

# (60) 履歴吸収エネルギーによるRC橋脚模型の耐震性評価

京都大学工学部 正員 山田善一  
 京都大学工学部 正員 ○家村浩和  
 神戸市港湾局 正員 西村一郎

## 1. まえがき

著者らは、弾塑性領域における鉄筋コンクリート(RC)橋脚の耐震性の検討を目的として、マイクロコンピュータ-ヒューボ型載荷試験機とを、AD-DA変換器を通して直結したいわゆるオンラインハイブリッドシステムによる地震応答破壊実験を実施して来ている<sup>1)</sup>。本研究は、上述のシステムに新たに開発した軸力載荷装置を導入して、軸力作用下での同様の地震応答実験を行ない、RC部材の復元力特性に及ぼす軸力の影響について検討するとともに、地震入力エネルギーや履歴吸収エネルギーの面から、構造物の損傷度や変形性能を定量的に評価し、現行の塑性率応答に基づく変形性能の照査法<sup>2)</sup>と比較・検討したものである。

## 2. 実験の概要

本研究での想定構造物は、図1に示す一柱式のRC橋脚である。橋脚下端での応力状態が、両端をローラー支承で支持された供試体スパン中央部に再現されるよう、軸力および曲げモーメントの値を決定した。供試体の半分が橋脚模型である。中央部の変位を $x$ 、復元力を $F(x)$ とすると、1自由度系としての運動方程式は、次式となる。

$$m\ddot{x} + C\dot{x} + F(x) = -m\ddot{z} \dots\dots\dots (1)$$

想定橋脚と模型との振動周期を一致させるために、上式の計算にあたっては、仮想質量を用いた。ハイブリッドの実験システムは、式(1)をマイクロコンピュータで数値積分するが、履歴復元力特性 $F(x)$ を実験供試体より直接取り込む地震応答計算法<sup>3)</sup>がある。その構成の概要を図2に示す。

軸力を載荷するため、図3に示すような装置と油圧シリンダーよりなるシステムを開発した。特に簡単な機器で軸力を一定に保つため、空気圧より油圧への変換を行ない、空気圧調整弁で軸力の変動が無くなるよう工夫した。供試体の形状は、10×15cmの矩形断面複鉄筋柱で、載荷スパン長は150cmである。鉄筋比 $\rho$ が1.1%のものでコンクリートの軸圧縮応力 $\sigma_c$ が20, 10, 0 kg/cm<sup>2</sup>のものをSC-1, 2, 3とし、 $\rho$ が3.1%で $\sigma_c$ が10 kg/cm<sup>2</sup>のものをSC-4とした。

入力地震波形としては、El Centro NS記録(1940)およびハルプNS記録(1968)の強震部分30秒間を用いた。なおハイブリッドの地震応答計算にあたっては、実際の時間を80倍に引きのばした。

## 3. 実験結果および軸力の影響に関する考察

鉄筋比 $\rho$ が1.1%の部材で、軸力のみを変化させた場合の静的な変位-復元力曲線を示したのが、図4である。軸力が増加するに従って、終局じん性率 $M/\mu$ が急激に小さくなっていることが判る。一方、コンクリートのひび割れ強度や降伏強度は、反対に増

