

論文 継続時間の異なる模擬地震動入力による縮小 RC 構造物の 擬似動的実験

白井 和貴*1 · 堀 則男*2 · 星 道夫*3 · 井上 範夫*4

要旨: 破壊力特性の異なる地震動が構造物に及ぼす影響を明らかにするため、弾性応答スペクトルが同じで時刻歴特性が違う 2 種類の模擬地震動入力による、鉄筋コンクリート試験体の擬似動的載荷実験を行った。実験の結果、入力波の時刻歴特性の違いにより異なった応答性状を示し、地震動の破壊力特性をエネルギー応答の観点から実証的に検討した。さらに、瞬間的なエネルギー入力に基づく最大応答変形の推定を行い、実験値と比較して良い一致を得た。

キーワード: 擬似動的実験, 破壊力特性, 瞬間入力エネルギー, 最大応答変形推定

1. はじめに

建築物の設計法が従来の仕様規定型から性能規定型に移行する動きのなかで、より簡便に構造物の地震時最大応答変形を推定する手法の確立が必要とされている。このとき、直下型地震のように繰り返し回数が少なく瞬間的な入力を受ける場合と、海洋型地震のように継続時間が長く繰り返し入力を受ける場合とでは、地震動の構造物に対する破壊力特性は異なると考えられ、その違いを考慮することは耐震設計上極めて重要である。

本稿では、破壊力特性の異なる地震動が構造物に及ぼす影響を解明する事を目的とし、鉄筋コンクリート（以降 RC）構造物に対する擬似動的載荷実験を行った。また、瞬間的なエネルギー入力に基づく最大応答変形の推定を行い、実験結果との比較検討を行った。

2. 試験体

入力地震波をパラメータとした実験を行うため、同一仕様の RC 試験体 2 体を製作した。試験体及び加力システムの概観を図-1、柱断面を図-2、構造諸元を表-1 にそれぞれ示す。試験体は、RC 柱 4 本からなる 1 層 1 スパン

のラーメン型架構であり、柱断面は 100mm × 120mm、柱高さ 600mm、シアスパン比 3.0 である。柱主筋は上下梁内に定着し、その端部はエンドプレートに溶接した。コンクリートは 10mm の豆砂利コンクリートを用いた。

なお本研究と関連して、同一仕様試験体を用いた振動台加振実験を計画しており、振動台の加振性能限界を考慮してこのような縮小試験体とした。

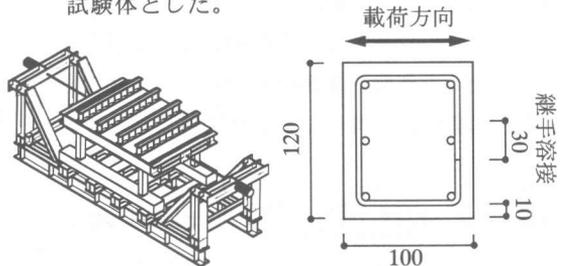


図-1 試験体概観

図-2 柱断面図

表-1 構造諸元

コンクリート強度 (実験日)	CASE S CASE L	27.1 MPa 29.1 MPa
柱主筋	配筋 引張鉄筋比 降伏強度	6-D6 0.8% 344 MPa
柱帯筋	配筋	D4@30
試験体頂部重量		52.7 kN
平均軸力比		0.04

*1 東北大学大学院生 工学研究科 都市・建築学専攻 工修（正会員）
 *2 東北大学助手 工学研究科 都市・建築学専攻 工博（正会員）
 *3 東北大学助手 工学研究科 災害制御研究センター
 *4 東北大学教授 工学研究科 都市・建築学専攻 工博（正会員）

3. 実験システム

本擬似動的実験のシステム概要を図-3に示す。本実験は、制御用コンピューター試験体オンラインシステムにより、静的実験でありながら準動的な地震応答を得ることができる。地震応答解析は1自由度質点系モデルを用い、数値積分はNewmark- β 法の $\beta=0$ 、質点重量は52.7kN、時間刻みは0.005秒とした。減衰定数 h に関しては、ダミー試験体を用い、応答解析上の減衰定数を $h=0$ としてパルス波入力の擬似動的実験を事前に行った結果、 $h=0.01\sim 0.02$ に相当する減衰が生じることが確認された。この値は弾性時の減衰定数にほぼ相当すると考えられるので、本実験における応答解析上の減衰定数は $h=0$ とした。

