

東電設計株式会社 正員 松島 学
東京電機大学 正員 松井 邦人

1. はじめに

構造物が耐用期間中に大きな地震動を受けることはまれであり、そのような大地震に対して構造物を弾性域内で設計することは経済的に困難である。一方、道路橋、電力施設等重要な土木構造物は、大きな地震時でもその機能を消失させることはできない。本研究は、地震時にくり返し力を受ける一質点系の構造物の塑性を許した場合、塑性ひずみエネルギーを評価することにより、その構造物の最適設計について検討を行なうものである。

2. 塑性ひずみエネルギーの定式化

図1aのような一層ラーメン構造物を図1bに示す一質点系の簡単なモデルに置換すると、地震時のこのモデルの運動方程式は、次式で表される。

$$M\ddot{y} + C\dot{y} + Q(y) = -M\ddot{y}_g \quad (1)$$

ここで、 M : 系の質量、 C : 減衰定数、 $Q(y)$: 系の復元力特性、 $y, \dot{y}, \ddot{y}$: 応答の変位、速度、加速度および入力波の加速度である。

次に、式(1)の両辺に $dy = \dot{y}dt$ を乗じて地震の継続時間 t_0 まで積分すると、次式のように表される。

$$M \int_0^{t_0} \ddot{y} \dot{y} dt + C \int_0^{t_0} \dot{y}^2 dt + \int_0^{t_0} Q(y) \dot{y} dt = -M \int_0^{t_0} \ddot{y}_g \dot{y} dt \quad (2)$$

式(2)の左辺の第一項は運動エネルギー、第二項は系の減衰機構によって消費されるエネルギー、第三項は系に蓄えられる塑性ひずみエネルギーと地震終了時の弾性エネルギーの和である。ただし、運動エネルギーと弾性ひずみエネルギーは、地震終了後しばらくして系の減衰機構により消失するものである。そして、右辺の項は地震終了時まで系に入力される地震のエネルギーである。ここで重要なのは、系の損傷に寄与する塑性ひずみエネルギー量であり、これは構造物の復元力特性、質量、入力地震動によって決定される値である。エネルギー入力の概念図を図2に示す。図中の E_e は、弾性ひずみエネルギー、 E_p は、塑性ひずみエネルギーである。本研究では損傷の指標として、塑性ひずみエネルギーの回数である次式の値 n_0 を定義する。ここで、 n_0 を累積塑性率と呼称する。

$$n_0 = E_p / 2E_e \quad (n_0 > 1) \quad (3)$$

n_0 は塑性率($\mu = \delta_{max} / \delta_y$)に対応するもので、一方向に1回のみの大きな塑性をもたらしただけの場合は等しくなる。実際の応答での荷重～変位関係は、くり返しの復元力を示す、そのため塑性率ではそのことを考慮することができないのでその点で有効な方法と考えられる。

3. 最適設計の考え方

累積塑性率 n_0 は、地震時に入力される塑性ひずみエネルギーの指標である。大野ら³⁾によると同じ断面の曲げ破壊をする鉄筋コンクリート部材であれば、10～30回程度の塑性を越えるくり返し力を受ける構造物が吸収できる塑性ひずみエネルギー量は等しいことを実験等により示している。そのことから、鉄筋コンクリート部材の吸収可能な塑性ひずみエネルギーを(3)式に対応するように変換すると、許容累積塑性率 n_a は、次式で表される。

$$n_a = E_p / 2E_e = \theta_p / \theta_y \quad (n_a > 1) \quad (4)$$

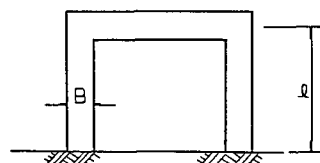


図1a. 一層ラーメンの構造物

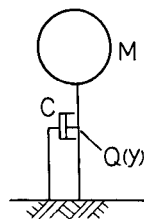


図1b. 一質点系のモデル

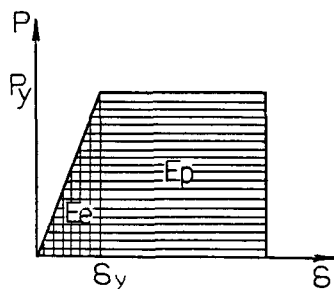


図2. ひずみエネルギーの概念図

ここで、 E_p :コンクリート部材の吸収可能な塑性ひずみエネルギー、 E_e :弾性ひずみエネルギー、 ϕ_p :最大塑性回転変形能力、 ϕ_y :降伏回転変形能力である。この実験から η_a を計算すると40程度の値となっている。しかし、後の例題では安全裕度をみて安全率で除して $\eta_a=15$ とした。

最適案を決定する方法は、次式の制限値の中で最も経済的な構造体を選択することである。

$$\left. \begin{array}{l} \text{i. 累積塑性率 } \eta_a \leq \eta_a \\ \text{ii. 最大応答変位 } \delta_{\max} \leq \delta_a \end{array} \right\} \quad (5)$$

