

地震動の再現期間と変動が鋼製ラーメン橋脚の 部分係数に与える影響

北原武嗣¹・梶田幸秀²・岸祐介³

¹正会員 博(工) 関東学院大学教授 工学部社会環境システム学科 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦東1-50-1)

²正会員 博(工) 九州大学大学院准教授 工学研究院社会基盤部門 (〒819-0395 福岡市西区元岡744)

³正会員 博(工) 関東学院大学助手 工学部社会環境システム学科 (〒236-8501 横浜市金沢区六浦東1-50-1)

1. 序論

わが国では、これまで土木構造物の設計においては許容応力度設計法を基本としてきたが、欧米の一部の国では限界状態設計法への移行が既に行われている。また、ISO2394（構造物の信頼性に関する一般原則）¹⁾にみられるように、世界的には性能照査型設計法への移行が進められており、わが国においても近い将来、性能設計への移行を見据えた設計基準への取り組み²⁾も報告がなされている。

許容応力度設計法は、確率論的に性格の異なる荷重に対して同一の安全率を用いて決定論的に設計を行うなどの問題点を孕んでいる。これらは、作用する荷重や構造物の強度に対して、統計量に基づく信頼性理論を用いた設計法を適用することが考えられる。しかし、実設計において一般技術者が設計する際、複雑な確率計算を伴うのは困難である。そのため、できるだけ簡便な設計式で構造物の設計が可能であることが求められる。そこで、ISO2394（構造物の信頼性に関する一般原則）¹⁾の付属書にも位置づけられた部分安全係数設計法や限界状態設計法が、標準的な設計法になり得ると考えられる。

部分係数を用いた構造物の設計では、荷重や構造物耐力のばらつきが部分係数に大きく影響する。特に地震時の安全性に対する設計では、構造物に作用する地震動の影響が大きいことが一般的に知られている。そのため、地震荷重の大きさや、その変動が部分係数に与える影響を把握しておくことが重要な課題である。

構造物の地震時安全性を検討する際の地震荷重の設定方法として、シナリオ地震による方法や確率論的地震ハザードにより評価する手法などがある³⁾。

ここでは、信頼性設計による設計手法を前提とすることとし、地震荷重も確率論的に評価し、地震荷重の再現期間と部分係数の関係を検討することを試みるものとした。

著者らは、文献 4)において日本の 5 都市を対象として、地震荷重の再現期間と部分係数の関係をすでに検討しているが、地震荷重の変動はすべての都市で一律と設定していた。そこで本研究では、文献 4)と同様の 5 都市を対象として、「地震ハザードステーション J-SHIS」⁵⁾を参考に各都市における地震荷重の再現期待値に対する変動係数を個別に設定し検討を行うものとした。

具体的には、鋼製ラーメン橋脚の地震時における局部座屈に対する安全性を検討対象とした。目標信頼性指標や最適な部分係数の設定手法は、文献6)、7)の手法を用いるものとした。文献6)、7)の基本的な考え方は、AFOSM 法⁸⁾を用いて部分係数の一次設定値を求め、初期値の周辺に複数の部分係数の組を設けて各組に対して設計を実施し、目標信頼性指標を下回る設計例と安全すぎる設計例が極力少なくなる部分係数値を決定するものである。

2. 対象構造物および構造解析手法

本研究では、図-1に示すような都市高速高架橋で用いられる鋼製一層門型ラーメン橋脚を検討対象とした。橋脚の形状に関しては、中井らによる既設構造物の調査結果⁹⁾より決定した。支間長は40mとして、橋脚高さおよび橋脚幅は図-2より、それぞれ5～25m、5～40mの範囲とし、その組合せで35個の鋼製ラーメンの全体形状を設定した。

橋脚の柱部および梁部のフランジ幅は、鋼構造物

標準図集¹⁰⁾を参考に次式より算定した。

(柱部面内フランジ幅) = (支間長) / 20 (1a)
(柱部面外フランジ幅)

