

材料や構造の多様化に対応したコンクリート道路橋の設計法に関する研究

研究予算：運営費交付金

研究期間：平 25～平 28

担当チーム：構造物メンテナンス研究センター

研究担当者：石田雅博、大島義信、藤井雄介

【要旨】

平成 14 年道路橋示方書では、これまでの仕様規定型から性能規定型への転換を目指した示方書体系に改定されるとともに、性能規定化にあたって橋に要求される性能と橋を設計する上での留意すべき基本事項が明示された。現在、多様化するコンクリート橋の構造形式や使用材料への対応、並びにコンクリートの材料品質・施工精度等の向上を積極的に誘因可能な設計体系の整備等を目的に、さらなる性能規定化に向けて、部分係数設計法の導入の検討が進められている。ここでは、コンクリート道路橋を対象に材料品質の違いの影響を考慮した部分安全係数の設定を行うとともに、特殊構造としてプレキャストセグメント構造継目部の耐力評価式のばらつき等を評価した部分安全係数の検討を実施した。また、かぶり、表面塩分量等のばらつきを考慮して信頼性設計の概念を導入した耐久性設計体系についての提案に向けた検討を行った。

キーワード：信頼性設計、信頼性指標、部分安全係数、塩害、モンテカルロシミュレーション

1. はじめに

従来の仕様規定型の設計基準は、最低限確保されるべきある一定水準の性能を有することを達成するための手段としての規格類である。現行のコンクリート道路橋に適用されるいわゆる許容応力度設計¹⁾では、品質の善し悪しに関わらず許容値を超えないことを満足すればよいことから、その設計法自体がコンクリート材料品質・施工精度の向上を積極的に促進させるとは必ずしもいえない性格のものであった。一方で、次期道示改定での導入に向けて検討が進められている部分係数設計法²⁾³⁾などでは、荷重側と抵抗側のそれぞれに見込まれる不確実性に対して、個別に部分安全係数を設定した照査式が用いられることから、材料品質の向上など抵抗側の特性において期待される信頼性の程度に対して、それと関係のある部分安全係数を見直すことが原理的には可能となる。

例えば、コンクリート等の材料強度のばらつきを考慮した部分安全係数を導入することによって、強度ばらつきの小さな材料使用などによる、材料品質の向上を設計に反映することが可能となる。これにより、合理的に要求性能を満たす高品質の成果が得られるとともに、品質向上の努力が設計成果に反映され、その努力に対する評価も実施されるやすくなると考えられることから、材料品質向上を積極的に促す設計体系を構築できる可能性がある。

したがって、より質の高いコンクリート道路橋の整

備を誘導するためには、耐荷性能の照査において材料品質のばらつきを考慮した部分係数設計法を確立する必要がある。また、耐久性性能の照査においても、材料強度等の部分安全係数を導入した耐久性設計体系の構築が必要である。

さらに、部分係数設計法の適用範囲を拡大するためには、床版橋や箱桁橋等の一般的な上部工形式に加えて、これら一般的な上部工形式とは異なる、プレキャストセグメント構造などの個別構造を対象とした部分安全係数の検討により設計標準解の充実を図る必要もある。

ここでは、抵抗側の変動要因に関わる材料強度や施工の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、これまでの検討⁵⁾で用いられた FOSM 法（近似解法）⁴⁾との対比を行うことで、FOSM 法によるばらつき評価の妥当性について確認を行った。その上で、既設橋の床版橋・箱桁橋など一般的な形式における信頼性指標の整理を行い、材料強度、耐力評価式、施工時の構造物寸法等のばらつきを整理し、コンクリート道路橋を対象に材料品質の違いの影響を考慮した部分安全係数の設定を行った。また、特殊構造として、プレキャストセグメント構造に着目し、既往の実験結果⁴⁾から継目部の耐力評価式のばらつきを評価して部分安全係数係数についての検討を実施した。さらに、耐荷性能の照査と同様に、信頼性設計法に基づき、かぶり、表面塩分量、コンク

