

コンクリート道路橋における部分係数設計法の適用に向けた抵抗係数に関する一検討

国立研究開発法人 土木研究所 正会員○林 克弘 正会員 和田 圭仙 正会員 石田 雅博

1. はじめに

部分係数設計法¹⁾²⁾(以下、部分係数法と称す)の導入に向け、抵抗係数の設定方法の検討が進められている。本稿は、そのうちPC箱桁橋の曲げ耐力に対する抵抗係数の設定、および現行の許容応力度設計法³⁾(以下、許容応力度法と称す)との対比を行った検討結果について報告するものである。

2. 検討概要

ばらつきを考慮したモンテカルロシミュレーション法(厳密解法)⁴⁾を用いて、抵抗側の変動要因を材料強度や施工にかかわる不確実性の耐力分布として試算し、既往の検討⁵⁾で用いられたFOSM法(近似解法)⁴⁾との対比を行い抵抗係数の妥当性を検証した。作用側の変動については5%フラクタイルで想定された外力から断面力を算定し、耐力分布との関係から信頼性設計法に基づき設定されたもの⁶⁾を用いた。

1) 検討対象と条件：表-1に示すPC箱桁橋5橋を対象とし、表-2の使用材料のもと、表-3示した変動要因を与えた。今回、部材の終局曲げに対し許容応力度に相当する抵抗係数を検討すること(信頼性の確認)が目的であることから、常時の照査と構造細目を無視し、許容応力度法での終局荷重の組合せによる断面力にて部材断面を決定した。終局曲げ耐力の算出は、道路橋示方書Ⅲ編に基づき実施した。対象橋梁の構造一般図を図-1に示す。

2) 許容応力度法と部分係数法の作用：許容応力度法では終局荷重時(1.3D+2.5Lほか、D:死荷重、L:活荷重)の断面力を用い部材の破壊安全性を照査しているが、部分係数法ではこのような荷重を用いるのではなく終局耐力に抵抗係数を考慮した照査となる。ここで、許容応力度法の終局荷重の1.3D+2.5Lは死荷重の変動係数10%、活荷重の変動係数を50%と考え、3σのバラつき(σは標準偏差、0.1%フラクタイル)を考えたものと解釈でき、1.7D+1.7Lは常時で設計したものに対し安全率γ=1.7(常時の鋼材の降伏応力度に対する安全率相当)が確保されたか検証する位置づけである⁷⁾。なお、1.0D+1.3Lは死荷重と活荷重による断面力が異符号となる場合に配慮されたものであり、PC不静定構造における終局荷重の組合せにおいてはプレストレス力、クリープ、乾燥収縮による不静定力に係わるものは係数を1.0として加える必要がある。両者の断面力を比較整理すると、架設系ほかの影響が大きいもの(張出架設の中間支点や支間割の関係で特異な応力状態となる箇所)を除き概ね部分係数法の値を1.7倍したものの相当が許容応力度法の値となった(図-2)。

表-1 対象橋梁

記号	形式	支間割	施工方法
f40	PC3径間連続箱桁	3@40m	支保工
f80	PC3径間連続箱桁	40+80+40m	張出
f120	PC3径間連続箱桁	80+120+80m	張出
g80	PC3径間連続ラーメン箱桁	40+80+40m	張出
g120	PC3径間連続ラーメン箱桁	80+120+80m	張出

表-2 使用材料

コンクリートの設計基準強度(N/mm ²)	鉄筋(JIS G 3536)SD345	PC鋼材(JIS G 3112)SWPR7, SWPR19
40		

表-3 材料・施工による変動要因

項目	平均値	変動
コンクリート強度	設計基準強度の1.2倍	15%
ヤング係数	道示の値	10%
乾燥収縮	道示の値の1.60倍	50%
クリープ	道示の値の0.95倍	25%
有効高	設計値	±10mm
部材外寸(全幅・全高)	設計値	±30mm
PC鋼材の引張強度	規格値の1.03倍	1%
PC鋼材のヤング係数	規格値の0.999倍	4.5%
PC鋼材の見かけのリラクゼーション率	規格値の1.03倍	10%

