

(71) RC構造物のオンライン劣化履歴地震応答解析

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  
 大林組 正員 加藤敏明 京都大学大学院 学生員 西村一郎

1. まえがき

本研究はRC構造物の弾塑性地震応答時における剛性およびエネルギー吸収能の劣化過程を把握することを目的として、小型計算機と載荷試験機を組み合わせたオンラインシステムによる劣化履歴地震応答解析を実施した。この実験結果と劣化時の非弾性地震応答解析プログラムによる計算結果とを比較し、劣化過程の相違と現象の把握を行なった。以上の解析より最大じん性率応答、剛性劣化度、エネルギー吸収能、累積損傷度などから既に提案した結果をも勘案して、動特性が劣化する構造物の強震時における動的破壊規範を総合的に検討する。ための有用な資料を得た。

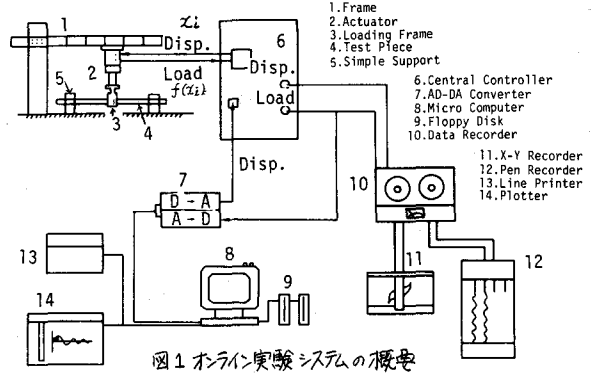


図1 オンライン実験システムの概要

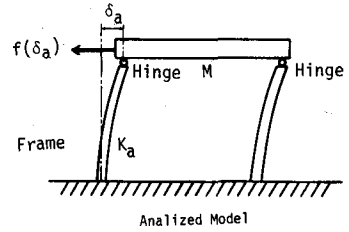
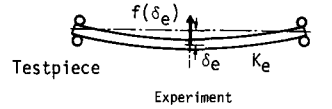


図2 供試体と解析モデル

2. オンラインシステムによる実験の概要

実験の方法は以下のようである。図1に示すようにアクチュエータより応答変位  $z_i$  を供試体に与え、それから復元力  $f(z_i)$  をAD変換したのち、小型計算機内に取り込み、運動方程式

$$M\ddot{x}_i + C\dot{x}_i + f(x_i) = -M\ddot{z}_i \quad (1)$$

を解く。次に算出された応答変位  $x_i$  をDA変換して、再びアクチュエータにより供試体を変形させるという反復段階を踏む。このオンライン実験はRC構造物の複雑な復元力特性を数学モデルによって仮定することなく直接地震応答解析に取り入れられ、数学的にモデル化した復元力特性を用いた地震応答解析結果の妥当性を検証することができる。本実験に用いた供試体と解析モデルの関係は図2に示すように実験部材の半分と解析モデルの柱材とが対応している。解析モデルの降伏加速度はほぼ  $90 \text{ gal}$ 、固有周期は約  $0.45$  秒に初期設定した。入力地震波は、EL CENTRO-NS記録(1940.5.18)、舊の洲高架橋設計用地震波、補正5施設ハプNS記録(1968.5.16)の子種類を用い、最大入力加速度を  $100 \sim 300 \text{ gal}$  の範囲に正規化して実験に利用した。

3. 実験結果および考察

実験結果の一例として最大加速度  $300 \text{ gal}$  のハプNS地震加速度、式(1)の応答変位、復元力の時刻歴を図3に、履歴曲線を図4に、剛性劣化、エネルギー吸収量、累積損傷度の時間変化を図5に示す。図4、図5を見る限り、剛性の劣化は繰り返し載荷の回数より最大塑性応答変位の影響が大きい。また履歴曲線の形は初期の弾性形から逆S字形