载荷は、ねじれを防ぐため、2台のジャッキによる水平一方向引張载荷とした。ジャッキと試験体は2つのピン接続をもつ鋼棒で連結し、引張力のみを伝達する機構とした。変位反転時に試験体を確実に拘束・制御するため、常に両側から3.9kN余分に载荷する方式とし、2つのロードセルの荷重の差を試験体の復元力、上部梁-基礎梁間の水平方向相対変位を試験体の応答変位として実験を行った。

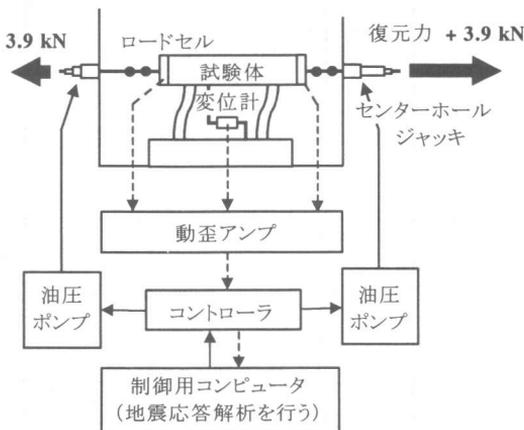


図-3 実験システム概要

4. 入力地震動

破壊力特性の異なる地震動による応答性状の違いを検討するため、2種類の模擬地震動

を作成した。図-4に入力波の加速度時刻歴を、図-5に加速度応答スペクトルを示す。

模擬波作成の際には、実大構造物に対する相似性が保たれるよう配慮した。位相特性は、1994年Northridge地震のSylmar County Hospital NS成分、1978年宮城県沖地震の東北大学 NS成分を用い、それぞれによって作成した模擬地震動をWave S、Wave Lと呼ぶことにする。周波数特性は建築物荷重指針¹⁾の設計用加速度応答スペクトルに相似則を考慮して補正した応答スペクトルに適合させ、Wave S、Wave Lともに同一の弾性応答スペクトルをもつものとした。これより概ね、試験体が弾性から降伏までは加速度応答スペクトル S_A が一定、降伏以降は速度応答スペクトル S_V が一定の領域での実験となっている。

Wave S入力による実験をCASE S、Wave L入力による実験をCASE Lと呼ぶことにし、順次入力倍率を上げRun 1~3の3段階の実験を行った。このとき、各RunにおいてCASE SとCASE Lで入力倍率は同じとした。

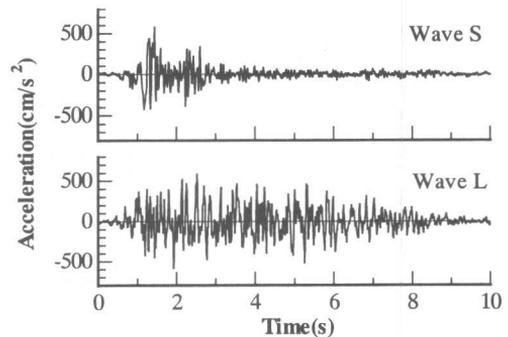


図-4 入力波の加速度時刻歴

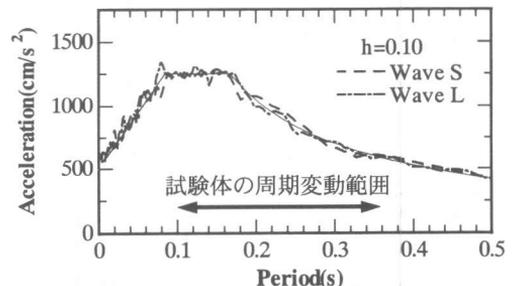


図-5 加速度応答スペクトル

5. 実験結果

5.1 最大変位および荷重-変位関係

各 CASE, 各 Run の入力倍率と応答変位の一覧を表-2 に示す。また図-6 に, 各 CASE の荷重-変位関係の包絡線, 各 Run の最大応答変位点および最大荷重点をそれぞれ示す。CASE S と CASE L で荷重-変位の包絡線はほぼ一致しているようであるが, CASE L の方が Run 1 で約 6 割, Run 2, Run 3 で約 3 割ほど最大応答変位が大きくなっている。

視察により試験体の降伏変位を $\delta_y = 4.5\text{mm}$, 降伏耐力を $F_y = 39\text{kN}$ とよみとると, 頂部重量が 52.7kN であることから試験体の降伏時周期はおよそ 0.16 秒となる。