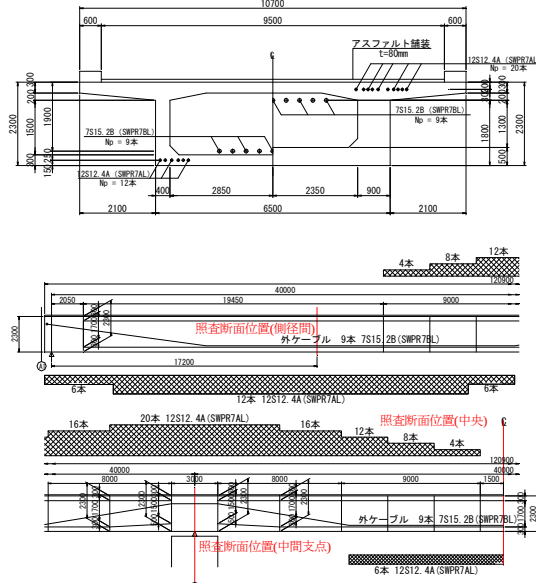


図-1 構造一般図 (f 40)

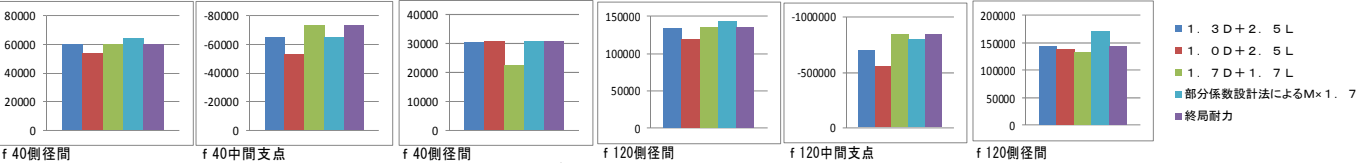


図-2 発生終局曲げモーメントと耐力の比較 (f40, f120) 単位：kNm

キーワード PC箱桁橋、終局曲げ耐力、モンテカルロシミュレーション法、FOSM法、信頼性指標

連絡先 〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 TEL：029-879-6773

3. 検討結果

図-3 に f 40 側径間部における検討結果を示す。

ここで、信頼性指標 β 、抵抗係数 ϕ は、次式で与えられる。

$$\beta = \frac{\mu_z}{\sigma_z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \cdots \text{式(1)} \quad , \quad \phi \cdot R_d \geq S_d \cdots \text{式(2)}$$

ここに、 μ_R ：断面耐力 R の平均値

σ_R ：断面耐力 R の標準偏差

μ_S ：荷重による断面力 S の平均値

σ_S ：荷重による断面力 S の標準偏差

R_d ：設計耐力、 S_d ：設計断面力

許容応力度法における破壊安全率は、作用側と抵抗側の 5% フラクタイル値 (1.64σ 考慮) に対し、 1.64 の安全余裕が確保されている。また、図中に破線で、抵抗側の経年劣化として床版疲労（上床版上面のかぶり部が劣化し 10% 厚減、コンクリート強度が 90% に減少したと想定）と主鋼材腐食（断面積が 10% 減少したと想定）、および作用側の増加（バイアスと変動の最大を想定）を示した。この場合の信頼性指標は $\beta \approx 3$ で、0.14% フラクタイル相当が確保されており、前述した許容応力度法における終局荷重の考え方と同等となった。

ほかの形式と部位の信頼性指標 β は図-4 のとおりであり、張出架設の f120 と f80 中間支点、および支間割パランスの関係で特異な応力状態となる g80 支間中央と f80 側径間を除いて 3 程度を中心に 2~8 の間に分布している。

つぎに、モンテカルロシミュレーション法（10 万回試行）と FOSM 法の対比を行った結果を示す。信頼性指標 β は図-5(a) に示すとおり両者ほぼ同等のとなっており、近似解法である FOSM 法を用いて検討しても問題がない範囲であることがわかった。また、許容応力度法に相当する安全率は、図-5(b) に示すとおり 1.7 程度を中心に 1.3~2.3 に分布となった。

4. まとめ

許容応力度法における鋼材の常時（死活荷重時）の許容応力度は、その降伏応力度に対し 40% 程度の安全率が考慮されており、さらに曲げにおいてはつり合い鋼材量の 75% 以下で断面を決定していることから、破壊耐力は概ね鋼材の安全率 1.7 ($\approx 1 \div (1 - 0.4)$) が確保されている。このため、許容応力度法に相当する抵抗係数として $\phi = 0.60$ ($\approx 1/1.7$) を用いれば、時間依存による劣化損傷（耐力減少）や荷重増（作用増加）を受けた場合においても信頼性指標 β が 2~3 以上（特異箇所を除く）となり、破壊確率が 2.3~0.1% 以下であることが確認できた。