4. 一層ラーメン構造物の最適設計

鉄筋コンクリート部材の復元力特性は、初期、つまり部材のひび割れ耐力までは、部材にひび割れが生じていないので全断面有効な剛性を持つ部材と考えてよい。しかし、ひび割れ耐力以上になるとひび割れの影響により部材の剛性が低下する。建築学会では部材の剛性低下は、断面二次モーメントの低下として表せるとして、次式の実験式を提案している。

$$I' = \alpha_y I = (0.043 + 1.64 n P_t + 0.043 q/d + 0.33 r_o) (d/b)^2 \quad (6)$$

ここで、 n :ヤング係数比、 P_t :降伏引張鉄筋比、 q/d :シアスピアニ比、 $r_o = N/bD\sigma_{ck}$ (N :軸力、 b, D :断面寸法、 σ_{ck} :コンクリート圧縮強度)である。

一般に、鉄筋コンクリート部材の断面が大きくなると、剛性も大きくなり、結果として、鉄筋量も少なくなり降伏耐力も大きくなる。つまり、ある鉄筋量、系の重量を与えて部材の断面寸法 B がわかれば、系の弾性剛性 K 、降伏耐力 P_y 、固有周期 T は一義的に与えられる。その一例として、図1aに示した一層ラーメン構造での柱断面寸法と降伏耐力について、柱の高さ $l=6m$ の場合について、鉄筋比をパラメータに図3にその関係を示す。

次に、一層ラーメン構造の最適設計について、今まで説明した方法を利用して行なった例を示す。試算するにあたり、全重量 $M_g = 800t$ 、減衰定数 $\alpha = 0.05$ ($C=2\%$)、柱の高さ $l=6m$ 、柱の断面は正方形とし、鉄筋のかわりは $d=10mm$ とした。又、系の復元力特性は、図5に示すバイリニアールとした。入力地震波はEl Centro, 1940. NSであり、最大加速度を300galに合せた。試算結果を $P_t=0.2\sim 1.0\%$ の場合について、柱の断面寸法 B をパラメータにし、累積塑性率 η_a 、最大応答変位 $\delta_{\max}$ との関係を図6, 7に示す。図にみられるように、柱の断面寸法 B が大きくなるにつれて、 η_a 、 $\delta_{\max}$ も小さくなる傾向にある。最適形状は、許容最大応答変位を $\delta_{\max}=5cm$ 、許容累積塑性率を $\eta_a=15$ とすると、図8に示すような制約領域となり、 $P_t=0.5\sim 1.0\%$ 、 $B=100\sim 200cm$ が採択される。

(謝辞)本研究の数値計算にあたっては、59年度本学修士学生中原耕一郎、同卒論生志田圭史、依田秀一氏に多大のご助力をいただいた。ここに深く感謝する。

(参考文献) 1.) Housner, G. H, Limit Design of Structures to Resist Earthquakes. Proc. of 11th WCEE
2.) 加藤 利山, 地震による構造物の損傷と構造物の損傷, 日本建築学会論文報告集, 215号, BE4050年9月
3.) OHNO, NISHIOKA, An Experimental Study on Energy Absorption of Column Reinforced Concrete Structures, Proc. of JSEC Vol.1, No2 Oct 1984

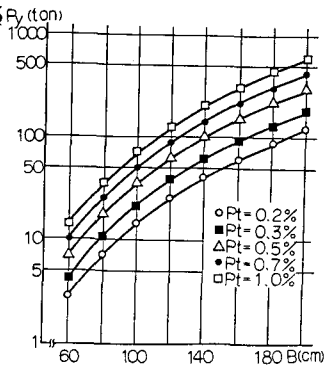


図3. 降伏耐力 P_y と柱断面寸法 B の関係

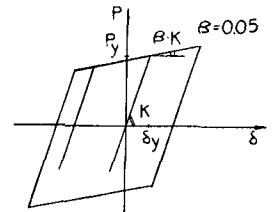


図4. 系の復元力特性

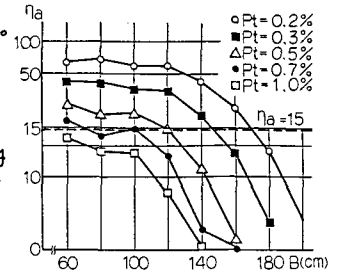


図5. 累積塑性率 η_a と断面寸法 B の関係

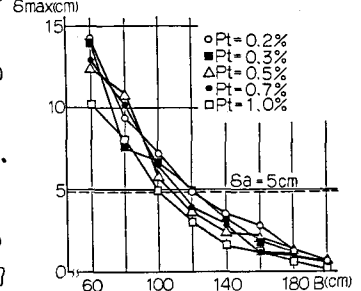


図6. 最大応答変位 $\delta_{\max}$ と断面寸法 B の関係

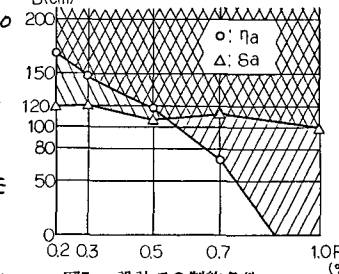


図7. 設計での制約条件