表-2 入力倍率および応答変位一覧

実験ケース (入力波)	Run	入力倍率	応答変位	
			最大変位 (mm)	ΔE_{max} 時 (mm)
CASE S (Wave S)	1	0.5	3.65	—
	2	1.0	10.75	—
	3	1.4	14.27	13.06
CASE L (Wave L)	1	0.5	5.77	5.67
	2	1.0	14.31	—
	3	1.4	19.03	18.14

(—は ΔE_{max} 入力時に最大変位が生じたことを表す)

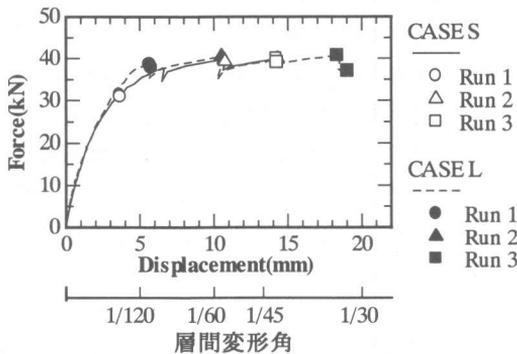


図-6 最大応答点

各 CASE, 各 Run ごとの荷重-変位関係を図-7 に示す。CASE S では, 1, 2 回の大きな履歴ループにより一気に応答変位を更新するのに対し, CASE L では何度も繰り返ル

ープを描きながら徐々に損傷が進行しており, 破壊力特性の異なる地震動入力による応答性状の違いが明確に表れている。

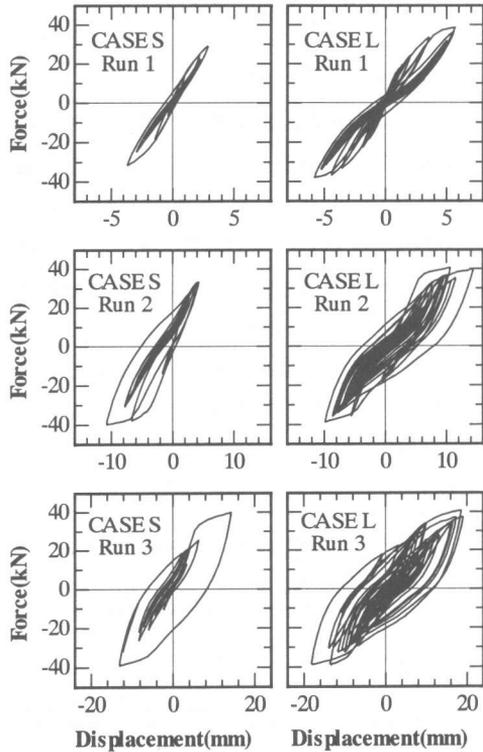


図-7 荷重-変位関係

5.2 エネルギー応答性状

地震動が構造物に与える累積的な破壊力を評価する指標として, 1 自由度質点系におけるエネルギー応答の釣り合い式から, 式(1)に示すような地震動入力エネルギー E_i を考える。ここで, m は質点の質量, x は応答変位, \ddot{x}_0 は地動加速度である。

$$E_i = \int_0^t (-m\ddot{x}_0) \dot{x} dt \quad (1)$$

また, エネルギー入力の激しさを表す指標として, 式(2)に示すような瞬間入力エネルギー ΔE^2 を考える。ここで Δt は, 時刻歴において応答速度 \dot{x} が 0 から次に 0 になるまでの半サイクル継続時間と定義し, したがって Δt は各半サイクルごとに異なった値をとる。 $D(\dot{x})$ は減衰力, $F(x)$ は復元力であり, 構造

物が履歴ループ半サイクル間に履歴と粘性減衰により消費したエネルギーに対応する E_I の増分を、瞬間入力エネルギー ΔE とする。

$$\Delta E = \int_t^{t+\Delta t} D(\dot{x})\dot{x}dt + \int_t^{t+\Delta t} F(x)\dot{x}dt \quad (2)$$

$$= \int_t^{t+\Delta t} (-m\ddot{x}_0)\dot{x}dt$$

Run 2 の実験結果より求めたエネルギー応答性状のグラフを図-8 に示す。ここで、瞬間入力エネルギーのグラフの縦軸は $\Delta E/\Delta t$ (kN-mm/s) で示しており、各矩形の横幅が Δt を、面積が ΔE を表している。CASE S ではエネルギー入力のほとんどが初期の 1~3 回の ΔE に集中しているのに対し、CASE L では継続時間中に多数回にわたりエネルギー入力を受け、継続的に E_I が増加している。