リートの水セメント比のばらつきを考慮し、信頼性設計の概念を導入したコンクリートの内部鋼材腐食に対する耐久性設計体系についての検討を実施した。

2. 耐荷設計における部分安全係数の検討

2.1 現行設計基準により確保されていた安全余裕度の評価

現行設計基準¹⁾で設計された既設橋梁が有する破壊に対する安全余裕について、橋梁形式や部位ごとの耐力を評価することにより確認を行う。検討の方針を図-1に示す。

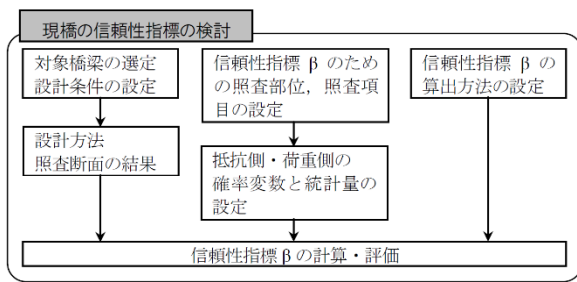


図-1 検討の方針

現行設計基準により確保されていた安全余裕度の評価は以下により行う。

- ・まず、対象橋梁を選定し、現行設計基準に基づき、橋梁試設計を実施し、橋梁断面を決定する。
- ・次に、決定した断面に対して、作用側の変動として、荷重そのもの及び荷重の組合せに対するばらつきを考慮し、供用期間100年間に発生する可能性のある外力を作用させた場合に生じる設計断面力分布を求める。
- ・同様に、抵抗側についても、現行設計基準に基づき決定した断面に対して、材料強度、断面寸法、耐力評価式等のばらつきを考慮することで破壊抵抗耐力分布を算出する。
- ・算出した断面力分布と耐力分布より、信頼性指標 β を試算することにより、現行設計解が有していた安全余裕度を評価する。

なお、作用及び抵抗側の分布と安全余裕のイメージを図-2に、本検討で用いた信頼性指標の概念図を図-3に示す。

2.1.1 信頼性指標の算出方法

信頼性指標 β は、直接的に破壊確率を計算することが非常に困難であることから、破壊確率に代わり、

信頼性・安全性を評価するための簡便な物差しとして登場してきたものであり、確率分布の平均値と標準偏差によって、安全性を評価するものである。

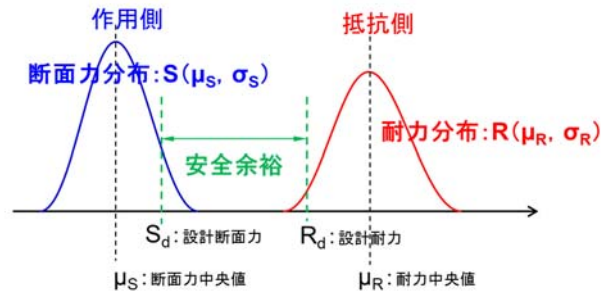


図-2 作用及び抵抗側の分布と安全余裕のイメージ

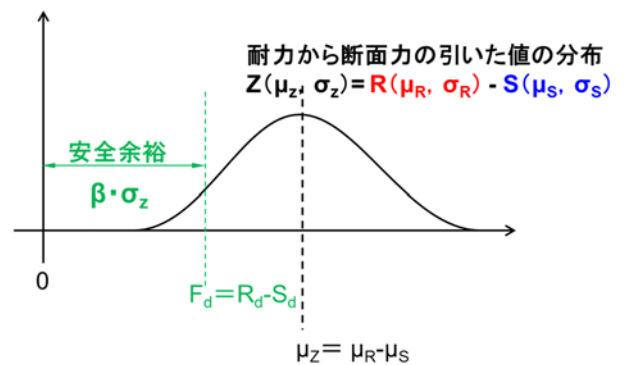


図-3 信頼性指標の概念図

図-2に示すように、安全余裕は、作用側である断面力分布のうちの設計断面力と抵抗側の耐力分布のうちの設計耐力の距離（はなれ）と捉えることができる。いま、耐力分布から断面力分布を引いて得られる確率分布を $Z(\mu_Z, \sigma_Z)$ とすると、耐力が発生断面力に対して確保している安全余裕は、図-3のx軸から F_d までの距離となり、信頼性指標 β と標準偏差 σ_Z の積として表される。

