

大阪市立大学工学部 正員 中井 博 大阪市立大学工学部 正員 北田俊行
 大阪市立大学工学部 正員 中西克佳 大阪市立大学工学部 学生員○栗田康弘

1. まえがき 本研究は、薄肉箱形断面を有する鋼製、および合成橋脚柱の耐震性に影響するパラメータを抽出し、ハイブリッド実験などの地震応答シミュレーションを含めた種々な実験結果を整理して、それらのパラメータの影響について検討したものである。

2. 塑性率と等価弾性耐力力とに関する数理的考察 道路橋示方書・同解説 V.耐震設計編¹⁾(以下、道示という)に示されているニューマークのエネルギー一定則は、簡単に説明すれば、式(1)に示すように、橋脚柱の水平荷重-水平変位曲線の弾塑性エネルギーを弾性エネルギーに等置して等価弾性耐力力 H_e を求める手法である。なお、式(1)中の μ_a は、許容塑性率である。

$$H_e = \sqrt{1+2(\delta_u/\delta_y - 1)} \cdot H_{yp} = \sqrt{2\mu_a - 1} \cdot H_{yp} \quad (\text{ただし, 安全率 } \alpha = 1.0 \text{ とした場合}) \quad (1)$$

以下には、この手法による鋼製、および合成橋脚柱の塑性率と H_e とについての検討結果を示す。まず、過去の実験結果から、鋼製、および合成橋脚柱において、地震時のエネルギーを吸収できる最終の限界状態は、それぞれ図-1、および図-2に示すように、終局限界状態、および水平変位が終局水平変位 δ_u を超え水平荷重が充填コンクリートを無視した鋼断面としての終局水平耐力力 $H_{upc,id} = H_{pp}$ まで低下した点(以下、復旧可能限界状態という)であることがわかった。つぎに、図-1中の等価終局限界状態における水平変位、および図-2中の等価復旧可能限界状態における水平変位をそれぞれ δ_y で除したものを、終局限界状態における等価塑性率 μ_u^* 、および復旧可能限界状態における等価塑性率 μ_{id}^* と定義した。そして、式(2)、および式(3)には、 μ_u^* 、および μ_{id}^* の算定式を示す。

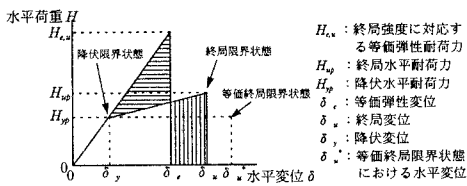


図-1 鋼製橋脚柱の水平荷重-水平変位曲線関係

$$\mu_u^* = \frac{\delta_u^*}{\delta_y} = 1 + \frac{\delta_u - \delta_y}{\delta_y} \frac{H_{up} + H_{yp}}{2H_{yp}} \quad (2)$$

ここで、 μ_u^* 、および μ_{id}^* の値を導き出す推定式があれば、 $\mu_a = \mu_u^*$ 、あるいは $\mu_a = \mu_{id}^*$ とおくことによって、橋脚柱の等価弾性耐力力 H_e を容易に算出することができる。まず、鋼製橋脚柱の μ_u^* の値に最も影響を与えるパラメータは、幅厚比パラメータ R で、ついで軸方向力比 P/N_{ps} であることが、過去の実験より明らかにされている。そこで、 μ_u^* への影響の大小を考慮に入れたパラメータ $(1+P/N_{ps})^{0.5}R$ に最小二乗法を適用して同定すれば、 μ_u^* は、図-3に示すように、次式で求められる。

$$\mu_u^* = 8.44 \{ (1+P/N_{ps})^{0.5} R \}^{-0.164-6.75} \quad (4)$$

(ただし、 $0.05 < P/N_{ps} \leq 0.3$ 、および $0.2 < R \leq 0.8$)

つぎに、合成橋脚柱の μ_{id}^* の値に最も影響を与えるパラメータは、スタッドを設置しない場合、幅厚比パラメータ R であることが、過去の実験より明らかにされている。そこで、 R と μ_{id}^* との関係に最小二乗法を適用して同定すれば、 μ_{id}^* は、図-4に示すように、次式で求められる。

$$\mu_{id}^* = 2.40R^{-1.05} + 2.00 \quad (\text{ただし, } 0.3 < R \leq 0.8) \quad (5)$$

