

パシフィックコンサルタンツ(株) 正 山本 一敏
東京都立大学工学部 正 国井 隆弘

1. はじめに

現在、構造物の耐震極限設計を目指す弾塑性応答解析手法は電子計算機の導入によりかなり発達しつつあると考えられる。しかし、応答計算結果の評価・許容値の設定についての研究は数多くはない。これに対し、秋山ら¹⁾は主として鋼構造物に対し、エネルギー入力の基本原理に基づき、応答を評価することを提案している。本研究では曲げの卓越したRC部材に対してエネルギー論的な損傷評価をするために模型実験を行ない、その可能性を検討したものである。なお、本研究では広中の実験結果²⁾を合わせて利用している。また粘性減衰力は不確定要素を避けるために割愛している。

2. 累積ひずみエネルギーについて

次式のような非線形の一質点系の運動方程式を考える。

$$M\ddot{x} + F(x) = -M\ddot{z}_0 \quad (1)$$

M : 質量 $F(x)$: 復元力 z_0 : 水平地震変位

x : 質点の相対変位

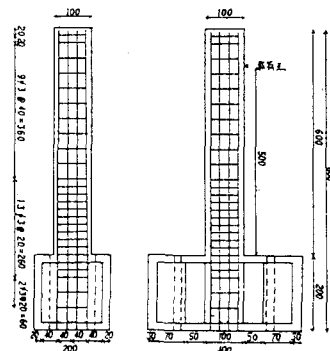
(1)式の両辺に $dx = \dot{x}dt$ をかけ継続時間 t にわたって積分すれば次式が得られる。

$$M \int_0^t \ddot{x} \dot{x} dt + \int_0^t F(x) \dot{x} dt = -M \int_0^t \ddot{z}_0 \dot{x} dt \quad (2)$$

(2)式の右辺はエネルギー入力の総量、左辺第2項は累積ひずみエネルギーを表す。累積ひずみエネルギーは小さな増減を繰り返しながら全体的に増加する性振をもつ。本研究では累積ひずみエネルギーを用いて応答評価をする。

3. 実験

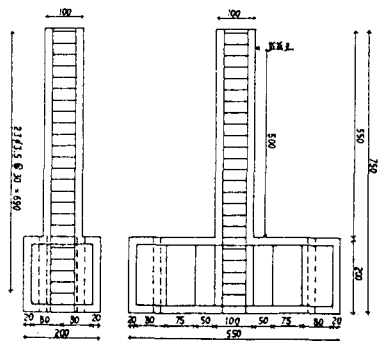
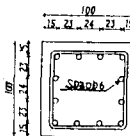
本研究では柱高5m、断面が1m×1mのRC片持ばり形式の実構造物(橋脚)を仮想し、それを1/10にした模型実験を行なった。実験は図1, 2に示した供試体を用いて仮想的実験を中心に行なった。横方向鉄筋はACI・Code 318-77を基準に均等に配筋している。仮想的実験は構造物の地震応答解析に際し、非線形性を有する復元力特性を数値モデルに置換することなく載荷実験を行ないながら弾塑性応答解析を行なうものである。表1に載荷方法及び仮想的実験において仮想した質量、最大入力加速度を示す。入力はいルセントロ(N-S成分、主要動、10秒間)を基準化して用いた。最大入力加速度は柱高5mの実構造物では表中の値の10倍に相当すると考えられる。測定は載荷点の変位をダイヤルゲージで、荷重をロードセルを用いて行なった。



$\rho_g = 630 \text{ Kg/cm}^2$

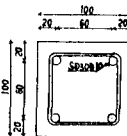
図1 供試体(No.1~No.3)

3)より



$\rho_g = 400 \text{ Kg/cm}^2$

図2 供試体(No.11~No.14)



4. 累積ひずみエネルギーによる損傷評価

本研究では「変位の増加にもかかわらず復元力が減少する」現象を破壊と定義している。これは単調変位増加載荷では最大復元力点に対応するものである。実際には復元力の減少が生じた後にもある程度の耐力を期待できるが、この復元力点が比較的明確で定義し易い現象であると考えられ、また安全側と判断できることから妥当な設定方法と考える。

