

(67) 地震時におけるRC橋脚の最大応答予測について

京都大学防災研究所 正会員 土岐 憲三

京都大学大学院 学生員 白井 孝治

1. まえがき

道路橋示方書の第V編(耐震設計編)¹⁾では、応力度の照査に加えて、標準震度に対応する地震規模をある程度上回る規模の地震を受けた場合において主鉄筋の応力度が降伏点を越えた後でも脆性破壊を起さないように変形性能の照査も行なうべきことが示されている。しかし、その照査法は一種の等価線形化法であり、また、その中で用いられている数値などについても不明確な点があり、改善する余地があると指摘されている²⁾。そこで本研究では、代表的な橋脚の形式であるT型橋脚を対象とし、弾塑性応答計算結果に基づいた簡便で実用的な最大応答変位の予測式を提案した。

2. 弾塑性応答解析

本研究では橋脚の解析モデルとして1自由度の非線形振動系を用いた。このモデルの質点の質量は道路橋示方書に従い、一径間分の質量に橋脚躯体重量の30%を加えたものとし、減衰定数は5%とした。

次に、繰り返し荷重載荷時のRC部材の荷重変形履歴曲線は、図-1に示すような劣化型のtri-linear型(武藤モデル)を用いた。このモデルの復元力特性はコンクリートにひびわれが発生するまでは線形であるが、ひびわれが発生した後は復元力と変位の関係は第2勾配に移る。また第3勾配に至らなければ除荷時には原点を目指す。そして降伏後は第3勾配に移り、戻りは原点と降伏点を結ぶ降伏点剛性となり、載荷時はそれまでに経験した最大点を目指すというものである。なお、履歴曲線の骨格となるスケルトンカーブは道路橋示方書の静的な応力計算に基づき、部材の断面にひびわれが発生する状態(図-2の点C)、引張側の主鉄筋が降伏する状態(点Y)及び圧縮側のコンクリートが圧潰する状態(点U)に着目して得られる折れ線OCYUをスケルトンカーブとした。

解析の対象とした構造物は、図-3に示すT型単柱のRC橋脚である。その構造諸元を決定するにあたっては、阪神高速道路公団の『鉄筋コンクリート構造物標準図』³⁾を基準とした。この標準図中の橋脚高さ $H=16\text{m}$ のものを基本型として選定し、橋脚高が $10\text{m} \sim 22\text{m}$ の範囲内のものについてその橋脚下端における断面力を比較して、一般的な断面寸法をもつように35種類設計し、これらの橋脚群をモデル G_a とした。比較・検討のために設計変数を変化させて25種類設計し、計80種類の橋脚を設計した。それらの鉄筋比と断面の組み合わせを示したのが図-4であり、各橋脚高さごとにモデル G_a における鉄筋量をそのままにして断面寸法を大きくすることにより橋脚群、モデル G_b 、 G_c 、 G_d 、 G_e を

