

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

和田圭仙* 木村嘉富** 宮田弘和*** 高橋敏樹**** 松沢政和*****

1. はじめに

平成14年の道路橋示方書（以下、「道示」という。）改定で、それまでの仕様規定から性能照査型規定への転換を目指した示方書体系に改定されるとともに、性能規定化するにあたって橋に要求される性能と橋を設計するうえで留意しなければならない基本的事項が、設計の基本理念として明示された。平成24年の道示改定においてもこの理念は堅持されており、現在、部分係数設計法の導入と、さらなる性能規定化に向けた検討が進められている。具体的には、橋に対する要求性能と部分係数設計法による性能照査の体系化を図るとともに、部材等が適当な確からしさを確保し性能を満足する状態であることを照査するための照査式について、ある設計供用期間において作用側・抵抗側それぞれの荷重や材料強度等のばらつきを考慮した部分安全係数の試算と

影響評価を行っている。

上記を背景として、本検討ではコンクリート道路橋の代表的な橋梁形式や支間長を対象に、まず、照査項目ごとに抵抗側のばらつき要因を、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た。次に作用側で想定する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^{*1)}に基づき安全性を検証した。

2. 現行設計に対する安全余裕度の評価

図-1に検討の流れを示す。現行設計解が有する安全余裕と橋梁形式や部位ごとの耐力を評価した上で、一定の安全余裕を確保する条件のもと抵抗係数を算定した。

2.1 試算条件

現橋の信頼性指標の検討では、道示Ⅲ²⁾に従って設計されたコンクリート橋（表-1、図-2）の主方向を対象に、現行基準に従った設計（以下、「現行設計」という。）が有している破壊に対する信頼性指標 β^* の試算を行った。

照査項目は、①曲げモーメント又は軸方向力が作用する部材の終局荷重作用時における破壊抵抗曲げモーメント（以下、「曲げ耐力」という。）の照査、②せん断力が作用する部材の終局荷重作用時における斜引張破壊（以下、「斜引張破壊耐力（せん断）」という。）に対する照査、③せん断によるウェブコンクリートの圧壊（以下、「ウェブ圧壊耐力」という。）に対する照査、並びに④ねじりモーメントが作用する部材の終局荷重作用時における斜引張破壊（以下、「斜引張破壊耐力（ねじり）」という。）に対する照査である。

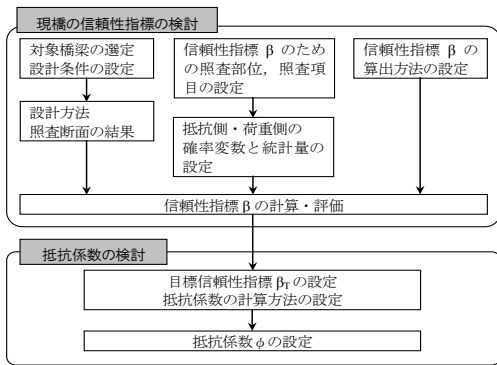


図-1 検討の流れ

表-1 検討対象の橋梁と支間長

橋梁形式	単純	単純	連結	連続	
	中空床版 (a:RC,b: PRC,c:PC)	PCポステン T桁	PC箱桁	PCラーメン 箱桁	
支間長	20m	a20, a20N ^(注6) , b20, c20, c20, c20N ^(注6)	d20	e20 ^(注1)	-
	30m	-	-	e30 ^(注2)	-
	40m	-	-	e40 ^(注3)	f40 ^(注3)
	80m	-	-	-	f80 ^(注4) , g80 ^(注4)
	120m	-	-	-	f80N ^{(注4)(注6)} , g80N ^{(注4)(注6)}
					f120 ^(注5) , g120 ^(注5)

注1) 支間割は3@20m、注2) 支間割は3@30m、注3) 支間割は3@40m、注4) 支間割は40m+80m+40m、注5) 支間割は80m+120m+80m、注6) “N”は、ねじりの検討（交角5°、30°）を示す。

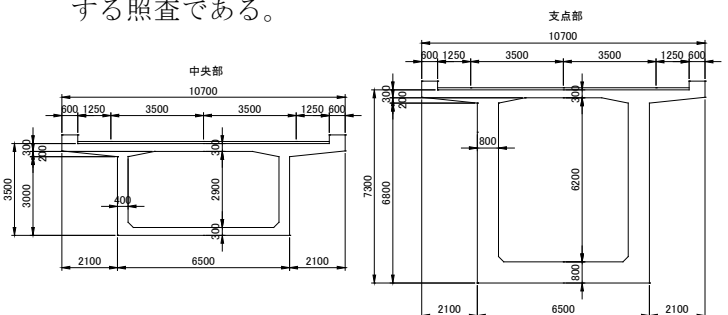


図-2 検討対象橋梁の代表断面図の例
(PC連続箱桁橋、PC連続ラーメン箱桁橋(f120,g120))