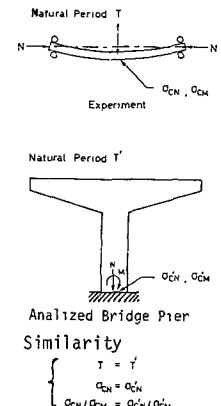


Fig.1 Bridge Pier and its Modeling

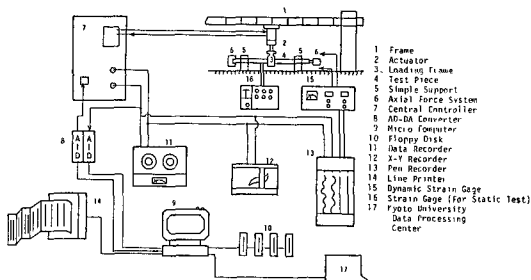


Fig.2 Online Hybrid Experimental System

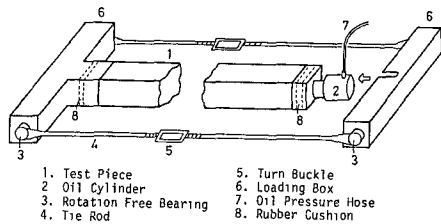


Fig.3 Loading System of Axial Force

加している。この理由は、RC部材にあらかじめ軸力が加わっていると、引張力によって決まるひび割れ強度や降伏強度は、プレストレストコンクリートと同じ原理で、軸力の無い場合よりも増大する。しかし終局状態は、コンクリートの圧壊によって決定されるから、軸力が大きい部材ほど、低い変位レベルで破壊に至る。降伏変位に大差がないので、結果として終局じん性率  $M_{\delta}$  が大幅に低下する。都市に見られる高架橋の軸圧縮応力  $\sigma_c$  は通常  $10 \sim 20 \text{ kg/cm}^2$  程度の低いものであるが、それでも  $M_{\delta}$  は軸力の無い場合の  $70 \sim 50\%$  にまで低下する。ここに示した変位-復元力の実験値は、理論的な  $M-\psi$  関係より算出した  $P-\delta$  曲線と  $1$ 割以内の誤差で一致した。図中の  $M_{\delta}$  は道路橋示方書耐震設計編に規定された許容塑性率である。

ハイブリッド実験結果の一例として、El Centro NS地震波入力の場合の履歴ループを図5に示す。構造物の周期は0.5秒、減衰定数は5%である。図中の  $\gamma$  は、部材の降伏加速度に対する入力地震波の最大加速度の比を表わす。軸力の無い部材(SC-3)や  $\sigma_c$  が  $10 \text{ kg/cm}^2$  の部材(SC-2)の履歴ループは、紡錘形を示すとともに、比較的安定した形状となっている。この理由は、最大塑性率応答  $M_{max}$  が  $M_{\delta}$  に許容塑性率を上回っているものの、終局じん性率  $M_{\delta}$  以下であるためと考えられる。一方  $\sigma_c$  が  $20 \text{ kg/cm}^2$  の部材(SC-1)では、 $M_{max}$  が  $M_{\delta}$  を上回っており、履歴ループが紡錘形から逆S字形に変化している。これは、変形がゼロの付近での剛性が非常に小さくなった結果である。以上の地震応答履歴ループにおいても、軸力が大きいほど、降伏強度が大きいという結果が明らかである。

#### 4. 履歴エネルギー吸収能に関する考察

本研究では、RC構造物の変形性能や終局軸力を定量的に評価する手法として、履歴エネルギー吸収量に注目して解析を進めた。エネルギー入力の概念は、次のとおりである。式(1)で表わされる1自由度系の運動方程式の両辺に、 $dx = \dot{x} dt$  を掛けて、地震の継続時間にわたって積分すれば、次式を得る。

$$m \int_0^t \ddot{x} \dot{x} dt + c \int_0^t \dot{x}^2 dt + \int_0^t F(x) dx = -m \int_0^t \ddot{x} \dot{x} dt \dots\dots (2)$$

上式の左辺第1項は時刻  $t$  における運動エネルギー ( $W_k$ )、第2項は時刻  $t$  までに粘性減衰によって吸収された累積エネルギー量 ( $W_c$ )、第3項は履歴ループによって吸収された累積エネルギー量 ( $W_h$ ) を表わす。また右辺は、地震動により構造物に入力される総エネルギー量 ( $E$ ) である。図6にこれらの時間的変動を示した。大きく塑性域に入っているため  $W_h \gg W_c$  となっている。また  $t=30$  秒において  $W_k$  がゼロになっていないが、入力地震動が終わっても構造物が振動していることを示している。当然のこゝながら、最上部の曲線が入力エネルギーの累積値  $E$  である。

図7には、入力強度に対する  $E, W_h, W_h/E$  の変化を示した。入力強度が増加すると、 $E$  および  $W_h$  は当然増加する。しかし  $W_h/E$  は、ある入力強度の点で最大値を示し、その後減少している。すなわち、履歴吸収エネルギー

