層の柱脚は降伏しておらず, 実験終了後のひび割れは軽微であった。

HACH 1/1-400 では, YD 61, YD 62 ともに1層の柱脚が降伏し, 設計で意図したように, 梁曲げ降伏形の全体崩壊形となっている。

5.5. 復元力特性

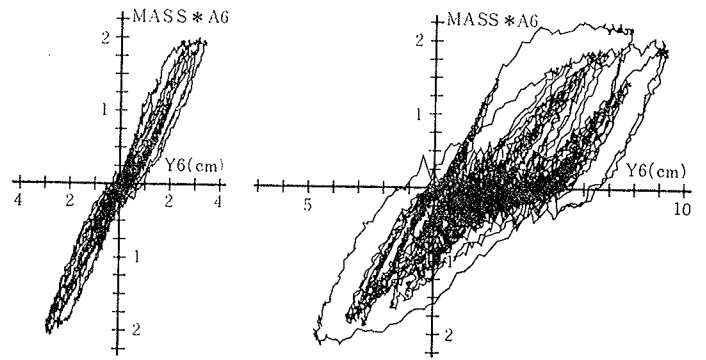
図-8~図-10に, YD 62, YS 61 の荷重と6層の相対変位 (Y6) の関係を示す。荷重は, 振動実験結果では慣性力 (F), 静加力実験結果では水平力 (P), 振動実験の解析結果では層せん断力 (Q) とした。

図-8, 図-9をみると, YD 62 と YS 61 の荷重~変位関係は, 同一変形に対する荷重は全般的に振動実験結果の方が若干大きい, 振動実験結果と静加力実験結果はほぼ等しく, 全体変形角 $R \approx 1/30$ まで耐力低下のない靱性の良好な復元力特性を示している。

また, 3試験体とも荷重~変位関係には, 梁主筋の柱梁接合部内での付着の劣化による低荷重域でのスリップ現象が若干みられる。これは主筋に用いた最小異形鉄筋 D6 が, 一般に主筋に用いられている鉄筋より付着性能が劣るのが一因であろう。

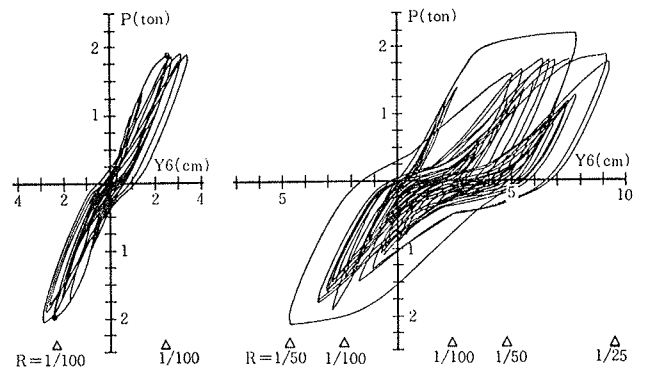
図-9(a)をみると, YS 61 の荷重~変位関係は, ± 8 サイクルで3~5層の梁の主筋が降伏した後に, 図中に○印で示した点で剛性が急激に低下している。この点を試験体の降伏点と定義すると, 降伏点の変位 $\delta y = 2.50$ cm (正と負の平均値) である。

図-8 と図-10から, YD 62 の実験結果と解析結果の荷重~変位関係を比較すると, HACH 1/4-350, HACH



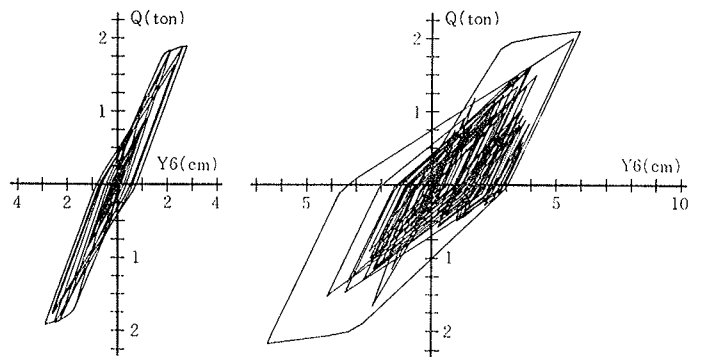
(a) HACH1/4-350 (b) HACH1/1-400

図-8 振動実験 (YD62) の荷重~変位関係



(a) $\pm 1 \sim \pm 25$ サイクル (b) $\pm 26 \sim \pm 71$ サイクル

図-9 静加力実験 (YS61) の荷重~変位関係



(a) HACH1/4-350 (b) HACH1/1-400

図-10 動的解析 (YD62) の荷重~変位関係

1/1-400 ともに実験結果と解析結果はほぼ一致している。

5.6. 応答波形

図-11と図-12に, YD 62 の実験結果と解析結果の6層の相対変位 (Y6), 6層の絶対加速度 (A6), 基礎の加速度 (A0) の応答波形を比較して示す。

図-11 の HACH1/4-350 の Y6 の実験結果をみると, A0 が最大値に達した後に, $\mu = 1$ 程度の大きな波形が数波続き, 9.3秒で最大 ($\mu = 1.36$) となっている。