信頼性指標 β の解析方法としては各種の方法が提案されているが、ここでは汎用性を考慮してFOSM法を用いている。したがって、信頼性指標 β は式(1)で算出されることになる。

$$\beta = \frac{\mu_Z}{\sigma_Z} = \frac{\mu_R - \mu_S}{(\sigma_R^2 - \sigma_S^2)^{\frac{1}{2}}} \dots (1)$$

ここに、 μ_Z : 確率分布 Z の中央値 (平均値)

σ_Z : 確率分布 Z の標準偏差

μ_R : 耐力分布 R の中央値 (平均値)

σ_R : 耐力分布 R の標準偏差

μ_S : 断面力分布 S の中央値 (平均値)

σ_S : 断面力分布 S の標準偏差

(※断面力分布及び耐力分布を正規分布と仮定)

なお、ここでは、供用期間 100 年間に発生する可能性のある外力を確定値とし扱い、断面力分布 S の標準偏差 σ_S はないものとして信頼性指標 β を算出している。

2. 1. 2 FOSM 法によるばらつき評価の妥当性確認

これまでの検討⁹⁾から、一般的な構造形式（中空床版橋、PC ポステン T 桁橋、PC 箱桁橋、PC ラーメン箱桁）の主方向については、前述した方法により、現行設計解が有する安全余裕度について確認がなされており、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、概ね信頼性指標 β が 2 から 3 以上あることが明らかになっている。ここでは、信頼性指標 β の解析方法にモンテカルロシミュレーション法⁴⁾を用いて、再度、信頼性指標 β を求め、FOSM 法によりこれまでの検討⁹⁾で算出された値と比較を行うことで、FOSM 法によるばらつき評価の妥当性について検証を行った。

表-1 対象橋梁

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

表-2 使用材料

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

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 1.6 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%

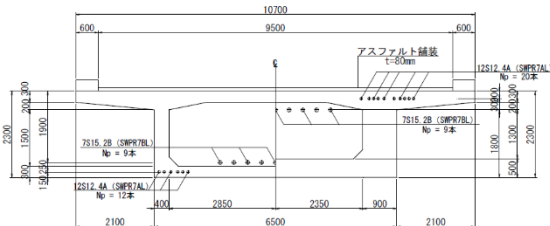


図-4 検討橋梁の代表断面図の例 (f40)

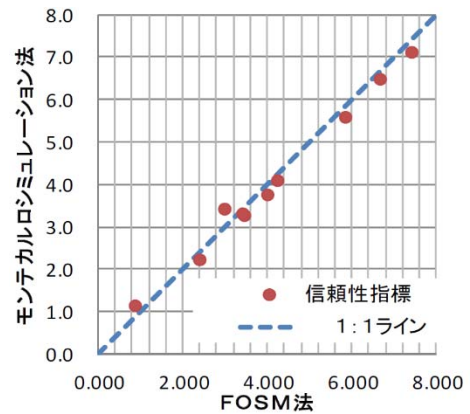


図-5 モンテカルロシミュレーションと FOSM 法の結果比較 (信頼性指標 β)

検討の対象としたのは、表-1 に示す PC 箱桁橋 5 橋とし、表-2 の使用材料のもと、表-3 に示す変動要因を考慮し、耐力分布を求めた。また、図-4 に対象橋梁の代表断面図 (f40) を示す。図-5 にモンテカルロシミュレーション法 (10 万回試行) 及び FOSM 法から求めた信頼性指標 β の対比を示す。図-5 に示すとおり、両者ともほぼ同等の値となっており、近似解法である FOSM 法を用いて、ばらつき評価を実施しても問題のないことを確認することができた。

2. 1. 3 信頼性指標の算出

ここでは、2. 1. 1 に従い、表-4 に示す橋梁の断面方向設計及び、表-5 に示す橋梁を対象として、プレキャストセグメント工法のセグメント打継目において、現行設計基準に従った設計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。なお、信頼性指標 β の算出にあたり、考慮した不確定要因と基本統計量は、これまでの検討⁹⁾で考慮している表-3 と同様とした。

