

1. はじめに

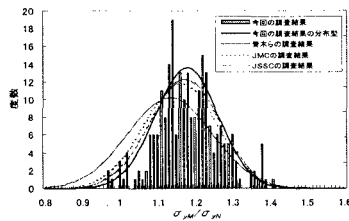
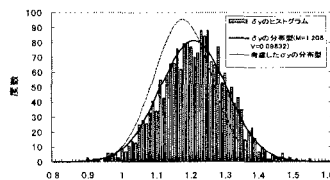
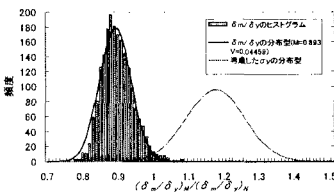
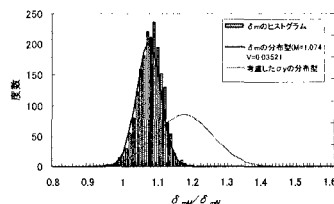
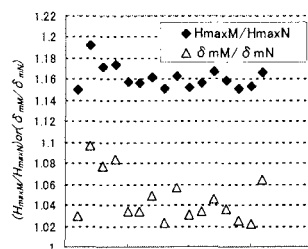
平成7年1月17日に発生した兵庫県南部地震では鋼製橋脚についても初めて大きな被害を受けた。その被害を踏まえ、平成8年12月に道路橋示方書・同解説V耐震設計編¹⁾が改訂され、その規定の中で、鋼製橋脚に関しては、従来の弾性域での力を基本とした設計である震度法に加え、塑性域での耐力や変形性能を考慮した設計法が新たに追加された。ところで、実際の鋼材の降伏応力度は一般的に設計で用いられる公称降伏応力度より高く、このことは、従来の震度法に基づく許容応力度法による設計では部材に有利に働くと解されてきた。しかし、既往の研究²⁾では、降伏応力度が大きいことは部材の変形性能を危険側に評価する可能性がある旨指摘されている。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、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』³⁾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、降伏応力度についての結果を図-1に示す。既往の研究⁴⁾ともよい一致を見せていることがわかる。

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

一般的な縦リブを有する供試体17体³⁾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。ばらつきとして、材料の機械的性質や寸法(降伏点、弾性係数、断面積等)のばらつき等が存在する。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、降伏応力度以外のばらつきが耐力、変形性能の評価に与える影響は小さいと考え、降伏応力度 σ_y のみのばらつきを考慮して検討を行った。 σ_y の分布形については、今回調査を行った材料試験結果と既往の調査結果⁴⁾とで大きな差はみられなかったため、今回の調査結果に従い、平均値 $M=1.176$ 、標準偏差 $V=0.08354$ の正規分布に従うものと仮定した。乱数の発生は2,000個とし、前述の正規分布に従った。また、評価式は宇佐美ら⁵⁾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荷重、最大荷重時変位を使用した。さらに、既往の研究²⁾で降伏応力度が公称値に比べ高い値をとると塑性率等が低下すると指摘されていたので、 H_{max}/H_y および δ_m/δ_y についても検討をおこなった。本論文では、公称降伏応力度より求めた値には添え字“N”、材料試験結果の降伏応力度より求めた値には添え字“M”で示し、グラフは公称降伏応力度より求めた値により基準化してある。図-2から図-4に供試体No.2における δ_y 、 δ_m/δ_y 、 δ_m のシミュレーション結果を、図-5に17供試体の H_{maxM}/H_{maxN} および δ_{mM}/δ_{mN} の平均値を示す。降伏応力度のばらつきを考慮した場合の塑性率 $(\delta_m/\delta_y)_M$ は、公称降伏応力度より求めた塑性率 $(\delta_m/\delta_y)_N$ より小さくなっているが、降伏時変位 δ_{yM} の増加を受け最大荷重時変位 δ_{mM} は公称降伏応力度より求めた最大荷重時変位 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、既往の研究に指摘されるように、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。