仮想的実験からな時系列の変位と復元力が得られるが、これから時系列の累積ひずみエネルギーを計算した。ただし、実験DAPC 4の累積ひずみエネルギーは、同じ仮試体で先だてて行なわれた実験DAPC 3の終了時の累積ひずみエネルギーの値を初期値としている。

上記のような破壊の現象は高入力レベルの仮想的実験(DAPC 1・4・13)・単調変位増加実験(DAPC 11)でみられた。この破壊点における累積ひずみエネルギーの値が部材のエネルギー吸収能力ということになる。ここで次のような仮説をたてる。「部材のエネルギー吸収能力は、その部材の単調変位増加時の最大復元力点における累積ひずみエネルギーの値の2倍になる」2倍という数値は正負両方向同じエネルギー吸収能力を発揮できるのではないかという仮定に基づいている。表2に累積ひずみエネルギーと上記仮説による推定値を示す。DAPC 1・4の推定に用いたスケルトンカーブは、実験DAPC 1～4の履歴ループの包絡線から推定した。DAPC 4・13ではある程度、推定値が破壊点を表現しているが、DAPC 1では両者の差が大きい。これはDAPC 1では応答が中に繰りも一方方向に片った振動であったためと考えられる。このことから許容値としてエネルギー吸収能力だけでなく、最大復元力点における変位を許容変位として同時に定める必要があると思われる。また外見上、特に損傷の認められなかった低入力レベルの仮想的実験(DAPC 2・3・14)では実験終了時の累積ひずみエネルギーは、エネルギー吸収能力の推定値の数分の一であり、上記仮説からも安全との評価ができる。

以上の結果から安全側の設定ではあるが、次式により部材の安全性に関する1つの評価方法が提案できると考えられる。

$$\left. \begin{aligned} W_{cs, \max} &\leq 2S \\ \text{かつ } |X|_{\max} &\leq X_c \end{aligned} \right\} (3) \quad \begin{aligned} W_{cs, \max}: &\text{累積ひずみエネルギーの最大値} \quad |X|_{\max}: \text{最大応答変位} \\ S, X_c: &\text{スケルトンカーブの最大復元力点における累積ひずみエネルギー, 変位} \end{aligned}$$

実際の交番載荷時のエネルギー吸収能力は上記仮説の推定値を上回ることも予想され、推定値を上回る状態でも前述の破壊現象が生じない可能性がある。事実、実験DAPC 12では累積ひずみエネルギーが推定値を上回る状態でも破壊現象が見られなかった。しかし(3)式は安全側の評価を与えるもので、耐震安全性評価の目安になるものとする。

<文献> 1) 秋山「鉄骨の耐震性能設計」東大出版 2) 秋山「鋼構造部材の耐力(その4)」日本建築学会論文報告集 No.151 S43.9.

3) 広中良和「鉄筋コンクリート部構造の耐震特性」東京大学工学部土木学論文 No.57

表1 載荷方法 (DAPC1～4は広中³⁾による)

実験名称	仮試体	載荷方法	M (kg-cm)	W _{cs, max} (g-cm)
DAPC 1	No. 1	P.D.	8.98	100
DAPC 2	No. 2	P.D.	8.98	25
DAPC 3	No. 3	P.D.	8.98	25
DAPC 4	No. 3 ^{#1}	P.D.	8.98	100
DAPC 11	No. 11	単調変位増加載荷		
DAPC 12	No. 12	変位制御変位載荷		
DAPC 13	No. 13	P.D.	29.2	70
DAPC 14	No. 14	P.D.	29.2	32

W_{cs, max}: 最大入力加速度

P.D.: 仮想的実験

#1 DAPC 4の実験はDAPC 3の実験の後、同じ仮試体を用いて行なわれた。

表2 累積ひずみエネルギーと推定値

実験	破壊点における累積ひずみエネルギー (kg-cm)	スケルトンカーブにおける破壊点の推定値 (kg-cm)
DAPC 1	990	1700
DAPC 4	1250	1700
DAPC 13	3400	3200

実験	実験終了時における累積ひずみエネルギー (kg-cm)
DAPC 2	400
DAPC 3	380
DAPC 14	1320