

論文 破壊力特性の異なる入力地震動を受ける鉄筋コンクリート構造物の応答性状

堀 則男*1・Cuadra Carlos*2・井上範夫*3・小川淳二*4

要旨: 破壊力特性の異なる地震動が構造物に与える影響を実験的に明らかにすることを目的とし、鉄筋コンクリート柱試験体を対象として擬似動的加力実験を行って得られた結果について、エネルギー応答の観点から検討を行った。入力地震動は弾性応答スペクトルが同じで時刻歴特性の異なる2種類を用いており、破壊力特性と応答性状の対応関係についての知見が得られた。

キーワード: エネルギー応答, 擬似動的加力実験, 破壊力特性, 入力地震動

1. はじめに

地震動の破壊力は、構造物に及ぼす影響(構造物が受ける損傷)で評価すべきものであり、繰返しの効果によって損傷を与える海洋型地震、瞬間的な過大入力を与える直下型地震ではその破壊力特性が異なっている。このような破壊力特性の違いを考慮することは、耐震設計において極めて重要である。

筆者らは構造物の地震応答をエネルギー的な観点から検討しており、地震動の破壊力特性を地震動エネルギー入力の量と激しさから評価することを試みている¹⁾。本稿では、破壊力特性の異なる地震動が構造物に与える影響を実験的に明らかにすることを目的とし、鉄筋コンクリート柱試験体を対象とした擬似動的加力実験結果の検討を行った。

2. 実験の概要

2.1 試験体

同一仕様のCantilever型試験体4体を用い、入力地震波をパラメータとした一方向加力実験を行った。試験体断面(図-1)は40cm×40cmであり、加力高さ100cm、シアスパン比2.5、軸力940.8kN(軸応力度 5.88N/mm^2)とした。

コンクリート圧縮強度(実験日)

23.5 ~ 24.7 N/mm^2

主筋 12-D16

引張鉄筋比 0.50 %

降伏強度 407 N/mm^2

最大強度 595 N/mm^2

横補強筋 D6@60

横補強筋比 0.53 %

最大強度 522 N/mm^2

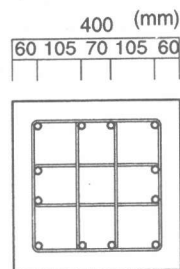


図-1 試験体断面

2.2 実験システム

実験システムを図-2に示す。制御用コンピュータは、地震応答解析、ジャッキ制御用コントローラー及びデータ取込み用コンピュータの制御を行っている。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 $\beta=0$ で行った。これによって、試験体の剛性変化をモデル化することなく、ロードセルで測定された復元力を直接用いて次ステップの変位増分を算定し、ジャッキ制御用コントローラーに指示を送っている。このとき、時間刻みは0.01秒、減衰定数は $h=0$ とした。

なお加力高さは100cmであるが、ジャッキ制御用の変位は高さ60cm位置での測定値を用

*1 東北大学助手

工学研究科 都市・建築学専攻 工博(正会員)

*2 秋田県立大学助教授

システム科学技術学部 建築環境システム学科 工博

*3 東北大学教授

工学研究科 都市・建築学専攻 工博(正会員)

*4 秋田県立大学教授

システム科学技術学部 建築環境システム学科 工博(正会員)

いている。これは実験治具のすべりなどの影響によって、高さ 100cm 位置での測定変位の精度が悪いためである。以下の実験結果においても、応答変位は高さ 60cm 位置での値を示す。

応答解析上の試験体頂部質量は、高さ 100cm 位置に 84.5ton としている。後述するが、本実験の試験体の降伏強度は約 290kN、降伏変位は高さ 60cm 位置で約 0.6cm(変形角 1/100)、高さ 100cm 位置で約 1.2cm(変形角 1.2/100)という結果が得られている。これより、降伏時割線剛性に対応する等価周期は約 0.3 秒である。

