

1. はじめに

兵庫県南部地震による鋼製橋脚の被害を踏まえ、平成8年12月に道路橋示方書・解説V耐震設計編¹⁾が改訂され、鋼製橋脚に関しては、塑性域での耐力や変形性能を考慮した設計法が新たに追加された。実際の鋼材の降伏応力度は設計で用いられる公称降伏応力度より高いのが一般的であるが、既往の研究²⁾では、降伏応力度が大きいことは部材の塑性率を低下させる可能性があること指摘されている。矩形断面鋼製橋脚を対象とした既往の研究³⁾では、降伏応力度のばらつきよりも評価式の精度が変形性能の評価に大きく関与していることも確認された。本研究では、材料強度等のばらつきおよび耐力、変形性能を評価する際の評価式自体の評価誤差によって生じるばらつきが、円形断面鋼製橋脚の耐力・変形性能等の耐震性の評価に与える影響についての検討を行った。

2. 鋼材の機械的性質に関する調査

『道路橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書』⁴⁾による鋼製橋脚の正負交番繰返し載荷実験の際、供試体に用いた鋼材の引張試験が行われた。その試験結果を整理し、鋼材の降伏応力度や引張強さ、断面積、破断伸び等、鋼材の機械的性質の調査を行った。そのうち、SS400材の降伏応力度についての結果を図-1に示す。既往の研究⁵⁾と比較すると、平均値は近い値を示しているが、変動係数に差異があった。実験供試体が少なかったことが原因の一つとして考えられる。

3. モンテカルロシミュレーションによる耐力・変形性能の評価

一般的な円形断面鋼製橋脚を対象に、実験供試体4体、解析モデル4体の計8体⁶⁾について、降伏応力度のばらつきが耐力・変形性能に及ぼす影響をモンテカルロシミュレーション手法により検討した。本研究では、鋼材の機械的性質のうち降伏応力度のばらつきが最も大きかったことから、降伏応力度 σ_y のばらつきのみを確率変数として検討を行った。 σ_y の分布形については、本調査結果に従い、SM490材に関しては平均値 $M=1.176$ 、標準偏差 $V=0.08354$ ³⁾、SS400材に関しては $M=1.252$ 、標準偏差 $V=0.07073$ の正規分布に従うものと仮定して2,000個の乱数を発生させた。また、評価式は宇佐美ら⁷⁾による以下の式(1)、(2)を用い、耐力、変形性能の評価指標として正負交番載荷実験の最大水平荷重、最大水平荷重時変位を使用した。さらに、既往の研究²⁾で指摘のあった、 H_{max}/H_y および δ_m/δ_y についても検討をおこなった。

$$\frac{H_{max}}{H_y} = \frac{0.20}{(R_f \times \lambda)^{0.8}} + 1.10 \quad \cdots (1)$$

H_{max} : 最大水平荷重

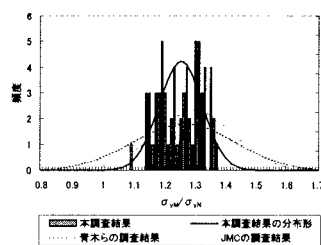
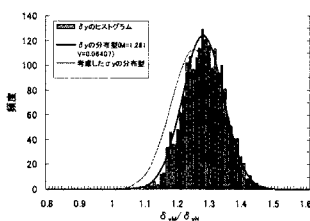
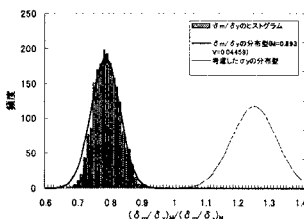
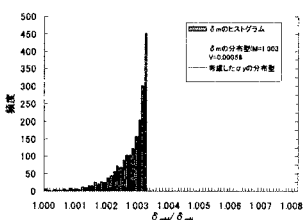
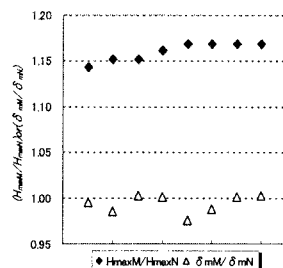
H_y : 降伏水平荷重

$$\frac{\delta_m}{\delta_y} = \frac{1}{3 \left\{ R_f \times (\lambda)^{0.5} \right\}^{0.8}} + \frac{2}{3} \quad \cdots (2)$$