= (橋脚幅+橋脚高さ) / 20 (1b)

(梁部面内フランジ幅) = (支間長) / 20 (1c)

(梁部面外フランジ幅) = (橋脚幅) / 20 (1d)

橋脚の材料としては、一般構造用圧延鋼材（JIS G 3101，材質 SS400）を使用するものとした。SS400 材の降伏応力は平均値296N/mm²，変動係数0.08 の正規分布に従うように管理されている¹¹⁾が，本研究では文献11)を参考に，降伏応力が平均値300N/mm²の正規分布に従うものと仮定した。

橋脚柱部の局部座屈応力 σ_{cr} は，道路橋示方書Ⅱ鋼橋編¹²⁾に示される算定式より求めた。また本研究では橋脚の板厚を設計変数とし，骨組構造解析を繰り返すことで最適断面を設計した。

構造解析においては，図-1に示すように梁要素で橋脚をモデル化した。部材端部における境界条件として，はりとは柱は剛結，基礎は6自由度固定とした。荷重としては，死荷重（上部構造重量），地震荷重（ $P_{quake} = \gamma \times \text{上部構造質量} \times \text{最大地震加速度の平均値}$ ）および橋脚自身の慣性力が作用するものとし，地震荷重は橋軸方向と橋軸直角方向の水平2方向に作用させた。なお，橋脚幅の変化による上部構造重量の変化は考慮していない。本来，上部構造重量は重要な設計因子ではあるが，本研究では地震荷重のみを確率量（変動量）として扱った。

上記の荷重載荷による柱頂部と柱底部に作用する軸力と曲げモーメントを断面照査の対象とした。このように設計した橋脚に，死荷重と地震荷重が作用した際に局部座屈が生じないという限界状態を設定し，この限界状態に対して部分係数と信頼性指標の関係を検討することとした。

3. 地震ハザード評価

本研究では，奥村・石川の手法¹³⁾を用いて日本周辺の地震活動をプレート境界，活断層およびランダム地震の3種類に区分した。表-1に震源モデルの概要を示す。また司・翠川¹⁴⁾による最大速度の距離減衰式（式(2)）を採用した。

・プレート境界型

$\log PGV_{b600} = 0.58Mw + 0.0038D - 1.29 - \log(X - 0.0028 \times 10^{0.50Mw}) - 0.002X$ (2a)

・内陸直下型

$\log PGV_{b600} = 0.58Mw + 0.0038D - 1.29 - \log(X - 0.0028 \times 10^{0.50Mw}) - 0.002X$ (2b)

ここで，PGV：最大速度(cm/s)，
Mw：モーメントマグニチュード，
D：震源深さ(km)，
X：断層最短距離(km)。

式(2)により評価される最大速度は，工学的基盤での値となるため，松岡・翠川¹⁵⁾の方法より表層地盤増幅を考慮して，地表面最大速度を求めている。また地震荷重は，震度法として扱っているため最大加速度を算定する必要がある。そこで，最大加速度については文献16)に示されている最大速度と最大加速度の関係式（式(3)）を用いた。