表-4 対象橋梁 (断面方向)

記号	形式	支間割	曲線交角
f80-30	PC 3 径間連続箱桁	40+80+40m	30°
f80-45			45°
g80-30	PC 3 径間連続ラーメン箱桁	40+80+40m	30°
g80-45			45°

※ねじりの影響が大きくなる曲線橋を対象(表-1 の f80 及び g80 に曲線交角を考慮)。

表-5 対象橋梁 (プレキャストセグメント打継目)

記号	形式	支間割	施工方法
i45	PC 単純バルブ T 桁橋	45m	セグメント方式
m45	PC 連結バルブ T 桁橋	45m	
n30	PC 単純コンポ橋	30m	
n45		45m	
o30	PC 連結コンポ橋	30m	
o45		45m	

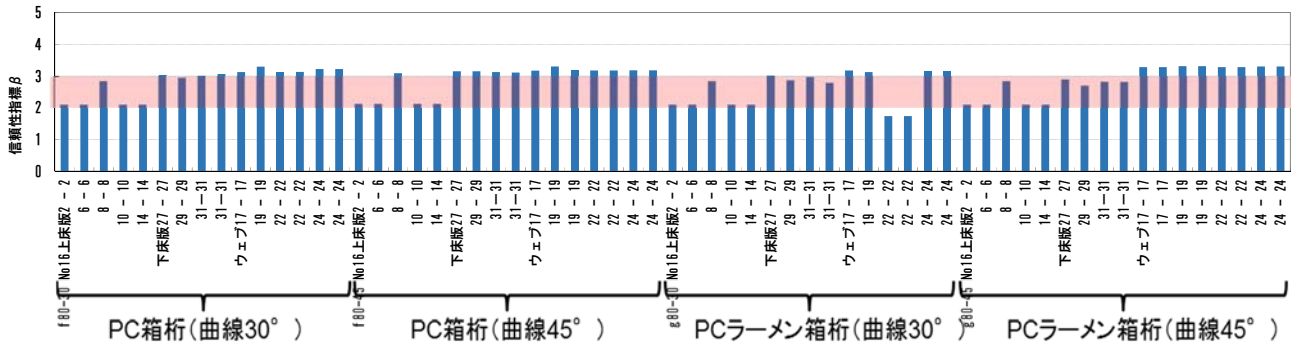


図-6 PC箱桁橋の断面方向に対する曲げ耐力の信頼性指標 β

表-4のPC箱桁橋の断面方向に対する曲げ耐力の信頼性指標 β の算出結果を図-6に示す。(算出位置は図-7) また、図-8(a)に表-5に示すバルブT桁橋及びコンポ橋のプレキャストセグメント打継目における曲げ耐力、(b)に鋼製接合キー(支圧応力度)の信頼性指標 β の算出結果を示す。

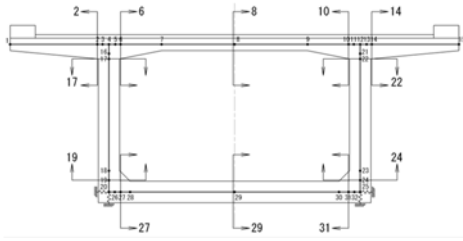
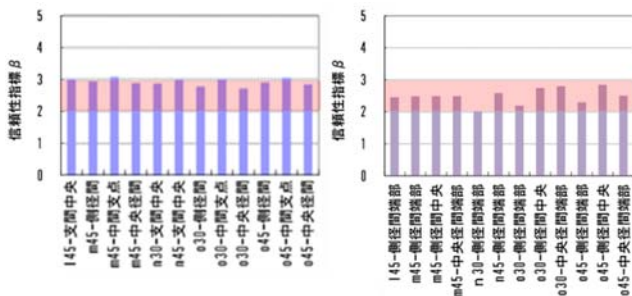