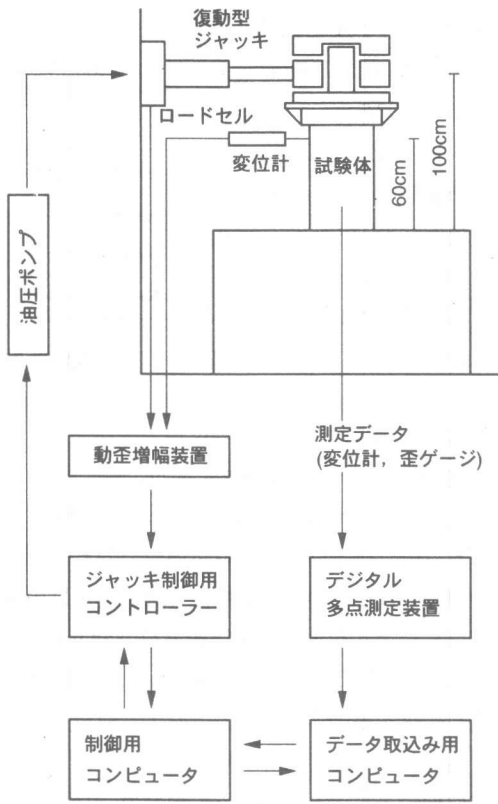


図-2 実験システム

2.3 入力地震動

時刻歴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用いた。図-3に入力波の加速度時刻歴、図-4に加速度応答スペクトルを示す。

位相特性は、1978年宮城県沖地震東北大

学 NS 成分と 1994 年 Northridge 地震 Sylmar County Hospital NS 成分を用い、それぞれによって作成した模擬地震動を、海洋型入力波、直下型入力波と呼ぶことにする。周波数特性は、設計用入力地震動作成手法技術指針(案)²⁾の水平動基準応答スペクトル(Level 1, Level 2)に適合させ、海洋型入力波、直下型入力波ともに同一の弾性応答スペクトルをもつものとした。

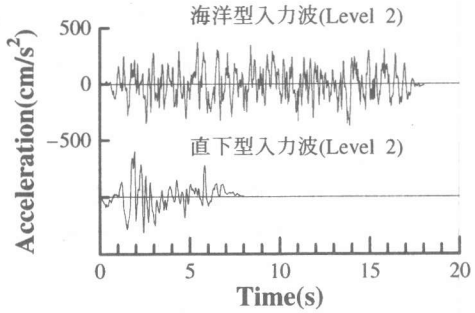


図-3 入力地震動の加速度時刻歴

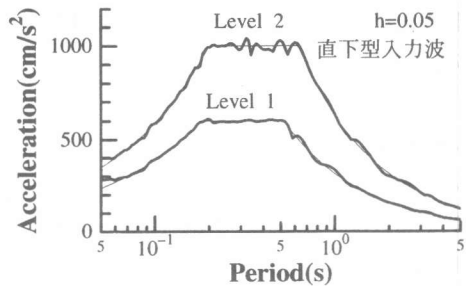
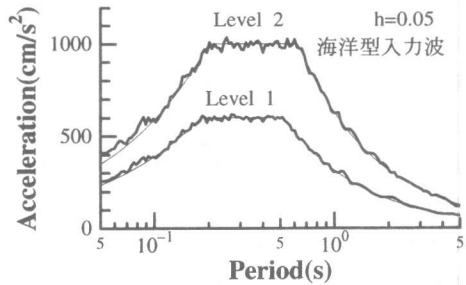


図-4 加速度応答スペクトル

実験ケースと入力地震動を表-1に示す。Case 1は海洋型入力波を用い、順次倍率を上げて5段階の実験を行った。Case 2は直下型入力波を用い、Case 1と同じ弾性応答スペクトルの地震波が入力されるように、同じ入力倍