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 17供試体の H_{maxM} および δ_{mM} の平均値

$$\frac{H_{max}}{H_y} = \frac{0.10}{(R_R \lambda \lambda'_s)^{0.5}} + 1.06 \dots (1)$$

$$\frac{\delta_m}{\delta_y} = \frac{0.22}{R_R \sqrt{\lambda \lambda'_s}} + 1.20 \dots (2)$$

H_{max} : 最大荷重
 H_y : 降伏荷重
 δ_m : 最大荷重時変位
 δ_y : 降伏荷重時変位

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、正負交番荷試験結果と比較することによって得られる⁶⁾。検討対象はさきほど同じ17供試体とし、最大荷重および最大荷重時の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。なお、今回は厳密には宇佐美らの式の適用範囲外の供試体についても比較を行っており、結果の図には凡例を変えて示してある。ただし、これらの供試体については、次の5で検討する評価式のばらつきを考慮する際には標本から除外してある。対象範囲の供試体において、耐力評価式については、平均値が-0.0437、標準偏差0.05062となり、変形性能評価式については、平均値が-0.0276、標準偏差0.10689となった。結果を図-6、図-7に示す。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。

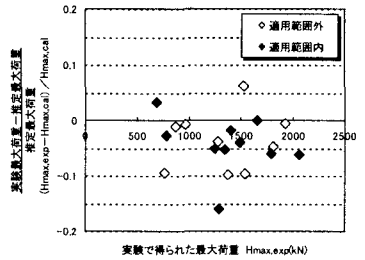


図-6 耐力評価式の精度

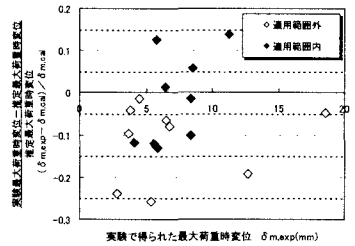


図-7 変形性能評価式の精度

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

文献7にある鋼製橋脚(P1R)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最大荷重 H_{max}^P 、最大荷重時変位 δ_m^P をそれぞれ算出した。

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

H_{maxM} 、 δ_{mM} : 図-2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-0.0437、標準偏差0.05062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-0.0276、標準偏差0.10689の正規分布に従うと仮定して算出する値

なお、乱数発生数が100個と少なかったため、降伏応力度 σ_y の決定に当たっては各100個の σ_y の乱数を20組発生させ、その中から、3で用いた2000個の乱数の分布形に最も近い分布形を示すものを選び用いた。結果を図-8、図-9に示す。この図より、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。

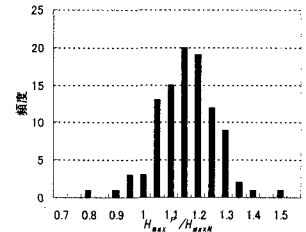


図-8 最大荷重 H_{max} の分布

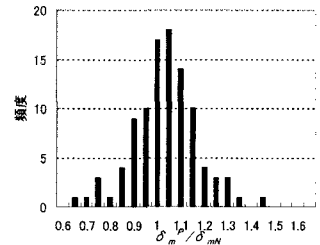


図-9 最大荷重時変位 δ_m の分布

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 $(\delta_m/\delta_y)_M$ の減少は相殺されるので、結果として、最大荷重 H_{maxM} または最大荷重時の変位 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(鋼橋)編 1996.12. 2) Yushi Fukumoto; Reduction of structural ductility factor due to variability of steel properties, Engineering Structures, No.22, pp123-127, 2000. 3) 建設省土木研究所: 道路橋の地震被害軽減対策法に関する共同研究報告(1)~(4)、(総論編, 1997A~1999.3. 4) 青木 博文, 能沢 正樹: 構造計算における材料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, 日本建築学会学術講演集, 昭和15年9月. 5) ① 土木学会鋼構造委員会 ② 日本鋼構造協会近代土木鋼構造の特別委員会: 鋼構造の耐震設計用ベンチマークと耐震設計の高度化(6) 尾立 幸郎, 運上 茂樹: じん性鋼材をアライメント鋼コンクリート橋脚に適用した性能面 構造工學論文集, vol.46, pp777-782, 2003. 7) 建設省土木研究所: 鋼製橋脚のフレキシブル地震応答実験土木研究所報告第3583号平成11年3月