図-7 断面方向の試算における照査断面



(a) 曲げ耐力 (b) 鋼製接合キー

図-8 セグメントの信頼性指標 β

図-6、図-8より、概ね信頼性指標 β が2から3の範囲にあることがわかる。信頼性指標 β は、これまでの検討と同程度であり、このことから、構造形式によらず、従来設計基準においても、様々な不確実性を考慮した上で、一定の安全余裕度が確保されていたことが確認された。なお、これまでの設計荷重に対する許容応力度法では、荷重側及び抵抗側の不確実性を全て抵抗側で見込んでいた。道路橋におけるコンクリート構造物は、荷重側にも不確実性を見込んだ終局荷重による照査が行われているものの、許容応力度法による応力制

限值で断面形状や鋼材量が決定されていた。そのため、荷重側の不確実性を見込んで信頼性指標を算出する場合でも、凡その傾向は一致するものと考えられる。

2.2 部分安全係数の算出

2.1の結果を踏まえ、抵抗側の部分安全係数の設定についての検討を行う。荷重抵抗係数設計法の設計基準式の基本的な照査式は(2)による。

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

ここに、 R_n ：抵抗側の特性値(設計基準に示される公称強度または耐力)

S_n ：設計基準に示される各設計荷重により生じる公称荷重作用(断面力等)

ϕ ：抵抗係数(抵抗側の部分安全係数の積)

また、抵抗係数 ϕ は、以下の方針により設定する。

- ・日本において、標準的な材料、施工法、構造形式で作られるコンクリート構造物を前提とする。
- ・その上で、統計量として、①耐荷力推定式の推定誤差(実験式と実験結果の差)②使用材料のばらつき(前提とする材料強度)③製作・組立て(寸法・形状誤差)を考慮して、抵抗係数 ϕ から部分抵抗係数 ϕ' を切り分ける。

図-9に、本検討での抵抗側の部分安全係数(Φ' 及び ξ)設定におけるイメージを示す。

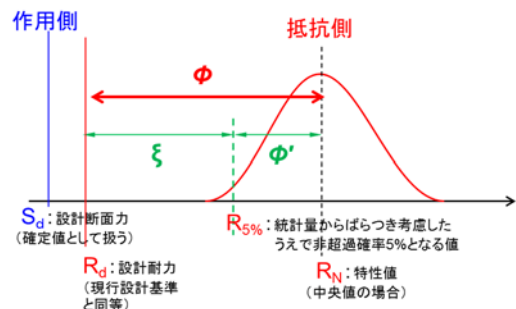


図-9 抵抗側の部分安全係数設定イメージ

2. 2. 1 部分抵抗係数 ϕ' の算出方法

本検討における部分抵抗係数 ϕ' の算出は、前述の方針に従う。前述したとおり、扱う統計量として、これまでの実績や調査等から得られているデータを統計的に扱うことが可能であると考えられる以下の3項目に対してばらつきを評価し、部分抵抗係数 ϕ' を算出する。

- ① 耐荷力推定式の推定誤差（実験式と実際の差）
- ② 使用材料のばらつき（前提とする材料強度）
- ③ 製作・組立て（寸法・形状誤差）

ここでは、それぞれの項目によるばらつきを直接的に見込む場合や、想定された範囲を変動すると仮定する場合など、照査式によっては適切なデータを与えられないものがあることから、照査式に応じて確率変動の与え方を変えた。例えば、FOSMによって①から③までの変数を考慮する場合には、それぞれの変数の変動に対する感度（勾配）を求めることで、最終的な耐力の変動係数を得ている。一方、理論的に算出する場合には、各変数による耐力の挙動が対数正規分布で表されると仮定し、その変動係数をそれぞれ、COV①、COV②、COV③とすると、それぞれの要因が積として与えられていると考えた。すなわち、これら全てのばらつきによる耐力の変動係数 COV' は、式(3)として算出される。その上で、部分抵抗係数 ϕ' により低減される耐力が非超過確率 5%となるよう係数を定めるものとし、ばらつきを評価した耐力分布が対数正規分布に従うと仮定すると、部分抵抗係数 ϕ' は式(4)として算出されることになる。

$$COV' = (COV①^2 + COV②^2 + COV③^2)^{1/2} \quad \dots (3)$$

$$\phi' = 1 - 1.64 \cdot COV' \quad \dots (4)$$

式(4)により算出された部分抵抗係数 ϕ' は、コードキャリブレーションの観点より、従来から橋梁に用いられている一般的な材料（コンクリート、鉄筋）使用を前提に、その材料品質のばらつきを統計的に評価し設定されたものになる。そのため、ここで想定している一般的な材料よりも品質のばらつきが少ない材料を用いる場合には、この部分抵抗係数 ϕ' を見直すことにより、特性値から確保すべき安全余裕度（設計耐力）を低減することが可能となる。