Fundamental study on application of reliability design method for concrete highway bridges

*土木用語解説：信頼性設計法、信頼性指標 β

表-2 検討に用いた荷重および荷重組合せの一例

項目	分類	略称	荷重組合せ
現行	設計荷重時	死荷重時	1.0D
		設計荷重時	1.0D+1.0L
		温度時	1.0D+1.0L+1.0T
	終局荷重時	—	1.3D+2.5L
		—	1.0D+2.5L
		—	1.7D+1.7L
部分係数版 (試算用荷重組合せ)	永続作用時	死荷重時	1.0D
		—	1.0D+1.0T
	変動作用時	設計荷重時	1.0D+1.0L
		温度時	1.0D+1.0T
		—	1.0D+1.0L+0.8T
		地震時	1.0D+0.85EQ
—	1.0D+0.5T+0.85EQ		

注)D:死荷重、L:活荷重、T:温度変化の影響、EQ:地震の影響

照査部位は、各橋種において断面力が卓越する箇所（支間中央、支点部、1/4支間等）とした。検討に用いた荷重は、表-2に示すように永続作用時および変動作用時それぞれ、現行道示の設計荷重作用時の荷重規模と大きくかい離しない部分係数書式の荷重係数と荷重組合せ（以下、「試算用荷重組合せ」という。）である。

表-3に考慮した不確定要因と基本統計量を示す。各変動要因の平均値および変動係数は、既往の調査結果等に基づき設定した。なお、曲げ耐力や斜引張破壊耐力などの各耐力に対する信頼性指標を把握するために、設計荷重時の許容応力度の照査を行わず、終局荷重時の断面力相当の耐力を有するよう部材厚や鋼材配置等の細目を決定した。

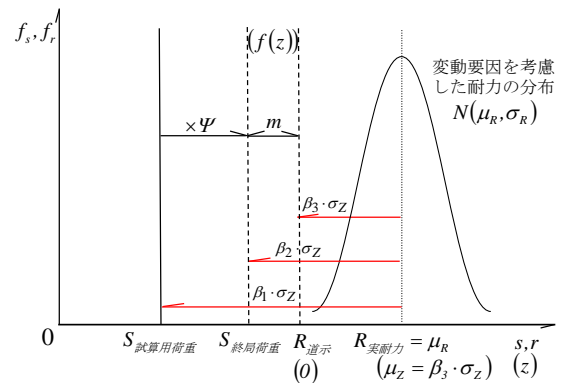
2.2 信頼性指標の算出方法

信頼性指標 β の解析方法として各種の方法が提案されているが、曲げ耐力と斜引張破壊耐力（ねじり）は汎用性を考慮してFOSM法を用いた。なお、斜引張破壊耐力（せん断）とウェブ圧壊耐力（せん断）はモンテカルロシミュレーションを用いた。

本検討に用いた信頼性指標の概念図を図-3に示す。ここで信頼性指標とは、現行設計が試算用荷重組合せによる断面力 ($S_{\text{試算用荷重}}$) に対して有するものであり、図中の β_1 に相当する。しかしながらこの β_1 は、終局荷重作用時の荷重組合せと試算用荷重組合せにより発生する断面力の相違や、構造細目等によって生じる耐力の余裕に関する安全余裕も含まれており、信頼性指標が大きく破壊確率が小さい。そこで、部分安全係数として考慮すべき安全余裕と、上記各要因が信頼性に及ぼす影響の程度を把握するため、上記の β_1 に加え、現行終局荷重による断面力を荷重値とした β_2 、および構造細目等による余裕量を加えた断面力を荷重値とした β_3 に細分化す

表-3 考慮した材料・施工による不確定要因

項目	平均値	変動係数
コンクリート強度	設計基準強度の 1.2 倍	15%
ヤング係数	道示の通り	10%
乾燥収縮・クリープ	道示の通り	17%
有効高	設計値	10mm
PC 鋼材の引張強度	規格値の 1.03 倍	1%
鉄筋の降伏強度	規格値の 1.14 倍	4%