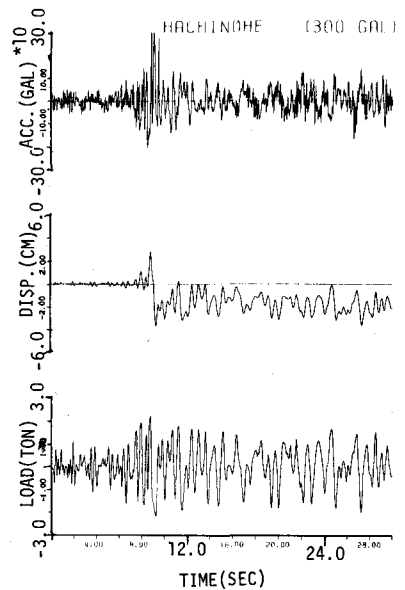


図3 地震加速度・応答変位・復元力

に物行し、エネルギー吸収能の劣化を定性的に示している。

(1) 剛性劣化に関する考察

図6は最大じん性率応答 $\mu$ と剛性劣化度 $DS$ との関係を示したものである。両者の関係を線形回帰すると、

$$DS(\mu) = 0.981 - 0.0952\mu \quad \text{--- (2)}$$

となり、相関係数( $r = -0.904$ )から判断して(2)式で $\mu \sim DS(\mu)$ を表示することは妥当である。このことは、塑性域における最大応答変位によって剛性劣化を比較的容易に評価できることを示している。

同様に剛性劣化度とエネルギー吸収量 $E$ を線形回帰した場合、

$$DS(E) = 68.8 - 28.0E \quad \text{--- (3)}$$

相関係数  $r = -0.934$

となる。この関係を図7に示す。

これらの結果より、剛性劣化とエネルギー吸収量の相関性が最も高い。また、エネルギー吸収量は履歴曲線の形状の変化、地震波のパワーの相違などを含み、劣化過程の総合的な評価パラメータとして優れていることを示唆している。しかしエネルギー吸収量により剛性劣化を推定するには計算に多大な労力を必要とし、またこれをもって評価する手法は现阶段において確立されていない。したがって現行の設計体系が最大入力加速度と最大応答を基盤にしていることを考え合わせると最大じん性率応答で剛性劣化を明確に表現することは有用な手段となる。

(2) エネルギー吸収能の劣化に関する考察

エネルギー吸収能の劣化は繰り返し載荷あるいは大変形時にRC部材のコンクリートが圧縮、脱落することによって進行する。劣化が激しい場合には、構造物の崩壊等の被害が出るものと予想され、エネルギー吸収能を的確に把握することは耐震工重要な要因となる。エネルギー吸収能の劣化を考慮しないモデル(例えば定常バイリニア型履歴復元力特性)では、各半サイクルごとのエネルギー吸収量