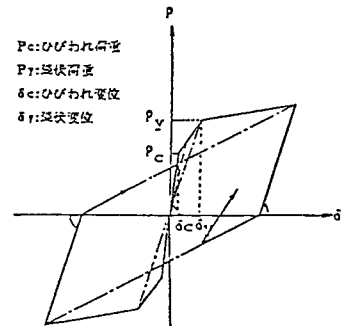


図-1 復元力特性

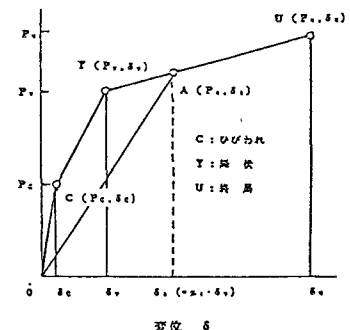


図-2 スケルトン曲線

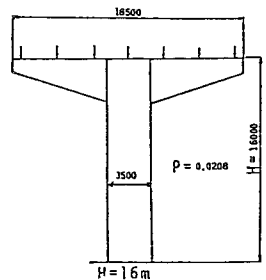


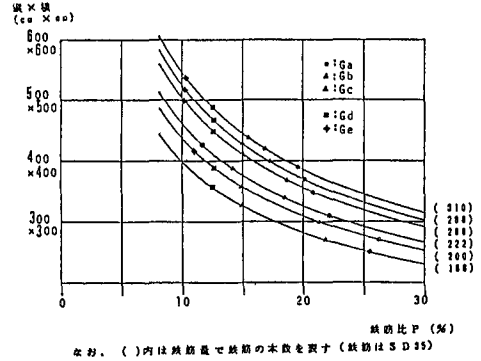
図-3 標準設計の橋脚

設定した。図中の曲線は横軸は鉄筋比、縦軸は断面寸法（正方形）を表わし、図中の曲線は各橋脚高さ毎（上から順に20m, 18m, 16m, 14m, 12m, 10m）の鉄筋量一定の場合の鉄筋比と断面の寸法の関係を表している。

また、橋脚の断面・形状・寸法及びスケルトンカーブの決定などの設計作業については、著者らが先に開発した道路橋示方書に準拠した対話型のCADシステム⁴⁾を用いた。入力地震波形はEl Centro(1940)、八戸(1968)、Taft(1952)、の記録の水平成分を用いた。

3. 計算結果

橋脚高、柱断面寸法（正方形）、鉄筋比、入力最大加速度（100gal ~ 1000gal）、入力地震波などの条件を変化させ、これらの全ての組み合わせに対して弾塑性応答計算を行なった。計算結果の一例としてEl Centro、



なお、()内は鉄筋量で鉄筋の本数を表す（鉄筋はSD35）

図-4 断面と鉄筋比

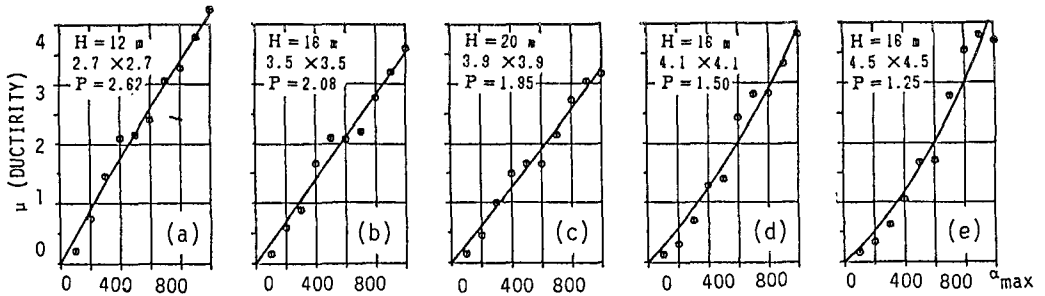


図-5 塑性率応答と最大入力加速度（El Centro）

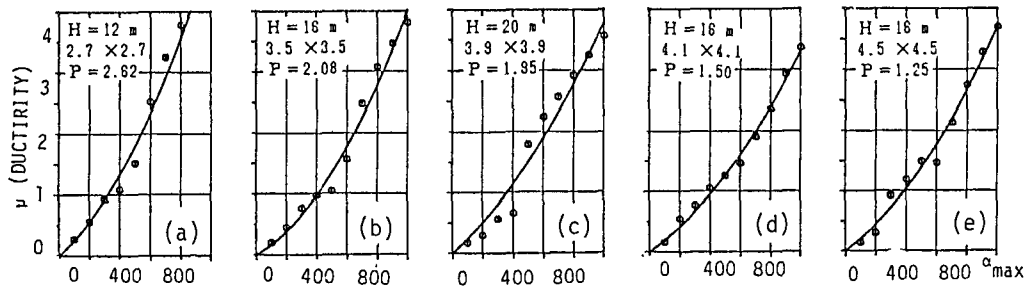


図-6 塑性率応答と最大入力加速度（八戸）

八戸の被形に対する塑性率（ μ ）と入力最大加速度（ α_{max} ）の関係を示したものが図-5、図-6である。これより、断面が大きくなるに従って塑性率は大きくなり、高さが高くなるに従って塑性率が小さくなっていることがわかる。El Centro に対する図-5(a),(b),(c) ではほぼ1次比例の関係があるが(d),(e) では2乗に比例する関係が認められる。一方、八戸に対する図-6ではやや二次比例の関係が認められる。しかし標準的な断面・形状を有するもの((a),(b),(e))に限定すれば、 μ と α_{max} の関係は、ほぼ1次比例の関係が認められる。そこで、これらの橋脚を対象にして考えるならば、横軸の入力最大加速度を重力加速度で