2. 2. 2 部分抵抗係数 ϕ' の設定例と算出結果

1) 部分抵抗係数 ϕ' の前提とする材料等のばらつき

本検討で考慮したコンクリート構造物の部分抵抗係数 ϕ' の前提とする材料強度等のばらつきを、表-6に示す。

たとえば、コンクリート圧縮強度については、既往の調査⁶⁾や実験⁷⁾⁸⁾⁹⁾から、標準養生供試体では7%程度の変動係数、コアサンプルでは15%程度の変動係数、実圧縮強度が設計基準強度の概ね1.2から1.3倍程度であることが確認されている。また、異なる構造物から採取したコアサンプルの結果では変動係数22.4%となることも確認されているが、ここでは、ある時期に一つの工場から持ち込まれるコンクリートを想定するため、これらの結果から、コンクリート圧縮強度のばらつきは以下と設定している。

- ・実圧縮強度の中央値 σ_c と設計基準強度 σ_{ck} の比率 (σ_c / σ_{ck}) は、1.2倍（バイアス1.2）
- ・圧縮強度の変動係数は、15%

鋼材等の他のばらつき評価項目についても既往の調査結果等から同様に設定している。

表-6 前提とする標準的な材料特性

不確定要因	分類等	基準値**	バイアス	変動係数	仮定する確率分布	
材料強度	コンクリート圧縮強度	JISの呼び強度	1.2	15%	正規	
	コンクリートヤング係数	道示	1.0	10%	正規	
	鉄筋降伏強度	JIS規格下限値	1.14	4%	対数正規	
	PC鋼材引張強度	JIS規格下限値	1.03	1%	対数正規	
物性変化	クリープの影響	クリープ係数	道示	1.0*	20%*	正規
	乾燥収縮の影響	ブレ減少	20×10^{-5}	1.0	20%	正規
		不静定力	15×10^{-5}	1.0	20%	正規
	プレストレス力	ヤング係数比	15(RC)個別(PC)	—	—	確定値
部材寸法	有効高	設計値	1.0	$\pm 10\text{mm}$	正規	

*クリープについては、有効なデータが存在しないため、乾燥収縮と同等のばらつきをもつと仮定。**特性値の計算に用いる値。

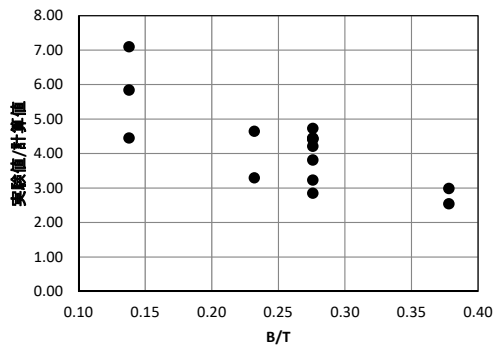
2) 部分抵抗係数 ϕ' の設定例と算出結果

特殊構造の設計に適用可能な部分抵抗係数値検討の代表例として、プレキャストセグメントの接合キー（現行設計基準¹⁾に示される鋼製接合キー、コンクリート製台形接合キー、コンクリート製多段キーを対象する）の部分抵抗係数 ϕ' の算出について示す。