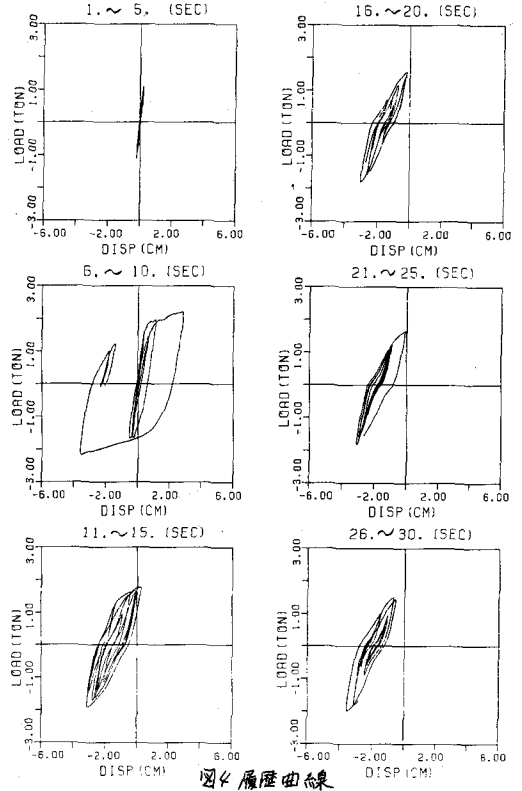


図4 履歴曲線

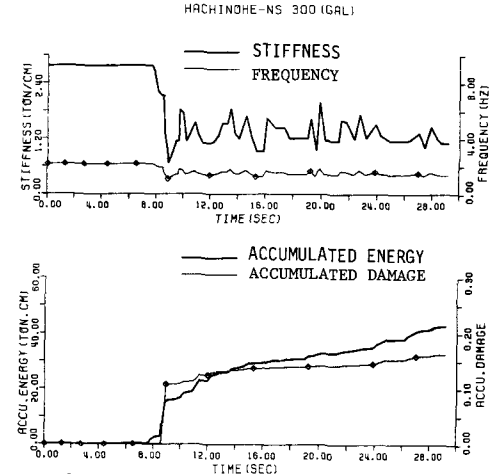


図5 剛性、エネルギー吸収量、累積損傷度

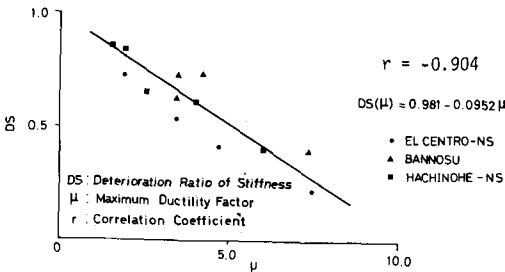


図6 最大じん性率応答と剛性劣化

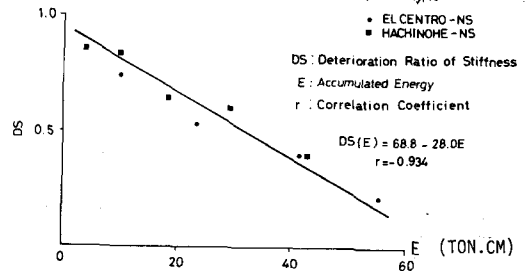


図7 累積エネルギー吸収量と剛性劣化

を最大振幅で除した値は時間軸上で一定となる。本研究ではこの点に注目し、以下のような指標を導入して、振幅の影響を取り除いた。

$$CE_i = \sqrt{E_i / X_i^2} \quad (4)$$

ここに  $E_i$  : 半サイクルごとのエネルギー-吸収量

$X_i$  : 半サイクルごとの最大振幅

$CE_i$  : エネルギー-吸収能を示す指標

この手法により、オンライン実験の応答結果より得られた半サイクルごとのエネルギー-吸収量を補正し、その吸収能劣化度を図8に示す。横軸は経過時間を示し、縦軸はエネルギー-吸収能の低下率で、初期吸収能を1として各値を正規化したものである。

次にエネルギー-吸収能の劣化と、それを表示する有効なパラメーターとの関係を検討した。まず考えられるのは累積エネルギー-吸収量により劣化が進むとする考え方で、これを調べるため累積エネルギー-吸収量  $E$  とそのときのエネルギー-吸収能の低下率  $DE$  の関係を求め、図9に示した。 $DE = 1.0 \sim 0.6$  の範囲で  $E$  とともに  $DE$  の低下が線形的に進み、約  $DE = 0.6$  以下においてその低下が急になる。これはエネルギー-吸収限界の存在を意味し、 $DE = 0.6$  付近からエネルギー-吸収能の劣化が著しく進むためと考えられる。図9から  $E$  と  $DE$  の関係を回復し、次のように定式化した。(図10)

$$DE(E/E_0) = (1 - E/E_0)^{0.42} \quad (5)$$

この式の算定には限界エネルギー-吸収量  $E_0$  を想定して正規化することにより一般性をもたせた。 $E_0$  の値を正確に求めることは困難であるが、破壊的な強震時における構造物の動的応答から推察することが可能であると考えられる。

$DE$  と最大じん性率応答  $\mu$  の関係は

$$DE(\mu) = 1.013 - 0.079\mu \quad (6)$$

相関係数  $r = -0.923$

となる。これからエネルギー-吸収能の劣化を最大じん性率応答である程度評価することが可能である。上記検討結果より、同一じん性率応答を基準として剛性低下率とエネルギー-吸収能の低下率を比較し、強震時の終局耐力に関する構造物の動特性の劣化過程を比較的容易に推定することができる。