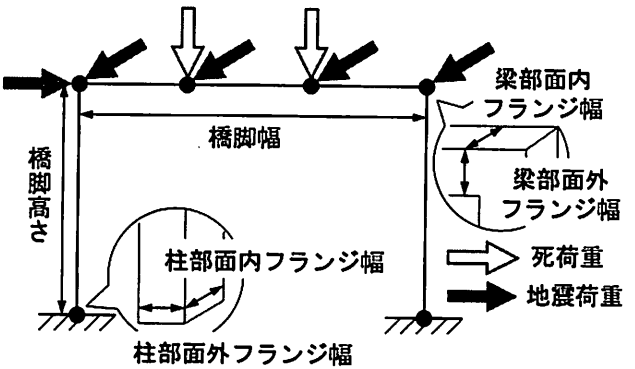


図-1 鋼製一層門型ラーメン橋脚

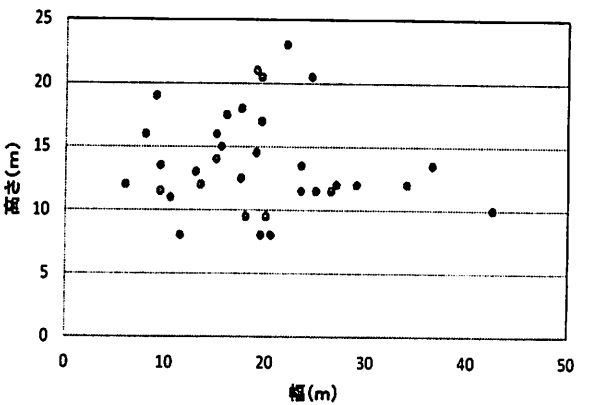


図-2 鋼製ラーメン橋脚の高さと幅の分布⁹⁾

表-1 震源モデル

震源タイプ	プレート境界地震	活断層	ランダム震源域
規模	一様分布	固有	指数分布 (G-R 式)
設定根拠	震源記録	調査記録 ^{17),18)}	地震地体構造 ¹⁹⁾
発生位置	固定	固定	ランダム
発生時系列	再生過程 ²⁰⁾	再生過程 ²⁰⁾	定常ポアソン過程

$$A_{max} = V_{max} \cdot (7/T_g) \quad (3)$$

ここに、 A_{max} ：最大加速度、 V_{max} ：最大速度、 T_g ：地盤の卓越周期。

なお、厳密には構造物による応答の増幅も考慮すべきであるが、本研究では構造物による応答加速度の増幅は無視し、地表面最大加速度、質量、部分係数 γ の積を地震荷重とした。

以上の手法を用いて、国内5都市（札幌、仙台、東京、大阪、福岡）の地震ハザードを求めた。ただし、式(3)における表層地盤での増幅については、いずれの都市においてもⅡ種地盤相当と定義し、地盤の卓越周期を0.5秒として算定を行った。

土木構造物の一般的な耐用年数を50年と考え、再現期間50年を標準とした。その半分および倍の再現期間を考慮して25年、50年、100年の3ケースを設定し、再現期間に対する部分係数の違いを評価した。

地震荷重のばらつきに関しては、「地震ハザードステーション J-SHIS」⁵⁾により各地の変動係数を求めた。J-SHISでは主要活断層帯の地震の長期評価において、平均活動間隔および最新活動時期に最も起こりやすいと考えられるモデルを採用し、それらの中央値をとって発生確率を計算する場合を「平均ケース」、各断層帯について発生確率が最大になるように最も古い値を採用した計算結果を「最大ケース」と定義している。この平均ケースと最大ケースから、各地の再現期待値の変動係数を求めた。

以上、評価した地震荷重の再現期待値と変動係数(C.O.V.)を表-2に示す。仙台、東京および大阪では50年期待値で150～180cm/s²程度の最大加速度であり、札幌ではその2/3、福岡では1/3程度の最大値となっている。

また、仙台、東京、大阪の変動係数は10%以下の小さな値であるが、札幌や福岡の変動係数は大きくなっており、特に福岡では100%を超える値となっている。仙台、東京、大阪では海溝型地震による影響が大きい、札幌や福岡では、主要活断層帯がハザードに与える影響が大きいために変動係数がおおきく評価されていると考えられる。

4. 検討結果とその考察

本研究では、構造物の供用期間を50年として50年の間に座屈が生じる確率が50%以下となるような状況を考慮して目標信頼性指標 β_T を設定した。このとき、1年間の破壊確率は0.0138となり目標信頼性