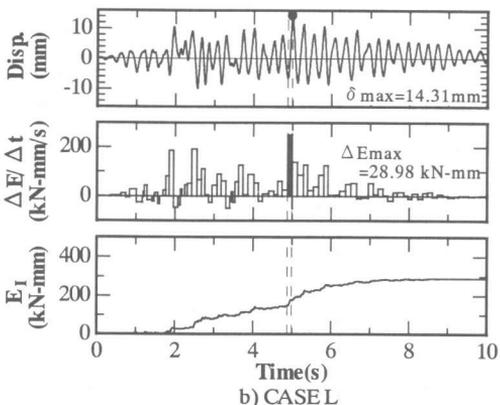
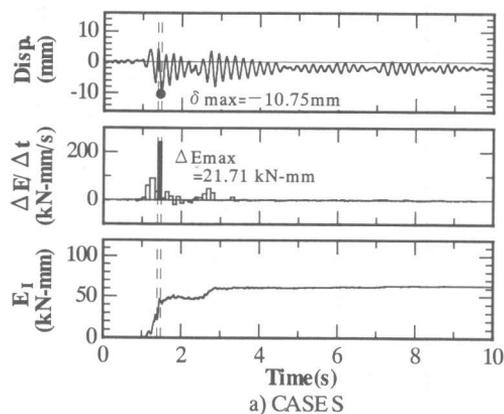


図-8 応答の時刻歴 (Run 2)

また、表-2、図-8 より、最も大きい ΔE が入力された直後に応答変位も最大、あるいは

は最大値の 9 割強程度の大きな変位となっていることがわかる。そこで、 ΔE の最大値を瞬間最大入力エネルギー ΔE_{\max} と定義し、各 Run の ΔE_{\max} と最大応答変位との関係を図-9 に示す。 ΔE_{\max} と最大変位は概ね対応しているようであるが、CASE S の Run 3 では変位の割に ΔE_{\max} の値が大きくなっている。

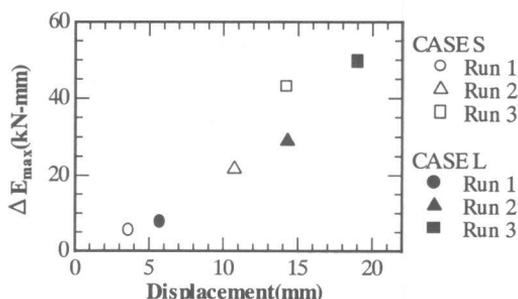


図-9 ΔE_{\max} - 最大変位関係

最大変位時のエネルギー消費性状について検討するため、最大応答変位がほぼ同じである CASE S の Run 3、CASE L の Run 2 においての、最大変位時の半サイクル履歴ループを図-10 に示す。このとき瞬間入力エネルギー ΔE は図中の縦線部分の面積から横線部分の面積を引いた値で表される。

CASE S と比較して、CASE L では繰り返し応答により徐々に最大変位を更新するため縦線部分の面積が小さくなっている。これより、同じ最大変形が生じた場合には CASE S の方が CASE L よりも ΔE が大きい傾向にあることがわかり、一方、同じ ΔE が入力される場合には、CASE L の方が最大変形が大きくなるものと考えられる。

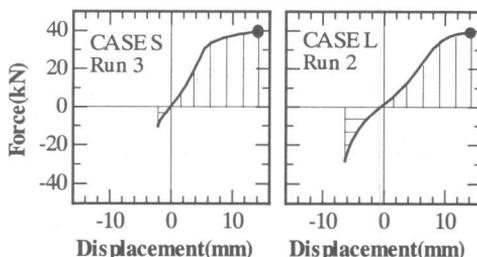


図-10 半サイクル履歴形状の比較

6. 最大応答変形の推定手法

6.1 瞬間最大入力エネルギーの推定

本実験で用いた2つの入力地震動について、瞬間最大入力エネルギー ΔE_{\max} の推定を行う。

弾塑性の ΔE_{\max} は、等価周期の読み替えを行うことで弾性 $h=0.1$ の ΔE_{\max} から概ね推定可能³⁾であり、さらに弾性の ΔE_{\max} は擬似速度応答スペクトル ${}_p S_V (=S_A \cdot T/2\pi)$ を用いて推定できる³⁾ことが示されている。本稿では、この ${}_p S_V$ を用いた手法に従い、相似則を考慮して時間軸を修正した式(3)により ΔE_{\max} の推定を行う。ここで、 $V_{\Delta E}$ はエネルギー等価速度、 m は質点の質量、 T は周期、 h は減衰定数(ただし $0.1 \leq h$) である。

$$V_{\Delta E} = \sqrt{\frac{2\Delta E_{\max}}{m}} = \sqrt{2\pi h \left(1.2 + \frac{0.2T}{0.3}\right)} {}_p S_V \quad (3)$$