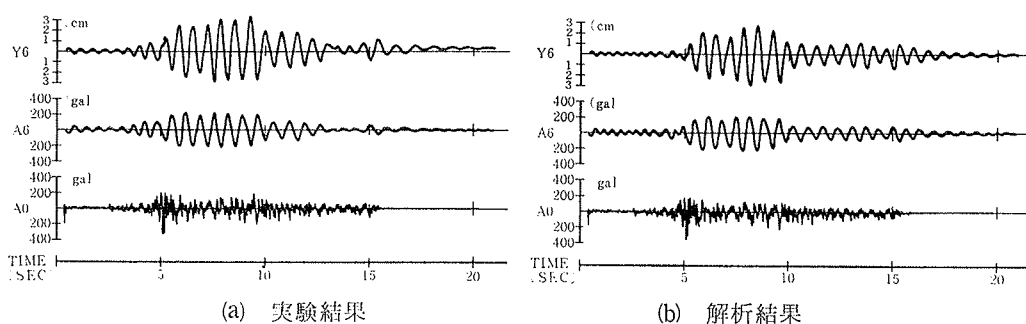


図-11 YD62(HACH1/4-350)の応答波形

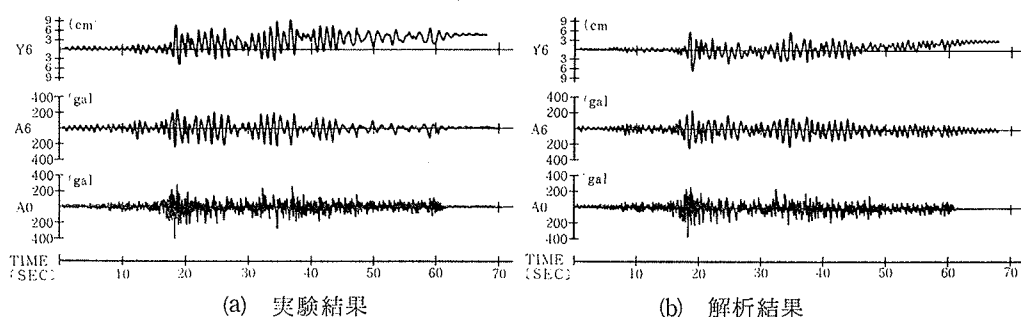


図-12 YD62(HACH1/1-400)の応答波形

HACH 1/4-250, 350 ともに残留変位はそれぞれ 0.17, 0.31 cm と小さい。

次に、図-12(a)の YD 62 の HACH 1/1-400 における Y 6 の実験結果をみる。ここでは YD 61 の結果は示していないが、YD 61 と YD 62 の Y 6 の応答波形はほぼ等しく、経過時刻 18.2~19.3 秒間の 1 波で一気に正と負の両方向に、 $\mu=2\sim3$ 程度に大きく変形している。その後、YD 61 と YD 62 の応答波形は、37 秒付近で最大変位（それぞれ $\mu=3.43, 3.72$ ）に達した後正方向に大きくドリフトし、残留変位はそれぞれ 3.11, 4.55 cm と大きい。

図-11, 図-12 の実験結果と解析結果を比較すると、解析結果の方が若干応答が小さいが、最大変位、最大加速度および周波数特性などは、解析結果は実験結果とおおむね良く一致している。

6. 結び

30 層 RC モデル建物の最下層部をモデル化した 6 層 RC ラーメン骨組の振動実験、静加力実験およびそれらの解析を行なった。

中地震および大地震を想定した 1968 年十勝沖地震八戸港湾 NS 地震波による振動実験において、試験体の最大応答変位は塑性率 μ で中地震時 0.96, 大地震時 1.36 で、設計で設定した条件(それぞれ $\mu < 1, 2$)を満足しており、

いずれもひび割れ、残留変位ともに軽微であった。

その後の $\mu=4$ 程度の大変形に至る振動実験においては、試験体は設計で意図したように、1 層の柱脚、1~5 層の梁端が曲げ降伏して、梁降伏形の全体崩壊形となり、靱性の良好な復元力特性を示した。

弾塑性地震応答フレーム解析結果は、実験結果とおおむね良く一致しており、本解析法は地震時の靱塑性応答の予測に有効であるといえる。

以上より、この 30 層 RC モデル建物は靱性の良好な梁曲げ降伏形の建物で、大地震時にも十分安全であると評価できる。

参考文献

- 1) 武田, 吉岡, 江戸, 多田: 超高層鉄筋コンクリート建物の耐震設計法に関する研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 30, (1985), pp. 48~55
- 2) 日本建築学会: 建築耐震設計における保有耐力と変形性能, (1981)
- 3) 江戸, 武田: 鉄筋コンクリート構造物の弾塑性地震応答解析(その2), 大林組技術研究所報, No. 13, (1976), pp. 6~11
- 4) 江戸, 武田: 鉄筋コンクリート構造物の弾塑性地震応答フレーム解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (昭和52.10), pp. 1877~1878
- 5) 宮武, 窪田: 鉄筋コンクリート柱に関する研究 I, 日本建築学会関東支部学術研究発表会, 第37回, (昭和41.6), pp. 113~116
- 6) 江戸, 武田: 30層建物を対象とした梁降伏形 RC 骨組の地震動破壊実験, コンクリート工学, Vol. 23, No. 4, (昭和60.4), pp. 97~107