既往の実験結果¹⁰⁾¹¹⁾から、現行設計基準¹⁾で示される耐力推定式と実験値の比較を図-10から図-12に示す。

これらの実験結果から、耐力推定式（実験式）が有しているばらつき（変動係数及びバイアス）を、表-7に示す。表-7で得られた耐力推定式のバイアス及び変

動係数に材料強度のばらつきを考慮し、式(3)および式(4)により部分抵抗係数 ϕ' を算出する。



*鋼製接合キーの外径:B 埋め込み長さ:T
図-10 鋼製施接合キーの計測値/実験式

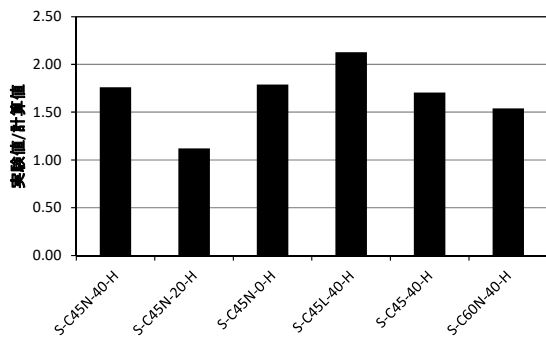


図-11 コンクリート製台形接合キーの計測値/実験式

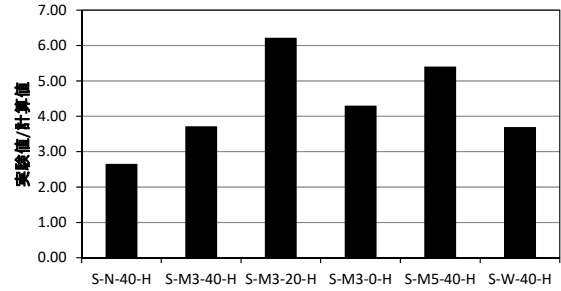


図-12 コンクリート製多段キーの計測値/実験式

表-7 接合キーにおける耐力評価式のばらつき

接合キーの種類	支配的な要因	評価式誤差	
		バイアス	変動係数
鋼製接合キー	実験式 (正規)	4.20	27.3%
多段接合キー	実験式 (正規)	1.00	29.7%
台形接合キー	実験式 (正規)	1.65	19.8%

鋼製接合キーにおいては、実験結果より、耐力推定式のバイアスは 4.2 (平均)、変動係数は 27.3%となる。ここに、FOSM 法 (式(3)) によりコンクリート圧縮強度のばらつき(変動係数 15%)を考慮すると、最終的な耐力式のばらつきは、以下となる。

$$COV' = (0.273^2 + 0.15^2)^{1/2} = 0.311$$

ここにおいて、変動係数を 5%でまらめて $COV' = 30\%$ とし、式(4)に代入することにより、部分抵抗係数

表-8 部分抵抗係数 ϕ' 一覧

部材	照査項目	内容	照査式	ϕ (抵抗係数)
RC部材/PC部材	軸力と曲げモーメント	降伏曲げ耐力	$M_{yd} = \xi \phi'_{RY} M_{Yc}$	0.85
		終局曲げ耐力	$M_{ud} = \xi \phi'_{RU} M_{uc}$	0.85
	せん断	ウェブの圧壊	$S_{usd} = \xi \phi'_{usw} \tau_{rmax} b_w d + \xi \phi'_{p} S_p$	$\phi_{usw} = 0.65$ $\phi_p = 0.90$
		部材の斜引張破壊	$S_{ucd} = \xi (\phi'_{uc} S_c + \phi'_{us} S_s + \phi'_{up} S_p)$	$\phi_{uc} = 0.65$ $\phi_{us} = 0.65$ $\phi_{up} = 0.90$
		ねじりモーメント	ウェブorフランジの圧壊	$M_{td} = \xi \phi'_{tuc} \cdot M_{tuc}$
			部材の斜引張破壊	$M_{td} = \xi \phi'_{tus} \cdot M_{tus}$
ラーメン構造の接合部	接合部の曲げモーメント (負曲げ)	終局曲げ耐力	$M_{ud} = \xi \phi'_{RU} A_s R \sigma_{sy} / 2$	0.65
	接合部の曲げモーメント (正曲げ)	終局曲げ耐力	$M_{urd} = \xi \phi'_{RU} A_s z \sigma_{sy} / \sqrt{2}$	0.65
プレキャストセグメント構造の継目部	せん断力及びねじりモーメント	コンクリート製多段キーが受け持つせん断耐力	$P_{kid} = \xi \phi'_{RY} S_k$	0.50
		鉄筋コンクリート製キーが受け持つせん断耐力	$P_{kid} = \xi \phi'_{RY} S_k$	0.65
		鋼製キーが受け持つせん断耐力	$P_{kid} = \xi \phi'_{RY} S_k$	0.50
合成桁の桁と床版の接合部	接合面のせん断耐力	接合面のせん断応力度	$\tau_{ba} = \xi \phi'_{RY} k_c \sigma_{ck}$	0.65
押抜きせん断	面外からの押抜き	押抜きせん断力	$\tau_{ba} = \xi \phi'_{RY} k_c \sigma_{ck}$	0.65
支圧応力	支圧	支圧応力度	$\sigma_{bad} = \xi \phi'_{ba} \sigma_{ba}$	0.65