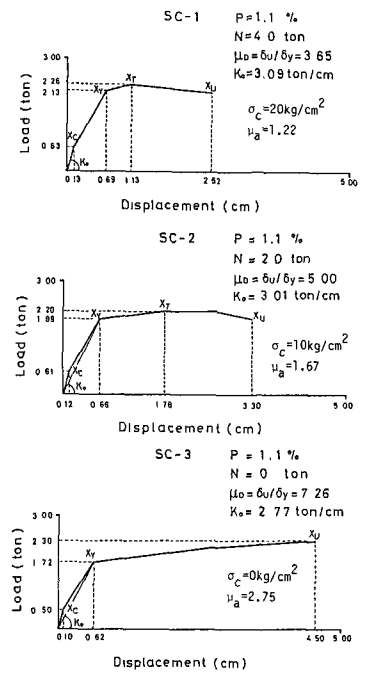


Fig.4 Static Load-Displacement

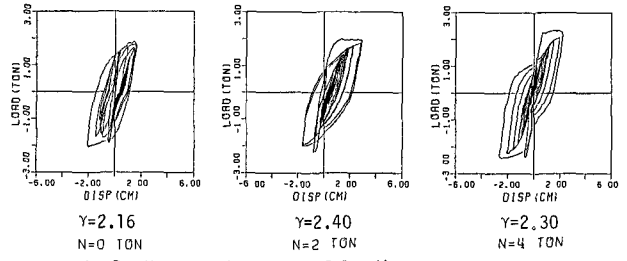


Fig.5 Hysteresis Loops of Bending RC Members with and without Axial Forces

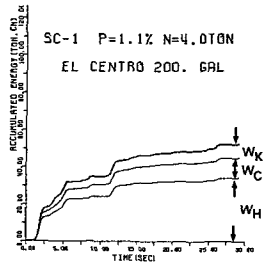


Fig.6 Partitioning of Input Energy

の分担率には、上限の存在することが判る。この  $W_H/E$  の最大点をエネルギー吸収量より見た部材の崩壊点とみなし得るのではないかと考えられる。

図8には、SC-1部材のハイブリッド載荷試験後の損傷状態を、入力強度の順に示した。入力強度が300 galになると決定的な崩壊を示している。この損傷状態と、図7に示した  $W_H/E$  の傾向を見ると、次の考察が可能となる。すなわち、エネルギー分担率  $W_H/E$  が増加して行く間は、部材になおエネルギー吸収能が存在するが、 $W_H/E$  が減少する過程では、部材の崩壊を意味するものと考えられる。

一応各サイクルにおける履歴エネルギー吸収能の劣化過程を定量的に把握するため、次の指標を導入した。

$$CWH_i = \sqrt{W_{Hi}/X_i^2} \quad \text{----- (3)}$$

ここに、 $W_{Hi}$  はサイクル  $i$  における履歴面積、 $X_i$  は振幅である。初期ループにおける値を1と規準化した時の各ループの値を  $DWH$  とし、累積履歴吸収エネルギーを横軸にして示したのが図9である。

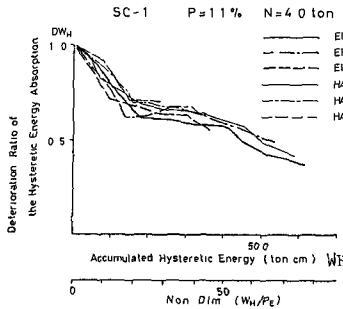


Fig.9 Deterioration of Energy Absorption

る。この図より、同一部材・同一軸力(SC-1)であれば、入力地震波の波形や強度とは無関係に、累積履歴エネルギー吸収量  $W_H$  の関数として、エネルギー吸収能の劣化度  $DWH$  を定義できることが判る。このことは、累積履歴吸収量  $W_H$  がRC部材の損傷度を定義する上で極めて良いパラメーターであることを示している。横軸  $W_H$  の下には、 $W_H$  を降伏時におけるポテンシャルエネルギー  $P_E$  で規準化した値を示した。 $W_H$  が  $P_E$  の約50倍程度になると、履歴エネルギー吸収能は約60%にまで低下することが判る。 $W_H$  と  $M_{max}$  を比較したところ、かなり良い相関が得られたので、図9の横軸を  $M_{max}$  におきかえ、 $DWH$  の回帰式を示したのが図10である。この図を利用すると、通常良く用いられる  $M_{max}$  より  $DWH$  の値を推定することが可能となる。