指標 β_T は2.2となる。

ただし、ここでの破壊確率は、地震の発生を前提とした条件付き破壊確率であり、地震の発生確率自体は考慮していない。本研究では、地震発生を前提とした信頼性指標 β を用いて、部分係数と再現期間および各地の再現期待値との関係を検討した。信頼性指標 β の算定には次式を用いた。

$$\varphi \cdot R_n \geq \gamma \cdot S_n \quad (4)$$

$$\beta = \frac{\ln(\mu_R/\mu_S)}{\sqrt{V_R^2 + V_S^2}} \quad (5)$$

ここで、 φ ：耐力係数、 γ ：荷重係数

R_n ：耐力の公称値、 S_n ：荷重の公称値、

μ_R ：耐力の平均値、 V_R ：耐力の変動係数、

μ_S ：荷重の平均値、 V_S ：荷重の変動係数。

35ケースの鋼製ラーメン橋脚の地震時の信頼性指標 β を求めることにより、これらの信頼性が上記のように設定した目標信頼性指標 β_T を下回る設計例と安全すぎる設計例が極力少なくなるように、逐次的に最適な部分係数を求めている。詳細な算定手法は、文献6)、7)を参照されたい。

表-2 各地の最大加速度の再現期待値（単位：cm/s²）

再現期間	25年	50年	100年	C.O.V.
札幌	75.3	106.5	144.1	36%
仙台	126.2	167.9	217.7	1%
東京	128.8	177.1	236.9	1%
大阪	85.2	156.4	276.8	7%
福岡	38.8	60.1	87.3	175%

表-3 各地の最適な部分係数

	再現期間	φ	γ	γ/φ
札幌	25年	0.6	2.2	3.67
	50年	0.7	2.2	3.14
	100年	0.8	2.2	2.75
仙台	25年	0.85	1.0	1.18
	50年	0.95	1.3	1.37
	100年	0.95	1.3	1.37
東京	25年	0.9	1.0	1.11
	50年	0.95	1.2	1.26
	100年	1.0	1.4	1.4
大阪	25年	0.85	1.2	1.41
	50年	0.95	1.4	1.47
	100年	0.85	1.4	1.64
福岡	25年	0.2	5.4	27.0
	50年	0.3	5.4	18.0
	100年	0.3	4.6	15.3

表-3に、国内5都市における地震危険度を考慮して耐震信頼性評価を試みた場合の、各都市での最適な部分係数の組み合わせを再現期間ごとにまとめた。

耐力係数 ϕ の値に関しては、全般的に再現期間の長い方が大きな値となる傾向がある一方、荷重係数 γ に関しては各地での傾向が異なった。札幌では何れの再現期間においても値が一定となり、福岡では再現期間が長くなるほど荷重係数 γ が小さくなる傾向にある。他の都市では、福岡とは逆に再現期間が長くなるほど荷重係数 γ が大きくなっている。

安全率 γ/ϕ に着目すると、他の都市と比べて札幌では 1.7~3.3 倍、福岡では 9~24 倍ほど大きな値となっている。これは、札幌と福岡における地震荷重の変動が他の 3 都市と比べて大きいことが影響していると考えられる。また再現期間との関係性としては、札幌と福岡では再現期間が長いほど安全率 γ/ϕ は小さな値になるのに対し、他の都市では再現期間が長いほうが大きな値となっている。仙台、東京、大阪の 3 都市では変動係数が 10%未満であるのに対し、札幌と福岡は 30%以上のばらつきがあり、このばらつきの大きさが部分係数の再現期間との関係性に影響しているものと考えられる。

これらの結果より、目標信頼性指標 β_T に対する最適な部分係数の設定においては、地域特性として各地の地震荷重の変動を適切に考慮することが重要であるといえる。

5. 結論

札幌、仙台、東京、大阪および福岡の5都市において、各地の地震荷重の再現期間と変動を考慮して、鋼製ラーメン橋脚の耐震信頼性評価を試みた。本研究で確認できたことを以下に記す。