3. 終局限界状態を超えた後の橋脚柱の接線剛度 鋼製、および合成橋脚柱の終局限界状態に達した後の接線剛度 K_3 は、 P/N_{ps} 、および R の影響を著しく受けることが過去の実験よりわかっている。そこで、図-5には、鋼製、および合成橋脚柱の $M-\phi$ 曲線における包絡線の傾きを表すパラメータ

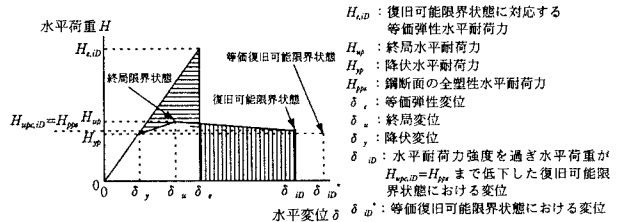


図-2 合成橋脚柱の水平荷重-水平変位曲線関係

$$\mu_{id}^* = \frac{\delta_{id}^*}{\delta_y} = 1 + \frac{H_{pp} - H_{yp}}{2H_{yp}} \frac{\delta_u - \delta_y}{\delta_y} + \frac{H_{up} + H_{pp}}{2H_{yp}} \frac{\delta_{id} - \delta_y}{\delta_y} \quad (3)$$

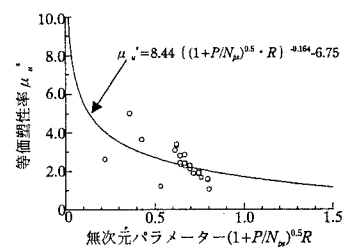


図-3 鋼製柱の実験供試体における無次元パラメータ $(1+P/N_{ps})^{0.5}R$ と等価塑性率 μ_u^* との関係

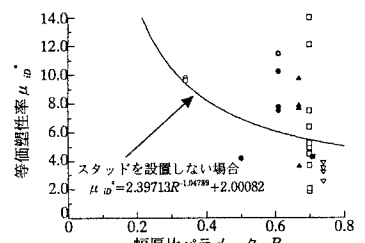


図-4 合成柱における幅厚比パラメータ R と等価塑性率 μ_{id}^* との関係

と K_3 への影響の大小を考慮に入れたパラメータ $(1+P/N_{ps})R^{0.5}$ との関係を示す。そして、これらに最小二乗法を適用して同定すれば、パラメータ K_3 は、それぞれ以下の式で求められる。

$$\text{鋼製橋脚柱} \quad : K_3 = -0.293 \left\{ (1+P/N_{ps})R^{0.5} \right\}^{5.11} \quad (6)$$

$$\text{合成橋脚柱(スタッド無し)} : K_3 = -0.167 \left\{ (1+P/N_{ps})R^{0.5} \right\}^{5.11} \quad (7)$$

$$\text{合成橋脚柱(スタッド有り)} : K_3 = -0.122 \left\{ (1+P/N_{ps})R^{0.5} \right\}^{5.11} \quad (8)$$

図-5によると、鋼製橋脚柱より合成橋脚柱の方が、またスタッドを設置していないものより設置している合成橋脚柱の方が、終局限界状態に達した後の接線剛度の劣化の割合が小さいことがわかる。

4. 鋼製橋脚柱の固有振動周期と地震時最大応答変位、および地震後残留変位との関係に関する考察 橋脚長が 4.72~21.93m の 15 種類の解析モデルで、表-1と同じ断面を用いて、1 自由度系の弾塑性地震応答解析²⁾を行い、橋脚柱の地震時の最大応答変位、および地震後の残留変位と固有振動周期との関係について検討した。なお、弾塑性地震応答解析には、兵庫県南部地震における神戸海洋気象台の南北方向記録、JR 鷹取駅の南北方向記録、および東神戸大橋の南北方向記録の合計 3 種類の地震加速度波形を用いた。ここで用いた解析モデルにおいて、道示の許容応力度に対応する水平加速度は、55~550gal と同じでなく、道示を満足しないものも存在する。しかしながら、ここでは、ただ単に同じ断面を有しているものの、脚長を変化させることによって固有振動周期 T を変化させた鋼製橋脚柱が同じ地震を受けた場合に対する地震時最大応答変位 δ_{max} 、地震後残留変位 δ_R と固有振動周期との関係について検討を行ってみた。

図-6、および図-7には、以上の弾塑性地震応答解析結果、ならびにハイブリッド実験による地震応答シュミレーション結果から抽出した固有振動周期と δ_{max} 、および δ_R との関係を示す。ちなみに、図-7の縦軸を、図-8に示すように、 δ_R/L で示すと、道示¹⁾の許容限界残留変位との関係がわかる。