ここに、 $S_{\text{試算用荷重}}$ 、 $S_{\text{終局荷重}}$ ：試算用荷重組合せ、現行の終局荷重作用時に算定される断面力のうち、それぞれ最大のもの
 $R_{\text{道示}}$ ：道示Ⅲに従って設計された場合の断面耐力
 $R_{\text{実耐力}}$ ：表-3に示す各変動要因を考慮した場合の耐力分布
 $m (= R_{\text{道示}} - S_{\text{終局荷重}})$ ：構造細目等による耐力の余裕量

図-3 本検討における信頼性指標の概念図

ることとした。

なお、本検討においてコードキャリブレーションの観点から信頼性指標は β_3 を用いて試算した。つまり、現行終局荷重と試算用荷重の荷重レベル差に起因する両者の断面力比は修正係数 Ψ として、算出された抵抗係数を除することにより考慮した。

図-3より、信頼性指標 β_3 は式(1)で表わされる。

$$\beta_3 = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - R_{\text{道示}}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} = \frac{\mu_R - S_{\text{終局荷重}} - m}{\sqrt{\sigma_R^2 + 0}} = \frac{R_{\text{道示}} - \Psi \cdot S_{\text{試算用荷重}} - m}{\sqrt{\sigma_R^2 + 0}} \quad (1)$$

($\sigma_S = 0$: 荷重側を確定値としたため)

2.3 目標信頼性指標 β_T と修正係数 Ψ の算出

目標信頼性指標 β_T の設定にあたり、前述のとおり作用体系の見直しに伴う終局荷重組合せと試算用荷重組合せによる断面力比の影響や、構造細目等による余剰耐力分を分類して評価するため、これらの影響を除いた β_3 を目標信頼性指標 β_T とした。なお、断面力比の影響は修正係数 Ψ で考慮し、また構造細目等による余剰耐力 m は実設計で考慮されることから、設計断面力に対して耐力は β_1 相当の安全余裕を有することとなる。

図-4から図-7に、それぞれ曲げ耐力、斜引張破壊耐力（せん断）、ウェブ圧壊耐力、斜引張破壊耐力

(ねじり) の各耐力に対する修正係数 Ψ 及び目標信頼性指標 β_T を示す。なお、斜引張破壊耐力(せん断)は、道示Ⅲおよび道示Ⅴ²⁾の各評価式について信頼性指標を算定した。

修正係数 Ψ は1.6~2.0程度であり、概ね荷重係数比に応じた断面力比となった。なお、斜引張破壊耐力(せん断)の β_T の平均値は、道示Ⅴの評価式より求めた場合は4.23であり、道示Ⅲの2.15より大きな安全余裕を有する。これは、評価式が有する誤差の相違によるものと考えられる。また、ウェブ圧壊耐力の値が0.61と他と比べて小さいが、これは耐力の変動要因のうち、ばらつきの大きいコンクリート強度に起因する「平均せん断応力度