表-1 実験ケースと入力地震動

	Run	入力地震動	入力倍率	応答変形角の目標
Case 1	1	海洋型 Level 1	0.18	1/600
	2		0.25	1/200
	3	海洋型 Level 2	0.38	1/100
	4		0.45	1.5/100
	5		0.55	3/100
Case 2	1	直下型 Level 1	0.18	
	2		0.25	
	3	直下型 Level 2	0.38	
	4		0.45	
	5		0.55	
Case 3		海洋型 Level 2	0.50	
Case 4		直下型 Level 2	0.50	

$$\text{応答変形角} = \frac{\text{高さ 60cm 位置での変位 (cm)}}{\text{高さ 60(cm)}}$$

表-2 応答最大変位

	Case 1	Case 2	比
Run 1	0.104cm	0.045cm	2.31
Run 2	0.233cm	0.217cm	1.07
Run 3	0.582cm	0.424cm	1.37
Run 4	0.733cm	0.573cm	1.28
Run 5	1.043cm	0.761cm	1.37
	Case 3	Case 4	比
	0.713cm	0.580cm	1.23

率で5段階の実験を行った。しかしながら、順次レベルを上げながらの実験では瞬間的な過大入力及ぼす直下型地震の評価には不相当と考えられるため、Case 3, 4でははじめから大きなレベルで1段階のみ入力させた実験を行い、比較することとした。

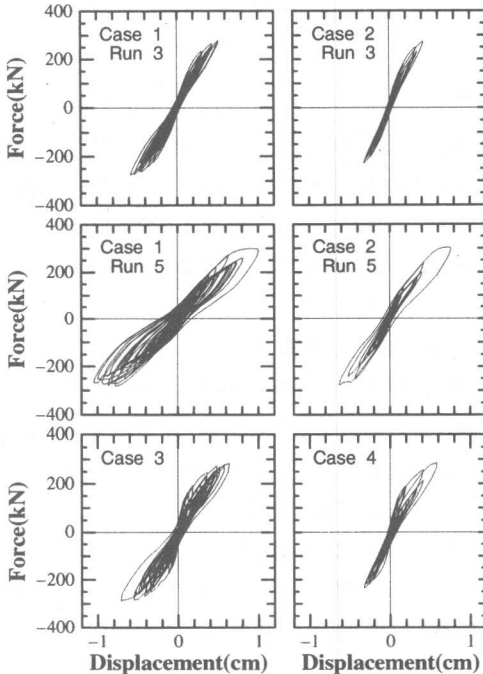


図-5 履歴ループ

3. 履歴ループと応答最大値

荷重-変位関係の履歴ループを図-5に示す。海洋型入力波(図-5左列)は応答変位を更新しながら何度も繰返し、直下型入力波(図-5右列)は大きなループが1, 2回となっている傾向が明らかである。

各実験ケースの各Runごとの応答最大変位を表-2に示す。また、応答最大値を図-6に示す。このとき、それぞれの変位最大点と荷重最大点とをとり、各Runごとに2点をプロットしている。これより、降伏強度が約290kN、降伏変位が約0.6cmである。

海洋型入力波(Case 1, 3)と直下型入力波(Case 2, 4)を比較すると、荷重-変位のスケルトンカーブはほぼ一致しているようであるが、同じRunでは海洋型入力波の方が3割程度変位が大きくなっている。弾性応答スペクトルが同じであっても、何度も繰返し入力される海洋型の方が構造物の損傷を進行させてしまったためと考えられる。

4. エネルギー応答の検討

運動方程式より、1自由度質点系における

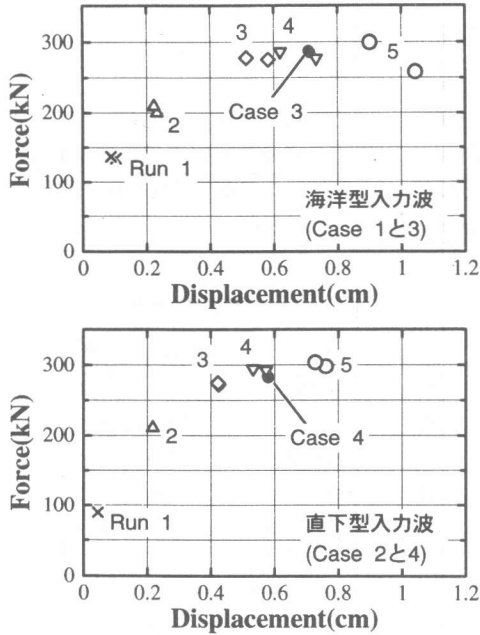


図-6 応答最大変位と最大荷重

エネルギーのつり合いは次式で与えられる。ここで m は質点の質量、 x は変位、 $D(\dot{x})$ は減衰力、 $F(x)$ は復元力、 \ddot{x}_0 は地動加速度である。

$$\begin{aligned} \int_0^t D(\dot{x})\dot{x}dt + \int_0^t F(x)\dot{x}dt \\ = - \int_0^t m\ddot{x}_0\dot{x}dt - \int_0^t m\ddot{x}\dot{x}dt \\ E_D + E_H = E_I - E_V \quad (1) \end{aligned}$$