CASE S, CASE L それぞれの入力波について、 $h=0.1$, 入力倍率 1.0 としたときの、弾性応答解析による ΔE_{\max} スペクトル、および式(3)を用いて入力波の S_A から推定した ΔE_{\max} スペクトルを図-11 に示す。図中の実線と破線はほぼ対応しており、式(3)により弾性の ΔE_{\max} が概ね推定できているといえる。

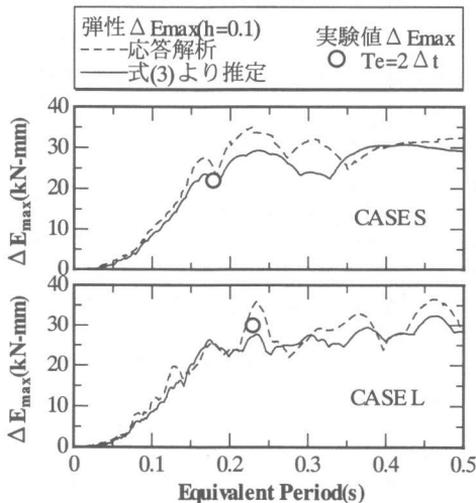


図-11 弾性 ΔE_{\max} スペクトル

また CASE S, CASE L それぞれの, Run 2 実験結果の ΔE_{\max} 点を図-11 に併せてプロッ

トして示す。ここで、 ΔE_{\max} 入力時の半サイクル継続時間 Δt から等価周期 $T_e = 2\Delta t$ を算定し、これを横軸の値として示している。弾性 ΔE_{\max} スペクトルと実験結果の ΔE_{\max} 点はよく対応しているといえる。

次に、実験各 CASE, 各 Run における、最大変位を横軸に、 $2\Delta t/T_\mu$ の値を縦軸にプロットして図-12 に示す。ここで T_μ は最大応答変位時の等価周期である。 $2\Delta t/T_\mu$ の値は、試験体の塑性化に伴い 0.75 程度まで徐々に低下しており、応答の評価に際しては、 T_μ よりも短い周期で評価する必要があると考えられる。

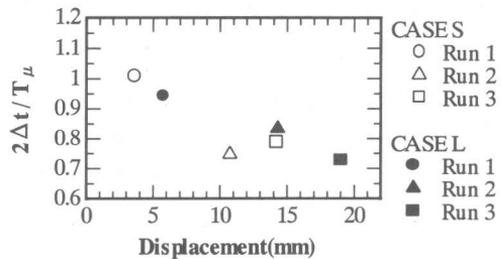


図-12 $2\Delta t/T_\mu$ - 変位関係

6.2 履歴特性のモデル化

瞬間最大入力エネルギー ΔE_{\max} が入力された直後に最大変形 δ_{\max} が生じると仮定し、その時の履歴形状を Degrading Trilinear 型の復元力特性を用いて図-13 に示すようにモデル化する。ここで Type S は、実験 CASE S のように瞬間的な過大入力により一気に最大変形が生じた場合のモデルであり、Type L は、実験 CASE L のように繰り返し入力により徐々に損傷が進行した場合のモデルである。

図-13 における半サイクル履歴消費エネルギーの増加分 ΔE_μ は、縦線部分の面積から横線部分の面積を引いた値となり、Type S, Type L の ΔE_μ はそれぞれ式(4), 式(5)のように表すことができる。このとき、実験結果の荷重-変位関係より視察し、降伏変位 δ_y は 4.5mm, 降伏耐力 F_y は 39kN とし、除荷時の戻り剛性 K_u は、降伏時剛性 K_y と最大応答塑性率 $\mu (= \delta_{\max} / \delta_y)$ を用いて $K_u = K_y / \mu^{0.25}$ とした。

$$\text{Type S: } \Delta E_{\mu} = \left\{ \mu - (\mu/2)^{0.25} \right\} F_y \delta_y \quad (4)$$

$$\text{Type L: } \Delta E_{\mu} = \left\{ 0.85\mu - (\mu/2)^{0.25} \right\} F_y \delta_y \quad (5)$$