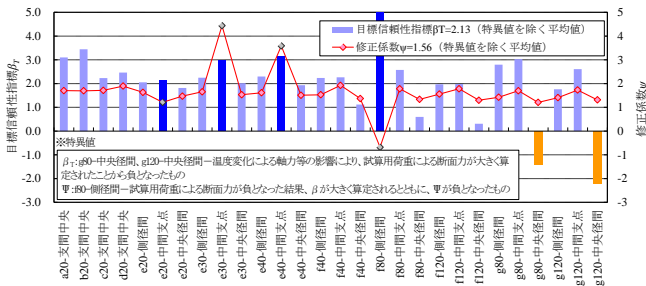


図-4 曲げ耐力の修正係数および目標信頼性指標

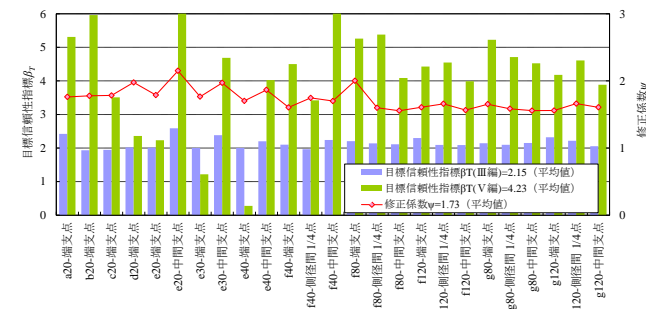


図-5 斜引張破壊耐力(せん断)の修正係数および目標信頼性指標

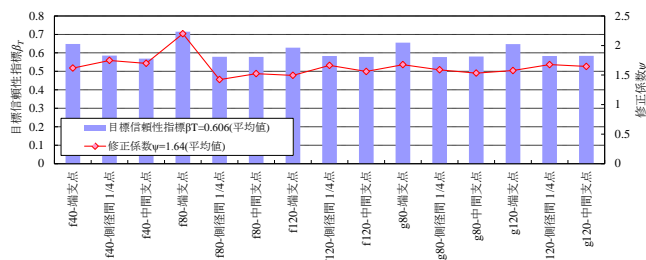


図-6 ウェブ圧壊耐力の修正係数および目標信頼性指標

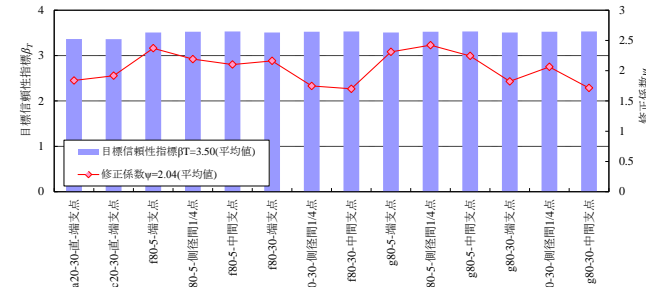


図-7 斜引張破壊耐力(ねじり)の修正係数および目標信頼性指標

の最大値」が支配的であることによると思われる。

なお、実設計においては、修正係数 Ψ による安全余裕を考慮した抵抗係数とすること、一般に部材厚は終局荷重レベルよりも設計荷重レベルで決定することから、信頼性設計導入によりウェブ圧壊に対する安全余裕が他と比べて著しく小さくなることはないと考えられる。

3. 目標信頼性指標に対する抵抗係数の検討

3.1 目標信頼性指標に対する抵抗係数の算定方法

(1) 曲げ耐力、ウェブ圧壊耐力、斜引張破壊耐力(ねじり)の抵抗係数

代表例として曲げ耐力に対する抵抗係数の算出方法を示す。荷重抵抗係数設計法の設計基準式より、荷重項を確定値とすると次式が示される。

$$\phi \cdot R_n \geq S_n \quad (2)$$

ここに、

R_n : 設計示方書によって示される公称強度または耐力

S_n : 設計示方書によって示される各設計荷重から求まる公称荷重作用

ϕ : 抵抗係数

抵抗係数 ϕ^* は、

$$\phi = (1 - \beta_T \cdot V_R) \mu_R / R_n \quad (3)$$

で表わされる。ここに、 β_T は目標信頼性指標、 $V_R = \sigma_R / \mu_R$ は変動係数、 μ_R は耐力平均値、 R_n は公称耐力である。

修正係数 Ψ^M を抵抗係数 ϕ に含めて表現し、修正係数を考慮した抵抗係数 $\phi_a = \phi / \Psi^M$ とすれば、

$$(\phi / \Psi^M) \cdot R_n = \phi_a \cdot R_n \geq S_{n, \text{試験用荷重}} \quad (4)$$

と表され、 ϕ_a が設計に用いる抵抗係数となる。

(2) 斜引張破壊耐力(せん断)の抵抗係数

斜引張破壊に対するせん断耐力である道示Ⅲ式 S_{se} および道示Ⅴ修正式 P_p は、コンクリートが負担できるせん断力 S_c 、斜引張鉄筋が負担できるせん断力 S_s およびPC鋼材の引張力のせん断力作用方向の分力 S_p の和で表される。各成分は、対象としている材料や期待される負担するせん断力の考え方やその分担割合も相違するため、一律の抵抗係数を採用するとそれぞれの影響が明確にならない。そこで、各成分に対応した抵抗係数を設定することとした。基準式は、曲げ耐力と同様に以下で表わされる。

$$\phi_c \cdot R_{nc} + \phi_s \cdot R_{ns} + \phi_p \cdot R_{np} \geq S_n \quad (5)$$

※土木用語解説：抵抗係数 ϕ

ここに、

ϕ_c : コンクリートが負担できるせん断力に対する抵抗係数

ϕ_s : 斜引張鉄筋が負担できるせん断力に対する抵抗係数

ϕ_p : PC鋼材の引張力のせん断力作用方向の分力に対する抵抗係数

α_{Rc} α_{Rs} α_{Rp} : 各成分の感度係数

R_{nc} : コンクリートが負担できるせん断力

R_{ns} : 斜引張鉄筋が負担できるせん断力

R_{np} : PC鋼材の引張力のせん断力作用方向の分力

各抵抗係数は以下のように表わされる。

$$\phi_c = (1 - \beta_T \cdot \alpha_{Rc} \cdot V_{Rc}) \frac{M_{Rc}}{R_{nc}} \quad (6)$$

$$\phi_s = (1 - \beta_T \cdot \alpha_{Rs} \cdot V_{Rs}) \frac{M_{Rs}}{R_{ns}} \quad (7)$$

$$\phi_p = (1 - \beta_T \cdot \alpha_{Rp} \cdot V_{Rp}) \frac{M_{Rp}}{R_{np}} \quad (8)$$