地震動入力エネルギー E_I は、地震動が及ぼす累積的な破壊力を評価する指標といえる。

また、地震動エネルギーの入力の激しさを表す指標として、本研究では式(2)に示すような瞬間入力エネルギー¹⁾を用いる。時刻歴において運動によるエネルギー E_V が 0 から、次に 0 となるまでの時間 Δt 、即ち履歴ループ半サイクルの時間において構造物が消費・吸収したエネルギー ($E_D + E_H$) を考えて、これに対応する地震動入力エネルギー E_I の増分を瞬間入力エネルギー ΔE とする。このとき Δt は各半サイクルごとに異なる値をとる。

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

$$= - \int_t^{t+\Delta t} m\ddot{x}_0\dot{x}dt \quad (2)$$

実験結果より、応答変位、地震動入力エネルギー E_I 、瞬間入力エネルギー ΔE の時刻歴を、図-7~10 に示す。ここで瞬間入力エネルギーの縦軸は $\Delta E/\Delta t$ (kNm/s) で示しており、矩形の横幅が各半サイクルの時間 Δt を、矩形の面積がエネルギー ΔE を表している。

海洋型入力波は継続時間中に何度も地震エネルギーが入力され、 E_I が継続的に増加しているのに対し、直下型入力波はエネルギー入力の多くが初期の 1, 2 回の ΔE に集中している。このような時系列的な ΔE の性状の検討によって、地震動の破壊力特性を評価できるといえる。

4.1 平均等価減衰

地震応答の終わった時点で、地動のなした仕事が等価ダッシュポット (等価粘性減衰係数 c_e) のなした仕事に等しいと仮定し、 $c_e = 2h_s\omega_e m$ と定義し、次式より平均等価減衰 h_s ³⁾ (substitute damping) を算定する。

$$h_s = \frac{- \int_0^t m\ddot{x}_0\dot{x}dt}{2\omega_e m \int_0^t \dot{x}dt} \quad (3)$$

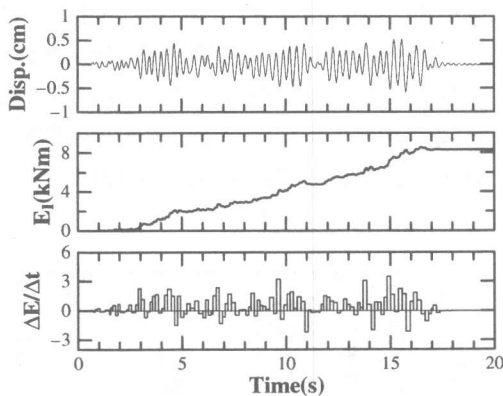
ここで ω_e は応答最大変位 δ_{\max} と最大荷重 F_{\max} より $\omega_e = \sqrt{F_{\max}/\delta_{\max}}/m$ で求めた値を用い、各実験ケースの各 Run ごとに算定した h_s を図-11 に示す。直下型入力波、特に 1 段階のみ入力させた Case 4 において、海洋型入力波よりやや大きめの値を示した。

4.2 繰返し応答

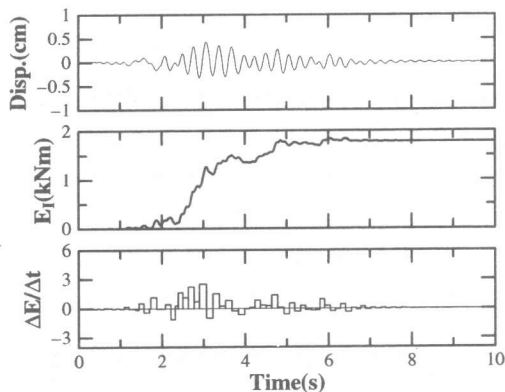
構造物の大地震時の挙動は、その構造物の履歴特性に大きく依存しているため、地震時繰返し応答とエネルギー消費の性状について把握しておくことが必要である。