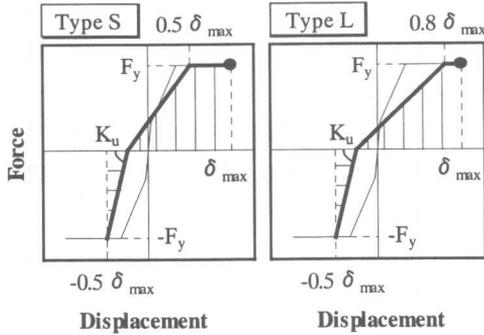


図-13 半サイクル履歴特性モデル ($2 \leq \mu$)

6.3 最大応答変形の推定

瞬間的なエネルギー入力に基づき、CASE S、CASE Lそれぞれ Run 2における最大応答変形の推定を行った例を、図-14に示す。

図中の実線は、地震動により入力されるエネルギー ΔE_{\max} を表している。一方、図中の破線は、構造物が履歴により消費できるエネルギー ΔE_{μ} を表している。したがって、実線と破線の交点、すなわち ΔE_{\max} と ΔE_{μ} が等しくなる点が推定点となる。ここで、瞬間最大入力エネルギー ΔE_{\max} は、 $h=0.1$ として式(3)より求めている。構造物の半サイクル履歴消費エネルギーの増分 ΔE_{μ} は、式(4)、式(5)において塑性率 μ を仮定して求める。ここで横軸は、 μ に対応する割線剛性から求める周期 T_{μ} を、図-12の CASE S、CASE Lそれぞれ Run 2の $2\Delta t/T_{\mu}$ 値より、Type Sは $T_e = 0.75T_{\mu}$ 、Type Lは $T_e = 0.85T_{\mu}$ と読み替えて示している。

Run 2 実験結果の ΔE_{\max} 点を、横軸を $T_e = 2\Delta t$ として図-14に併せて示す。CASE S、CASE Lともに、推定点と実験結果の ΔE_{\max} 点は良く対応しているといえる。

このような手法を用いることにより、地震動の破壊力特性を考慮した、構造物の非線形応答推定が概ね可能であると考えられる。

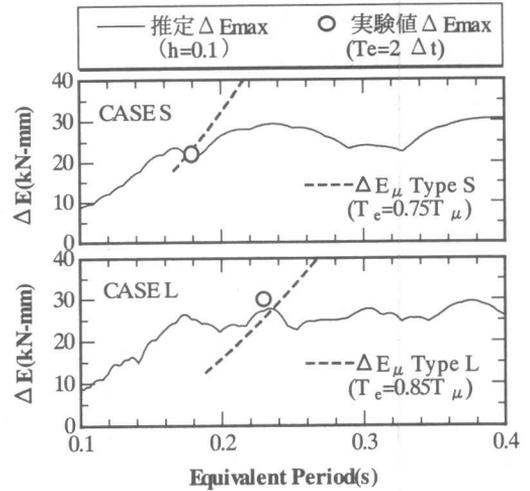


図-14 応答変形推定例 (Run 2)

7. まとめ

弾性応答スペクトルが同じで時刻歴特性が異なる2種類の地震動入力による擬似動的実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- 1) 入力波の時刻歴特性の違いにより異なる応答性状を示し、同じ入力レベルでは継続時間が長い波の方が最大変位が大きくなった。
- 2) 瞬間最大入力エネルギー ΔE_{\max} と最大変位は相関があり、同じ最大変位で比べると継続時間が短い波の方が ΔE_{\max} が大きい傾向にある。
- 3) 瞬間的なエネルギー入力に基づく最大応答変形の推定を行い、実験値と比較して良い一致を得た。

謝辞

本研究は、平成11年度文部省科学研究費補助金特定研究 A(2)「擬似動的実験による鉄筋コンクリート柱の直下型地震に対する弾塑性応答の研究」(課題番号 11115206, 研究代表者 井上範夫)の一環として行われたものです。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説 第3版, 丸善, pp.406-418, 1993.6
- 2) 井上範夫, 堀則男, 中村孝也: RC 構造物の応答に対する地震動のエネルギー入力性状の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, pp.531-536, 1997.6
- 3) 岩崎智哉, 中村孝也, 堀則男, 井上範夫: 擬似速度応答スペクトルを用いた瞬間入力エネルギーの推定方法, 第10回日本地震工学シンポジウム, Vol.2, pp.2579-2584, 1998.11