修正係数を抵抗係数に含めて表現し、修正係数を考慮した抵抗係数をそれぞれ $\phi_{ac} = \phi_c / \Psi^S$ 、 $\phi_{as} = \phi_s / \Psi^S$ 、 $\phi_{ap} = \phi_p / \Psi^S$ とすれば、
 $(\phi_c / \Psi^S) \cdot R_{nc} + (\phi_s / \Psi^S) \cdot R_{ns} + (\phi_p / \Psi^S) \cdot R_{np}$ (9)
 $= \phi_{ac} \cdot R_{nc} + \phi_{as} \cdot R_{ns} + \phi_{ap} \cdot R_{np} \geq S_{\text{試算用荷重}}$
 と表せ、これらが設計に用いる抵抗係数となる。

3.2 抵抗係数の算定結果

表-4に修正係数 Ψ を考慮した抵抗係数 ϕ を示す。それぞれの抵抗係数は修正係数で除しているため、概ね0.5~0.6程度と、諸外国のそれと比べると小さい。なお、せん断（斜引張破壊）のⅢ編式の場合のコンクリート分担分 (S_c) の抵抗係数は0.36と、特に小さい。これは、評価式自体が有する誤

表-4 抵抗係数一覧（修正係数 Ψ 考慮）

項目		記号	抵抗係数 ϕ	備考
曲げ耐力		$\phi_{cr} = \phi / \Psi^M$	0.617	$\Psi^M = 1.56$
斜引張破壊耐力(せん断)	Ⅲ編式	S_c	$\phi_{c,III} = \phi_c / \Psi^S$	0.361
		S_s	$\phi_{s,III} = \phi_s / \Psi^S$	0.646
		S_p	$\phi_{p,III} = \phi_p / \Psi^S$	0.577
	Ⅰ編式	S_c	$\phi_{c,V} = \phi_c / \Psi^S$	0.565
		S_s	$\phi_{s,V} = \phi_s / \Psi^S$	0.608
		S_p	$\phi_{p,V} = \phi_p / \Psi^S$	0.573
ウェブ圧壊耐力	S_{uc}	$\phi_{ocr} = \phi_c / \Psi^C$	0.607	$\Psi^C = 1.64$
	S_p	$\phi_{opr} = \phi_c / \Psi^C$	0.610	
斜引張破壊耐力(ねじり)		$\phi_{ot} = \phi / \Psi^T$	0.487	$\Psi^T = 2.04$

差とともに、コンクリートが負担できるせん断応力度が表-3に示すとおり材料ばらつきの大きいコンクリート強度に支配されるためである。

4. まとめ

本検討により得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

- 現行終局荷重と試算用荷重の荷重レベル差に起因する断面力比とした修正係数 Ψ は1.6~2.0程度で、概ね荷重係数比に応じる傾向となった。
- 目標信頼性指標 β_T を定め、現行設計と同等の安全余裕を有する場合の抵抗係数を提案した。その際、信頼性指標を細分化することにより、材料等のばらつきや荷重組合せの影響、構造細目による安全余裕を明確にした。

今後、引続き試設計等を通して抵抗係数の妥当性を確認するとともに、他の橋梁形式や照査項目を対象とした抵抗係数を検討予定である。

参考文献

- 1) 構造物の信頼性設計法、鹿島出版会、1986年5月
- 2) 道路橋示方書・同解説Ⅲコンクリート橋編、Ⅴ耐震設計編、日本道路協会、平成24年5月

和田圭仙*



独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 主任研究員
Yoshinori WADA

木村嘉富**



独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 上席研究員
Yoshitomi KIMURA

宮田弘和***



大阪大学大学院工学研究科NEXCO西日本高速道路学共同研究講座(前独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ研究員)
Hirokazu MIYATA

高橋敏樹****



株式会社大林組生産技術本部橋梁技術第二課(前独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ交流研究員)
Toshiki TAKAHASHI

松沢政和*****



独立行政法人土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 交流研究員
Masakazu MATSUZAWA