繰返し応答の指標として、本研究では次式のエネルギー塑性率 μ_e と損傷パラメータ γ ⁴⁾ を用いる。ここで、 μ は応答最大塑性率である。

$$\gamma^2 \mu^2 = \mu_e = \frac{E_H}{F_y \delta_y} \quad (4)$$

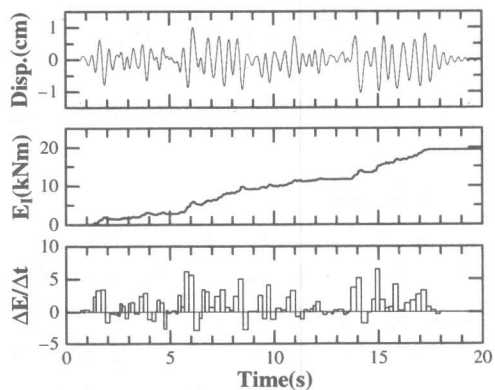


(a) Case 1

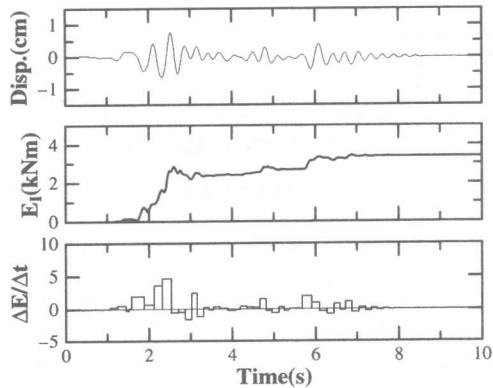


(b) Case 2

図-7 Run 3 の時刻歴応答



(a) Case 1



(b) Case 2

図-8 Run 5 の時刻歴応答

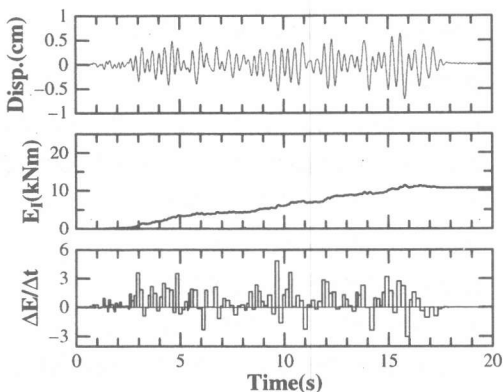


図-9 Case 3 の時刻歴応答

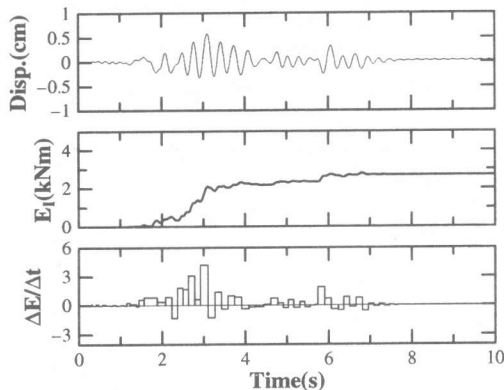


図-10 Case 4 の時刻歴応答

エネルギー塑性率 μ_e は履歴消費エネルギー E_H を基準エネルギー $F_y\delta_y$ (F_y :降伏耐力, δ_y :降伏変位)で規準化したものであり、繰返し応答の回数をエネルギー的に算定した指標である。

また、損傷パラメータ γ は最大応答(応答最大塑性率 μ)と繰返し応答(エネルギー塑性率 μ_e)を関連づける係数であり、構造物の耐力、減衰定数、固有周期などに対して比較的安定し