δ_m : 最大水平荷重時変位

δ_y : 降伏水平変位 (曲げ変形のみ)

図-2から図-4に供試体KC-1における降伏水平荷重時変位 δ_y 、塑性率 δ_m/δ_y 、最大水平荷重時変位 δ_m のシミュレーション結果、図-5に8供試体の最大水平荷重の比 H_{maxM}/H_{maxN} および最大水平荷重時変位の比 δ_{mM}/δ_{mN} の平均値を示す。なお、本論文では、公称降伏応力度から算出した値は添え字“N”、材料試験結果の降伏応力度から算出した値は添え字“M”で示し、グラフは公称降伏応力度から算出した値で基準化してある。ばらつきを考慮した降伏応力度から算出した塑性率 $(\delta_m/\delta_y)_M$ は、公称降伏応力度から算出した塑性率 $(\delta_m/\delta_y)_N$

図-1 降伏応力 σ_y の分布図-2 降伏荷重時変位 δ_y の分布図-3 塑性率 δ_m/δ_y の分布図-4 最大荷重時変位 δ_m の分布図-5 8供試体の H_{maxM} 、 δ_{mM} の平均値

より小さいが、降伏水平荷重時変位 δ_{yM} の増加を受け、最大水平荷重時変位 δ_{mM} は公称降伏応力度から算出した最大荷重時変位 δ_{mN} より大きくなっていることがわかる。また、 H_{maxM}/H_{maxN} の平均値の方が δ_{mM}/δ_{mN} の平均値より大きく、変形性能に比べ耐力の方が安全側に評価されていることがわかる。

4. 部材耐力および変形性能評価式の精度の検討

一般に耐力および変形性能評価式の推定式の精度は、正負交番載荷試験結果と比較することによって得られる⁸⁾。しかし、円形断面鋼製橋脚供試体の実験結果が少なかったため、本稿では、弾塑性有限変位解析結果との比較も行った。検討対象はさきほどと同じ8供試体とし、最大荷重および最大荷重時変位の推定に当たっては同様に宇佐美らの算定式(1)、(2)を用いた。耐力評価式については、平均値が0.0520、標準偏差0.07785となり、変形性能評価式については、平均値が0.0214、標準偏差0.114398となった。結果を図-6、図-7に示す。耐力評価式は実験値をやや安全側に、変形性能評価式は実験値をやや危険側に評価していることがわかる。また、降伏応力度に比べてばらつきが大きいと言える。

5. 降伏応力度および評価式のばらつきを考慮した耐力・変形性能の検討

円形断面鋼製橋脚供試体 KC-1 について、下記の式(3)および(4)で降伏応力度および評価式のばらつきを考慮した実最大荷重 H_{max}^P 、実最大荷重時変位 δ_m^P をそれぞれ2,000個算出した。

$$H_{max}^P = (1 + m_H) \cdot H_{maxM} \quad \dots (3) \quad \delta_m^P = (1 + m_\delta) \cdot \delta_{mM} \quad \dots (4)$$