### 5. 地震入力エネルギー・スファトルと履歴エネルギー吸収量による耐震性評価

前述のように、 $W_H$  は構造部材の損傷度を判定する上で非常に合理的な指標である。したがって部材に許容される吸収エネルギー  $W_{Ha}$  や終局状態での吸収エネルギー  $W_{Hu}$  が、実験結果などよりあらかじめ与えられておれば、耐震性の判定は、 $W_H$  と  $W_{Ha}$  や  $W_{Hu}$  との比較から可能である<sup>4)</sup>。 $W_H$  の推定法としては、まず履歴復元力モデルを構築しその地震応答解析より算出する方法が考えられる。しかしこの方法は、複雑な計算を必要とし一般的耐震性の判定や設計法には不適当である。

図11には、ハイブリッド地震応答実験における地震入力エネルギーと線形弾性系における計算結果とを同時に示した。この図より入力強度が変わっても両者に大差のないことが判る。つまり弾塑性系への地震入力エネルギー量は線形弾性系のそれより推定できる。速度応答スファトル  $S_v$  より入力エネルギーを推定する方法 ( $E = \frac{1}{2} m S_v^2$ )

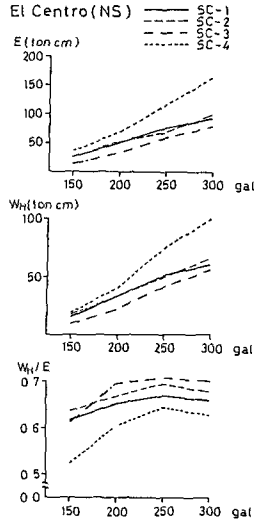


Fig.7 Input Energy and Hysteretic Absorbed Energy

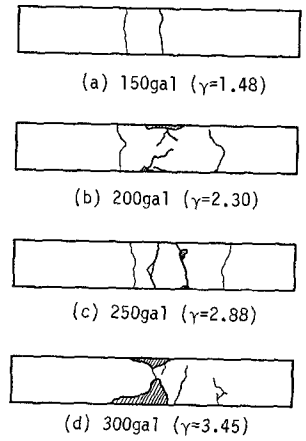


Fig.8 Damage of Specimens after El Centro Loading (SC-1,  $p=1.1\%$ ,  $\sigma_c=20\text{kg/cm}^2$ )

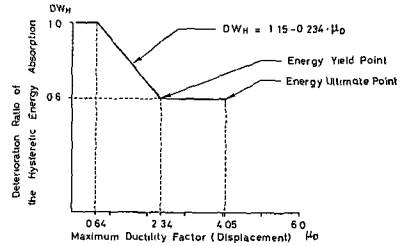


Fig.10 A Model of Deterioration of Energy Absorption

が提案されて来たが、<sup>5)</sup>この方法ではEを過小評価することが図11より判る。このことより、今までの各種の応答スペクトルと同様の概念で入力エネルギースペクトルを作製しておけば、構造物への総エネルギー入力は比較的簡単に算出できる。したがってW<sub>H</sub>の簡便な推定法として次式を提案する。

$$W_H = E^* (W_H/E)^* \dots\dots\dots (4)$$

ここにE\*は入力エネルギースペクトルより求めた値、(W<sub>H</sub>/E)\*は実験やシミュレーションより定まる履歴エネルギー分担率である。<sup>6)</sup> Table 1には、SC-1部材の履歴エネルギー分担率を67%としてE\*より推定したW<sub>H</sub>\*とハイブリッド実験結果より得られたW<sub>H</sub>とを同時に示したが、両者はかなり良く一致しており、式(4)によるW<sub>H</sub>の推定法の妥当性を立証していると言える。

6. 等価減衰定数の検討

地震入力の総エネルギーEが、全て粘性減衰で吸収されるという仮定で等価減衰定数h<sub>eq</sub>を決定するのだが、Sozenの提案したSubstitute Dampingの考え方であり、次式で与えられる。<sup>7)</sup>

$$h_{eq} = \frac{-\int_0^1 \dot{x} \dot{x} dt}{2W_{eq} \int_0^1 \dot{x}^2 dt} \dots\dots\dots (5)$$