た指標である⁴⁾。

μ_e を図-12に、 γ を図-13に示すが、いずれも海洋型入力波の方が大きく、履歴繰返し回数の多さが定量的に表現されている。海洋型入力波の γ は直下型入力波の2倍程度の値を示しており、これは式(4)より、同じ応答レベル(μ)で比較したときの繰返し応答(μ_e)の回数が3~4倍である、ということの意味している。

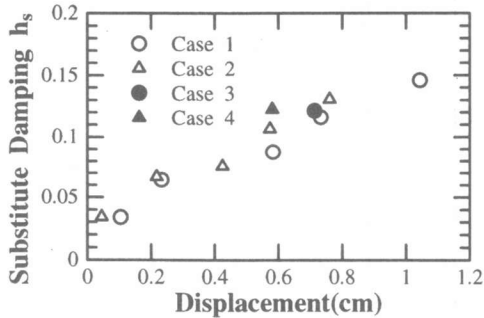


図-11 平均等価減衰 h_s

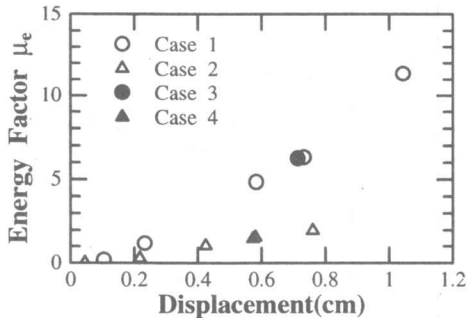


図-12 エネルギー塑性率 μ_e

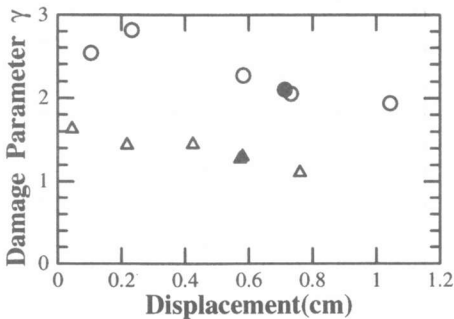


図-13 損傷パラメータ γ

4.3 瞬間最大入力エネルギー

継続時間中の ΔE の最大値を瞬間最大入力エ

ネルギー ΔE_{max} と定義し、応答最大変位との関係を図-14に示す。地震終了時の総入力エネルギー E_I の値は海洋型入力波の方がかなり大きい(図-7~10)、 ΔE_{max} の値は応答最大変位とよく対応しており、地震時非線形応答推定の一助になると考えられる。

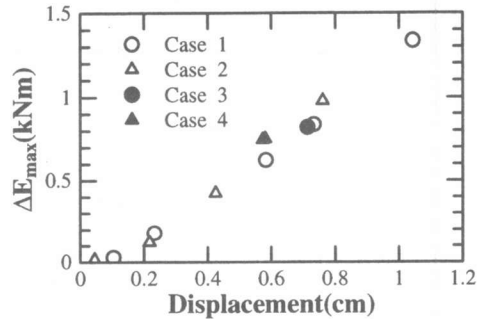


図-14 瞬間最大入力エネルギー ΔE_{max}

5. まとめ

擬似動的加力実験の結果、同じ弾性応答スペクトルを示す地震動であっても、継続時間の長い入力波の方が大きな応答変位となることが分かった。また、エネルギー塑性率 μ_e 及び損傷パラメータ γ による繰返し応答の定量的評価、瞬間最大入力エネルギー ΔE_{max} と応答最大変位の対応関係などについての知見が得られ、地震動の破壊力特性の評価に有効と考えている。

参考文献

- 1) 井上範夫, 堀 則男, 中村孝也: RC 建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
- 2) 建設省建築研究所, 日本建築センター: 設計用入力地震動作成手法技術指針(案), 設計用入力地震動研究委員会 平成3年度成果報告書
- 3) 柴田明徳: 最新耐震構造解析, 森北出版, pp.139-140, 1981.6
- 4) Fajfar, P.: Equivalent Ductility Factors, Taking into Account Low-Cycle Fatigue, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.21, No.10, pp.837-848, Oct.1992