なお、部分係数法でも耐久性の照査のために、応力度を直接的に規定する制限値（たとえば永続作用に対しコンクリートの引張応力をゼロ、PC 鋼材の引張応力 $0.6\sigma_{pu}$ ）や構造細目を設けるため、本検討で信頼性指標 β が 3 未満となった断面にも余裕ができることとなる。このため、別途検討が進められている実橋に対する部分係数法での試設計の結果を踏まえ、さらなるキャリブレーションを実施したうえ、適切な抵抗係数を設定していく必要がある。

【参考文献】 1) 鈴木 著：構造物信頼性設計法の基礎、2010.12、森北出版 2) 玉越・白戸：部分係数と限界状態設計基準の性能規定化、2015.1、土木施工 vol.56 No.1 3) 道路橋示方書・同解説 I、III、2012.3、日本道路協会 4) 星谷・石井 著：構造物の信頼性設計法、1986.5、鹿島出版会 5) 和田・木村ほか：コンクリート道路橋における信頼性設計の適用に関する基礎的検討、2013、土木技術資料 55-9 6) 間瀬・玉越・生田：部分係数設計法に基づく荷重係数の設定方法、H21 国土交通省国土技術研究発表論文 7) 示方書小委員会コンクリート橋分科会：コンクリート部材の破壊安全度の検討、1976.5、道路、日本道路協会

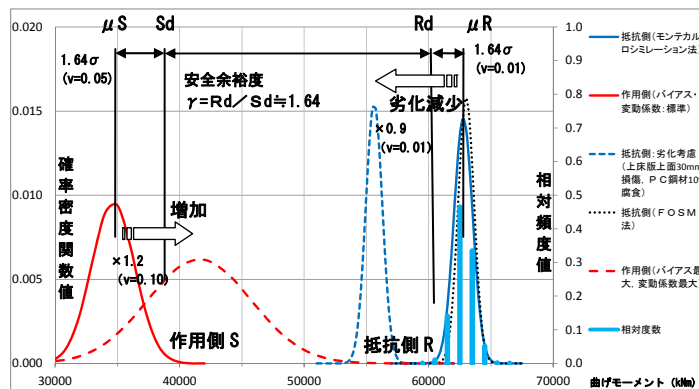


図-3 抵抗側と作用側のばらつき（f 40 側径間）

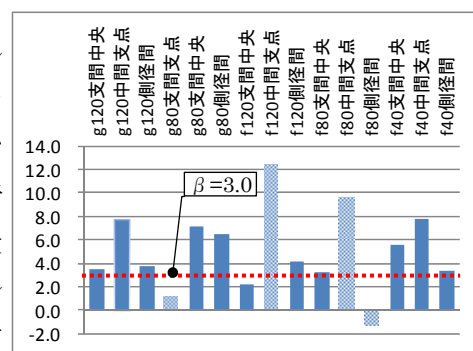
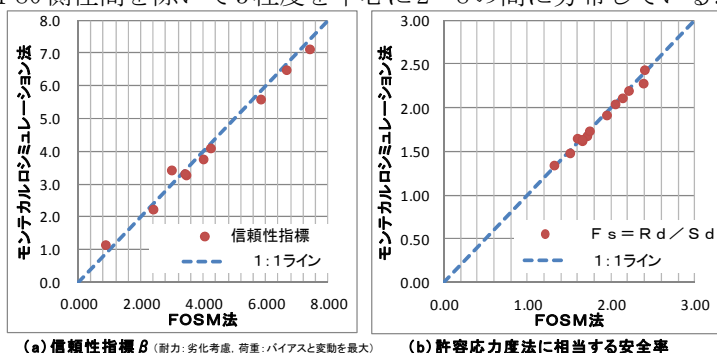


図-4 信頼性指標 β



(a) 信頼性指標 β (耐力：劣化考慮、荷重：バイアスと変動を最大) (b) 許容応力度法に相当する安全率

図-5 モンテカルロシミュレーションと FOSM 法の結果比較