除して入力震度 k_p に変換することにより、塑性率と入力震度間の回帰式を次式のように定義することができる。

$$\mu = A \cdot k_p \quad (1)$$

この回帰式の適合性について検討した結果では、式(1)をもとに推定した塑性率と実際の応答計算で得られた塑性率との比について見ると、El Centro では平均値が0.94、標準偏差が0.20、Taftでは0.93、と0.17、八戸では0.89、と0.24であった。この結果から八戸については若干ばらつきが大きい、平均値は1.0 を中心に狭い範囲内にあり、標準偏差は小さく、よい近似を与えている。そこで、以後この関係式に基づいて検討を行なった。

次に各橋脚によって係数Aの大きさが異なるのは、主に橋脚の固有周期に依存することによるものと思われるので、次式で定義される固有周期をAのパラメータとして選んだ。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{W}{g K_{eq}}} \quad (2)$$

ただし、 $K_{eq} = P_y / \delta_y$

このようにして得られたAとTとの関係を El Centro、Taft、八戸の場合について図-7(a)、(b)、(c) に示した。

4. 最大応答変位の予測式

多くの橋脚例について弾塑性応答解析を行い、そこから共通の性状を抽出して入力強度と最大応答との関係を線形応答におけるそれと結びつけることができるならば、これまでの多くの線形応答解析の蓄積を非線形挙動を考慮したときの応答予測に有効に利用することができる。そこで、3の結果において橋脚の形状・寸法が標準的なものであれば、 μ と α_{max} の関係はほぼ直線関係に近いと認められることから、対象をこれらに限定して以下のような考察を行った。

いま、図-8に示すような完全弾塑性型の復元力特性を持つ系を考えると、非弾性応答変位 δ_p 、弾性変位 δ_e 、降伏変位 δ_y 、降伏強度 Q_y 、弾性荷重 Q_e の間には次のような関係がある。

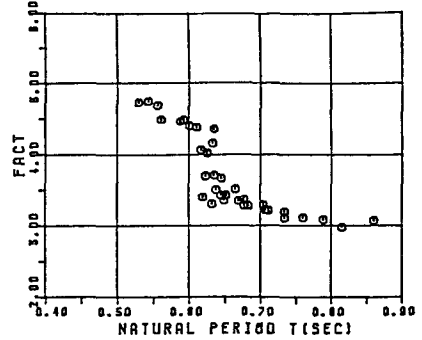
$$\frac{\delta_p}{\delta_e} = \frac{\delta_p}{\delta_y} \cdot \frac{\delta_y}{\delta_e} = \mu \frac{\delta_y}{\delta_e} \quad (3)$$

また、水平設計震度と荷重との間には次式が成り立つ。

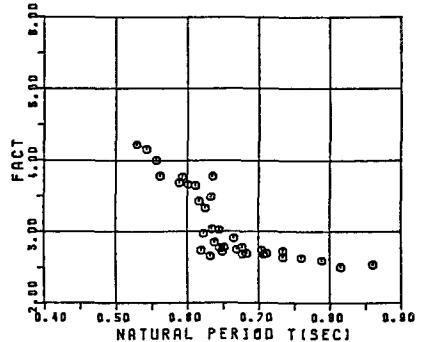
$$\frac{Q_y}{Q_e} = \frac{k_y}{k_p} = \frac{\delta_y}{\delta_e} \quad (4)$$

ここに k_p は最大入力加速度に対応する震度であり、 k_y は鉄筋が降伏する時の震度である。したがって(1)・(3)・(4)より容易に次式を得る。

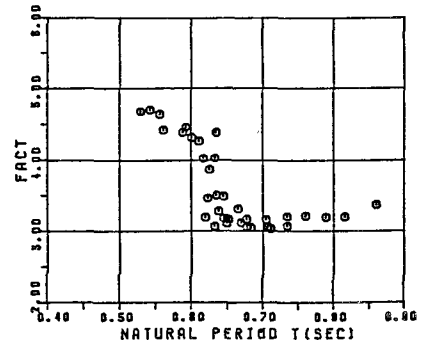
$$\frac{\delta_p}{\delta_e} = A(T) \cdot k_y \quad (5)$$