#### 4. 弾塑性地震応答解析プログラムによる計算結果との比較

RCフレーム構造物を対象とした弾塑性地震応答解析プログラムである小谷の "SAKE"<sup>2)</sup> を用いて、図2に示す実験モデルの地震応答計算を実施した。図11に剛度の低下率と入力強度の関係を示したが、解析的な剛性劣化過程は実験結果とよく一致しているといえよう。

総エネルギー-吸収量と入力強度の関係を図12に示す。各入力強度に対して理論解析によるエネルギー-吸収量は

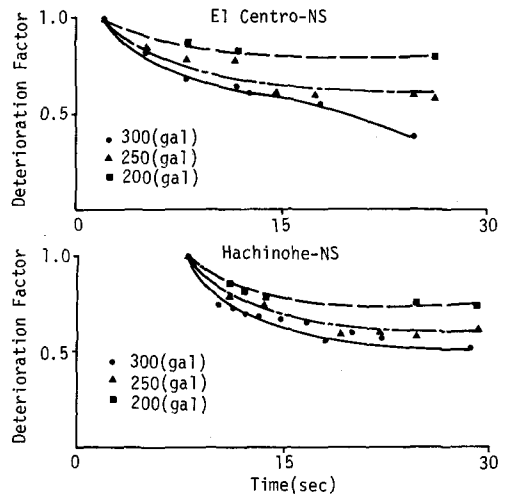


図8 エネルギー-吸収能劣化度

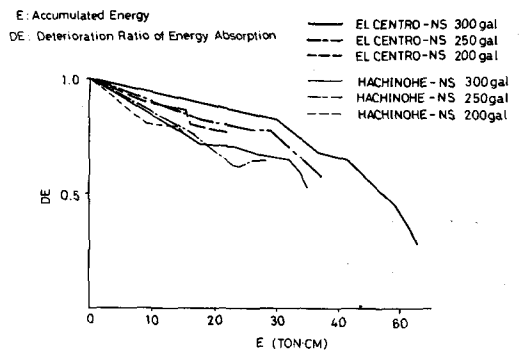


図9 累積エネルギー-吸収量とエネルギー-吸収能の劣化

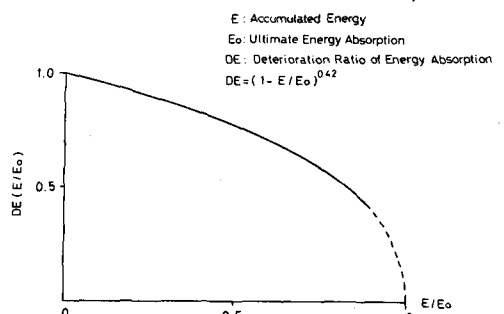


図10 限界エネルギー-吸収量とエネルギー-吸収能の劣化

実験値を下まわっている。図13は、(2)で述べたエネルギー吸収能の劣化の評価方法を用いて、経過時間軸上におけるエネルギー吸収能の経時変化を理論解析と実験の結果について示したものである。同図によると、理論解析では初期の急激な劣化後は一定の値を保持していることがわかる。これは図5で示した剛性の劣化過程と同様な扱い方をエネルギー吸収能に対しても用いていることになる。

5. まとめ

構造物が弾性限界を超えてどの程度の入力強度まで耐震性を有するかを総合的に判断するための資料として、表1を作成した。同表中( )で示された数値はSAKEプログラムによる数値計算の結果である。表1およびEL CENTRO地震記録、舊の洲高架橋設計用地震波に対する同様の諸数値の検討から、本解析の想定構造物は降伏加速度(80~90 gal)の約1.7~1.9倍までの最大加速度(約150~160 gal)を有する地震波に対しても、ほぼ耐震的に挙動し得る変形性能を有することが判明した。