ここに、W<sub>eq</sub>は最大変形点での等価固有円振動数である。

道路橋示方書-耐震設計編に規定されている変形性能の照査式においては、履歴特性による等価減衰定数の決定式が示されている。この式は、式(5)を用いて柴田が、武田の提案した履歴ループより算出したもので、<sup>8)</sup>この値を図12中の実線で示す。同図中には、本研究でのハイブリッド実験結果を用いて、全く同一の算法により計算した等価減衰定数と定常調和波振動時におけるエネルギーのつり合い式より求めたバイリニア系の理論<sup>9)</sup>とを同時に示してある。これらの結果より、示方書に示された等価減衰定数は非常に小さく、履歴減衰効果を過小評価しているのではないかと考えられる。等価減衰定数が小さければ、推定される応答値は当然大きくなる。こうした影響が大きく作用して、現行の変形性能の照査式を非常に厳しいものにしていないかと考えられる。図12中の細点線で示したように、少なくとも本研究での実験に関しては、履歴減衰効果を2倍程度に評価しても良さそうである。

参考文献 1) 家村・加藤・河谷, 第6回日本地震工学シンポジウム, pp. 825~832, 1982.

2) 日本道路協会, 道路橋示方書-同解説「V耐震設計編」, 昭55.3. 3) 高梨・宇田川他, 東大生産研究 26巻11号, 1974. 4) 秋山, 建築物の耐震極限設計, 東大出版会, 1980. 5) G.W. Housner, Proc. of 1st WCEE, 1956. 6) 大野・西岡, 第6回日本地震工学シンポジウム, pp. 1105~1112, 1982. 7) Gul an, Pand M.A. Sozen, SRS No.377, Univ. of Illinois, May 1971. 8) 柴田, 東北大学建築学報, 第16号, pp. 27~39, 1975. 9) 後藤・家村, 土木学会論文報告集, No.212, pp. 109~119, 1973.

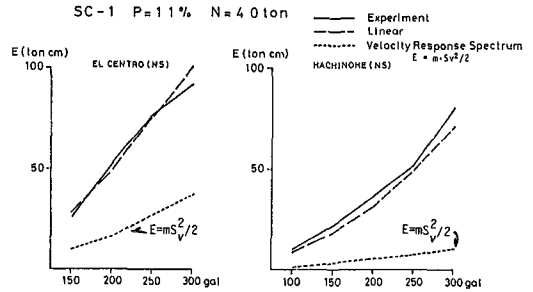


Fig.11 Total Input Energy to Empirical and Linear Structural Models

Table 1 Predicted and Empirical Hysteretic Energy

STRUCTURAL CHARACTERISTICS	: SC-1
EARTHQUAKE ACCELEROGRAM	: EL CENTRO-NS
W <sub>HU</sub> = 30.0 (ton cm)	W <sub>H</sub> /E = 0.670

Z <sub>max</sub> (γ)	ESTIMATION BY ENERGY SPECTRUM		EXPERIMENTAL VALUES		
	E*	W <sub>H</sub> *	E	W <sub>H</sub>	D <sub>H</sub>
150(1.48)	27.4	18.4	26.2	16.2	0.650
200(2.30)	48.4	32.7	52.4	34.2	0.591
250(2.88)	76.3	51.1	77.4	51.9	0.529
300(3.45)	110.0	73.7	91.9	61.0	0.383

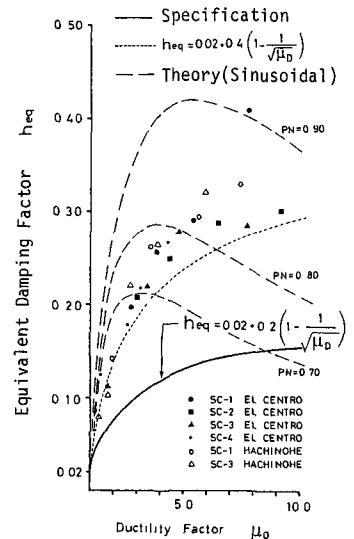


Fig.12 Equivalent Damping Factor