(a) 入力波形 El Centro



(b) 入力波形 Taft



(c) 入力波形 八戸

図-7 係数と固有周期 T

すなわち、この式は、 $A(T)$ 、 k_y 、及び線形解析による応答変位 δ_e から非弾性応答変位 δ_p が求まることを示している。すなわち、 δ_e は、各種線形応答スペクトルから知ることができるので、降伏震度さえ算定すれば $A(T)$ を用いて応答塑性率が容易に求められることになる。

先に図-7において示したそれぞれの波形を入力した時の固有周期 T と係数 A との関係は波形がちがっても良い相似性が認められる。

すなわち、固有周期が0.65秒より長周期側ではほぼ一定となり、それより短周期側では周期が短くなるにつれて係数 A が大きくなっている。そこで式(5)中の $A(T)$ を次式のように書き表す。

$$A(T) = \begin{cases} C & (T \geq 0.65) \\ C + 18(0.65 - T) & (T < 0.65) \end{cases} \quad (6)$$

ここに、 C は入力波形の特性によって決まる定数であり本解析の結果では次のようになった。

El Centro	$C=3.2$
Taft	$C=2.7$
八戸	$C=3.2$

以上の手法によって、橋脚の固有周期を本解析で定義した方法により定め、降伏変位に対応する震度 k_y を求めれば、式(5)と(6)から対象とする波形に対して容易に塑性率応答を予測することができる。これらの関係を示したものが図-9である。

5.あとがき

非線形応答スペクトルを一般性のある形で表現することは非常に困難である。そこで本研究では、数多くの鉄筋コンクリートのT型橋脚を対象に弾塑性応答解析を行ない、その結果に基づき、非線形応答を知る簡易な方法を検討した。すなわち、60種類の橋脚を道路橋示方書に従って設計し、これらに対して弾塑性地震応答解析を実施し、それらの塑性率応答と固有周期との関係について検討を行った。その結果、0.6~0.7秒以上の固有周期を持つ橋脚においては、線形解析に対する非弾性解析による最大応答変位はほぼ一定の値となり、これより短い固有周期の橋脚においては周期が短くなると直線的に増大することが見出された。このような成果に基づいて標準的な断面を持つ橋脚に対して非弾性応答による最大変位を橋脚の固有周期と降伏震度の二つのパラメーターと線形応答変位とで表される式を提案した。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路示方書・同解説『耐震設計編』、昭和55年、8月
- 2) 太田 実：鉄筋コンクリート橋脚の耐震設計、橋梁と基礎、1981年12月、pp.32 ~ pp.37
- 3) 江見 晋・石崎 浩・木代 穰：阪神道路公団・技法第3号、pp.48 ~ pp.59、1984
- 4) 土岐 憲三・沢田 純男：道路橋の耐震設計のためのマイコンによるCAD システム、土木学会関西支部 年次学術講演会、講演概要、1984、PP.I-41-1~I-41-2.

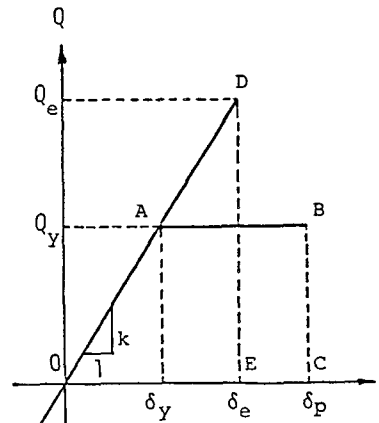


図-8 $\delta_p, \delta_e, \delta_y$ の関係

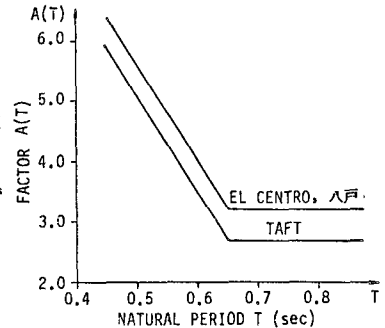


図-9 $A(T)$ と T の関係図