全般的に再現期間が長い方が耐力係数 ϕ の値が大きくなる傾向がある。一方、荷重係数 γ に関しては、地震荷重の変動係数が 10%未満の都市では再現期間の長い方が大きな値となるが、変動係数が 30%以上の都市では荷重係数の変化は顕著ではなく、逆に再現期間が長い方が小さな値となる場合もあった。すなわち、各地の地震荷重の変動を考慮することで、目標信頼性指標 β_T に対する最適な部分係数の設定も異なると考えられる。地域特性として適切な地震荷重の変動を考慮することが重要であるといえる。

本研究では、地震の発生確率に関しては考慮していない。地震の発生確率は構造物の破壊確率に大きな影響を与えるため、これらの影響を含めた最適な

部分係数の設定と構造物の安全性の検討を行うことが今後の課題である。

参考文献

- 1) ISO : ISO2394 – General principles on reliability for structures -, 1998.
- 2) (社)土木学会：包括設計コード（案）性能設計概念に基づいた構造物設計コード作成のための原則・指針と用語（第1版），2003.
- 3) (社)土木学会構造工学委員会：性能設計における土木構造物に対する作用の指針，土木学会，2007.
- 4) 北原武嗣，梶田幸秀，岸祐介：鋼製ラーメン橋脚の耐震信頼性評価に用いる部分係数と再現期間に関する検討，土木学会論文集F6（安全問題），Vol.67, No.2, pp.101-106, 2011
- 5) 独立行政法人 防災技術研究所：地震ハザードステーション J-SHIS, <http://www.j-shis.bosai.go.jp/>
- 6) 梶田幸秀，高橋拓大，園田佳巨，香月智：鋼製橋脚の座屈設計における部分安全係数決定法の提案，構造工学論文集，Vol.53A, pp.227-234, 2007.
- 7) 梶田幸秀，高橋拓大，園田佳巨，香月智：大地震時における鋼製橋脚の部分安全係数決定法の一提案，JCOSSAR2007論文集，Vol.6, pp.771-778, 2007.
- 8) 星谷勝，石井清：構造物の信頼性設計法，鹿島出版会，1986.
- 9) 中井博，河井章好，吉川紀，北田俊行，酒造敏廣：鋼製ラーメン橋脚の実績調査（上），橋梁と基礎，Vol.16, No.6, pp.35-40, 1982.
- 10) 阪神高速道路公団：鋼構造物標準図集，1991.
- 11) (社)土木学会鋼構造委員会：鋼構造物の終局強度と設計，土木学会，1994.
- 12) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋編，2002.
- 13) 奥村俊彦，石川裕：最新の活断層調査を反映した地震ハザード評価モデル，土木学会第55回年次学術講演会概要集，第1部(B)，pp.764-765, 2000.
- 14) 司宏俊，翠川三郎：断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式，日本建築学会構造系論文集，No.523, pp.63-70, 1999.
- 15) 松岡昌志，翠川三郎：国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング，日本建築学会第22回地盤震動シンポジウム，pp.23-24, 1994.
- 16) 沢田努，平尾潔，山本英史，川手訓：地震動の最大振幅比($a/v_{ad}/v^2$)とスペクトル特性及び継続時間の関係，第21回地震工学研究発表会講演概要，pp.41-44, 1991
- 17) 松田時彦：最大地震規模による日本列島の地震分布帯，地震研究所彙報，Vol.65, pp.289-319, 1990.
- 18) 松田時彦：陸上活断層の最新活動期の表，活断層研究，Vol.13, pp.1-3, 1995.
- 19) 萩原尊禮 編：日本列島の地震—地震工学と地震地体構造—，鹿島出版会，1991.
- 20) 奥村俊彦，石川裕，亀田弘行：活断層の活動履歴に関する情報を考慮した地震危険度評価，第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp.49-56, 1997.