H_{maxM} 、 δ_{mM} ：図-1に示す降伏応力度の分布を考慮して算出した最大荷重および最大荷重時変位

m_H ：耐力評価式のばらつきを考慮する指標で、図-6の検討結果より、平均値0.0520、標準偏差0.07785の正規分布に従うと仮定して算出する値

m_δ ：変形性能評価式のばらつきを考慮する指標で、図-7の検討結果より、平均値0.0214、標準偏差0.1144の正規分布に従うと仮定して算出する値

実最大水平荷重 H_{max}^P は大部分において設計最大荷重 H_{maxN} より大きくなっていることがわかる。これは設計で想定すると考えられる耐力より、実橋脚が発揮する耐力の方が大きいことを表していると考えられる。しかしながら、実最大水平荷重時変位 δ_m^P が設計最大荷重時変位 δ_{mN} を下回るものが半数程度あり、設計で想定した変形性能を実橋脚で期待できないものが半数程度存在する可能性がある。

6. 結論

今回行った検討では、降伏応力度のばらつきのみ考慮した場合、降伏応力度 σ_{yM} が大きくなるにつれ、降伏荷重 H_{maxM} 、降伏荷重時変位 δ_{yM} はともに大きくなり、その影響を受け、 $(H_{max}/H_{y})_M$ または塑性率 (δ_m/δ_{yM}) の減少は相殺されるので、結果として、実最大荷重 H_{maxM} または実最大荷重時の変位 δ_{mM} は、公称降伏応力 σ_{yN} を用いて算出してもとめたものより大きくなった。しかし、評価式のばらつきが大きく、その影響を受けて、降伏応力度および評価式のばらつきを考慮した最大荷重、最大荷重時変位は公称値より求めたものを下回る場合もあった。

参考文献) 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、1996年12月、2) Yushi Fukumoto: Reduction of structural ductility factor due to variability of steel properties, Engineering Structures, No.22, pp123-127, 2000、3) 森口 智聡ら：降伏応力度等のばらつきが矩形断面鋼製橋脚の耐震性評価に与える影響に関する検討、第4回鋼構造物の非線形数値解析と耐震設計への応用に関する論文集、pp.239-248, 2002年1月、4) 建設省土木研究所等：道路橋橋脚の地震時限界状態設計法に関する共同研究報告書 (I) ~ (VII)、(総括編)、1997.4~1999.3、5) 青木 博文ら：構造用鋼材における機械的性質の平均値と変動係数 (その2. 平均値と変動係数の評価)、日本建築学会大会学術講演集、昭和55年9月、6) 小野 深ら：円形断面鋼製橋脚の正負交番載荷実験に基づく M-Φ モデル設定手法に関する検討、鋼構造論文集第8巻第31号、pp97-105, 2001年9月、7) 社) 土木学会鋼構造委員会、(社) 日本鋼構造協会次世代土木鋼構造研究特別委員会：鋼構造物の耐震解析用ベンチマークと耐震設計法の高高度化、平成12年4月、8) 足立 幸郎ら：じん性設計を行なった鉄筋コンクリート橋脚の耐震信頼性評価、構造工学論文集, vol.46A, pp777-788, 2000年3月

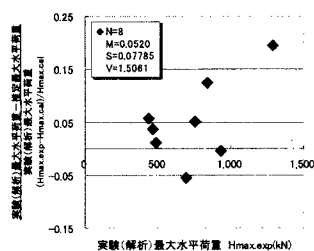


図-6 耐力評価式の精度

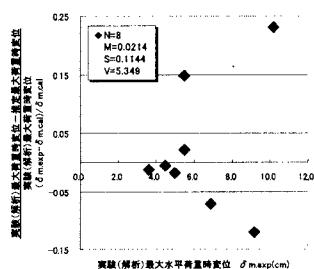


図-7 変形性能評価式の精度

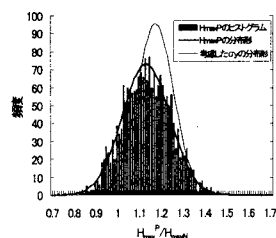


図-8 最大荷重 H_{max} の分布

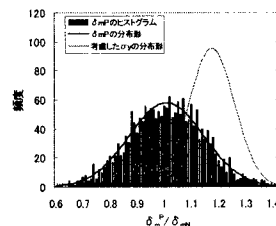


図-9 最大荷重時変位 δ_m の分布