謝辞 本研究で用いたハチノヘ地震記録波形は京都大学工学部交通土木工学科後藤研究室で補正されたものであり、それを貸与頂いた各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Okada, T., Seki, M. : A Simulation of Earthquake Response of Reinforced Concrete Buildings, Proc. of 6th W.C.E.E., New Delhi, 1977.
- 2) Otani, S. : Civil Eng. Studies, Structural Research Series No. 413, UILU-ENG-74-2029, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Nov, 1974
- 3) 後藤 家村, 杉原: 土木学会論文報告集, 第284号, PP.23-34, 1979, 4.
- 4) Iemura, H. : Proc. 7th W.C.E.E., Vol.5, pp. 81-88, Sept., 1980
- 5) 後藤 暹田, 杉戸, 今西: 土木学会論文報告集, 第277号, PP.57-69, 1978, 9.

表 1

Earthquake Response for Various Intensity (by Hachinohe-NS)										
Max.Acc.(gal)	30	50	70	80	90	100	150	200	250	300
Response										
Max.Displacement in Ductility Factor	(0.31)	(0.52)	(0.77)	(0.90)	(1.02)	(1.06)	(1.61)	(2.58)	(4.16)	(6.12)
Dynamic Amplification Factor(D.F./gal) (*10 <sup>2</sup> )	(1.02)	(1.03)	(1.11)	(1.13)	(1.13)	(1.06)	(1.07)	(1.29)	(1.66)	(2.04)
Stiffness Deterioration	(1.0)	(1.0)	(1.0)	(1.0)	(1.0)	(0.98)	(0.75)	(0.60)	(0.48)	(0.40)
Total Absorbed Energy (ton*cm)	(0)	(0)	(0)	(0)	(1.3)	(1.8)	(6.0)	(12.0)	(21.0)	(28.8)
Accumulated Damage	(0)	(0)	(0)	(0)	(0)	(0.001)	(0.003)	(0.013)	(0.051)	(0.162)

Values in ( ) show calculated results by SAKE program

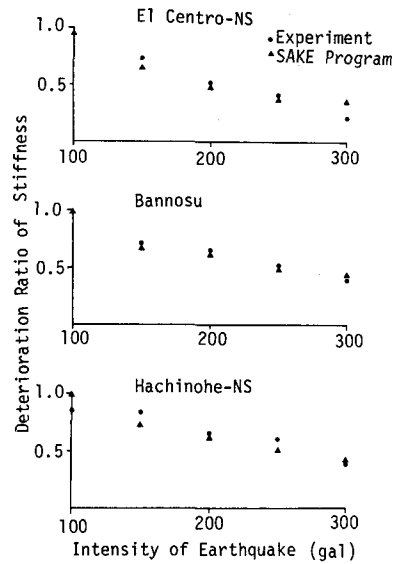


図11 入力強度と剛性劣化

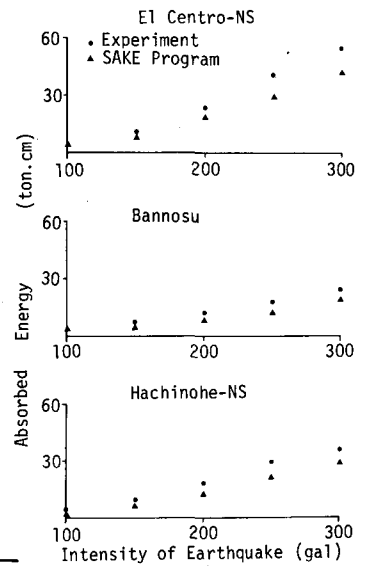


図12 入力強度とエネルギー吸収量

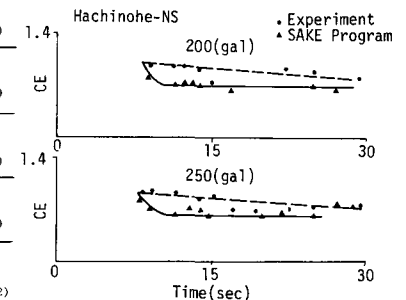


図13 エネルギー吸収能の時間的劣化