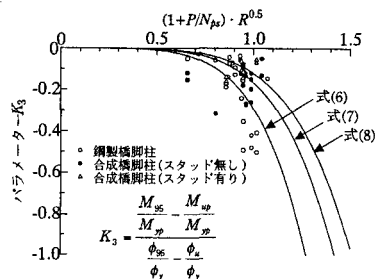
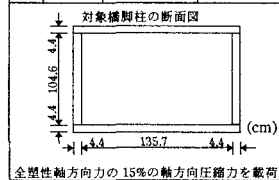


図-5 パラメータ K_3 のそれぞれの推定式と実験データの分布状況との比較

表-1 解析モデルの内訳

| No. | 脚長 L (m) | 固有振動周期 T (s) | 許容応力度に対する加速度 α (gal) |
|-----|------------|----------------|-----------------------------|
| 1 | 21.93 | 1.350 | 55 |
| 2 | 18.90 | 1.080 | 69 |
| 3 | 15.60 | 0.810 | 92 |
| 4 | 13.82 | 0.675 | 110 |
| 5 | 11.91 | 0.540 | 138 |
| 6 | 11.10 | 0.486 | 153 |
| 7 | 9.83 | 0.405 | 183 |
| 8 | 9.09 | 0.360 | 206 |
| 9 | 8.93 | 0.351 | 212 |
| 10 | 8.00 | 0.297 | 250 |
| 11 | 7.50 | 0.270 | 275 |
| 12 | 6.99 | 0.243 | 306 |
| 13 | 6.19 | 0.203 | 367 |
| 14 | 5.72 | 0.180 | 413 |
| 15 | 4.72 | 0.135 | 550 |



全塑性軸方向力の15%の軸方向圧縮力を載荷

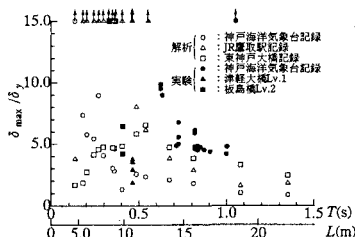


図-6 固有振動周期 T と δ_{max} との関係

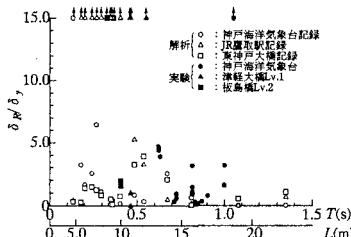


図-7 固有振動周期 T と δ_R との関係

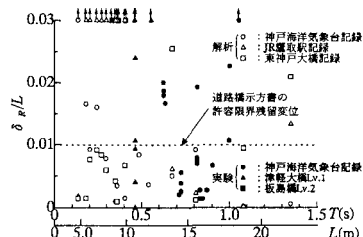


図-8 δ_R と限界残留変位との関係

図-6~図-8によると、 δ_{max}/δ_y 、および δ_R/δ_y を低減させるためには、耐力を上昇させるよりも、柱の固有振動周期を上昇させる方が効果的であることがわかる。また、図-8によると、道示¹⁾の残留変位に関する規定は、設計に関して厳しいことがわかる。

5. まとめ 本研究で得られた主な成果をまとめると、それらは、以下のとおりである。

- i) 鋼製、および合成橋脚柱において、地震エネルギーが吸収できると考えられる限界状態は、それぞれ終局状態、および復旧可能限界状態である。そして、これらの限界状態における水平変位を推定するための回帰曲線を、導いてみた。
- ii) 終局限界状態に達した劣化域における橋脚柱の接線剛度が推定できる回帰曲線を、導いてみた。
- iii) δ_{max}/δ_y 、および δ_R/δ_y の値を小さくするためには、耐力を上昇させるよりも、固有振動周期を長くする方が効果的であることを示した。
- iv) 橋脚柱の設計における道示¹⁾の残留変位の規定は、厳しいものであることを示した。

参考文献 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説、Ⅱ.鋼橋編、およびⅤ.耐震設計編、丸善、1996年12月。
2)中井 博・北田俊行・中西克佳・三原邦啓：箱形断面を有する鋼製・合成橋脚柱の塑性域における構成則に関する基礎的研究、平成7年度年次学術講演会講演概要集、土木学会関西支部、I-82、1995年5月。