ϕ' が算出される。

$\phi' = 1 - 1.64 \times 0.30 = 0.508$ (鋼製接合キーの部分抵抗係数)

ここで、バイアス 4.2 は耐力推定式 (特性値) に乗じて考慮する方針とする。

同様に、コンクリート製台形キー及びコンクリート製多段キーも含め、その他の現行設計基準に示される耐力評価式についても、耐力推定式、使用材料、寸法・形状のばらつきを評価し、部分抵抗係数 ϕ' を算出した。算出した結果の一覧を表-8 に示す。

3. 信頼性設計の概念を導入した耐久性設計体系の検討

2 章では、耐荷性能の照査において、信頼性設計の概念に基づき、想定される不確実性を評価し、材料品質のばらつき等を考慮した部分安全係数を算出した。ここでは、耐久性設計においても耐荷設計と同様に、想定される不確実性を考慮し、信頼性設計の概念を導入した耐久性設計体系の構築することを目的に、かぶりによるコンクリート橋の内部鋼材の防食を対象として、部分安全係数についての検討を実施した。

現行の設計基準では、コンクリート橋の内部鋼材の防食については、橋梁の架設地区及び海岸線からの距離に応じた塩害の影響度合いから定まる対策区分に従い、表-13 (道路橋示方書から抜粋) に示す、かぶり厚さを確保することにより、所要の耐久性を確保している。

表-13 現行設計基準による鋼材防食例

表-5.2.1 塩害の影響による最小かぶり (mm)

塩害の影響の度合い	対策区分	構造		
		(1) 工場で製作されるプレストレストコンクリート構造	(2) (1) 以外のプレストレストコンクリート構造	(3) 鉄筋コンクリート構造
影響が激しい	S	70 ^{*1}		
影響を受ける	I	50	70	
	II	35	50	70
	III			50
影響を受けない		6.6.1「鋼材のかぶり」による		

*1 塗装鉄筋の使用又はコンクリート塗装を併用

本来、構造物が有していなければならない耐久性能とは、経年の劣化等による性能低下に対して、設計で定めた目標期間のどの時点においても、設計限界値を下回らないための性能と理解される。したがって、耐久性能の照査としては、構造物の設計耐久期間が目標期間 (更新を前提していなければ供用期間と同じ) を上回ることを確認すればよく、式 (5) で示すことが可能と考えられる。

$$T_s \leq T_d \quad \dots \text{式(5)}$$

ここで、 T_s : 目標期間

T_d : 設計耐久期間

いま、コンクリート橋の内部鋼材の腐食について、この時間軸による照査において、設計耐久期間に影響を与えると想定される不確実性として、飛来塩分量等の環境作用のばらつき及びコンクリート品質のばらつきを考慮し、そのばらつきを部分安全係数として考慮するとした場合、式(5)は、式(6)と表すことができる。図-13 に照査イメージを示す。

$$T_s \leq T_d = \xi \times \phi \times T_c \quad \dots \text{式(6)}$$

ここで、 T_s : 目標期間

T_d : 設計耐久期間

T_c : 計算値 (特性値) であり、ここでは鉄筋位置で塩化物イオンが腐食発生限界濃度に達するまでの時間とする

ξ : 環境作用によるばらつき (飛来塩分量等) を評価した部分安全係数

ϕ : 抵抗力 (コンクリート品質等) のばらつきを評価した部分安全係数

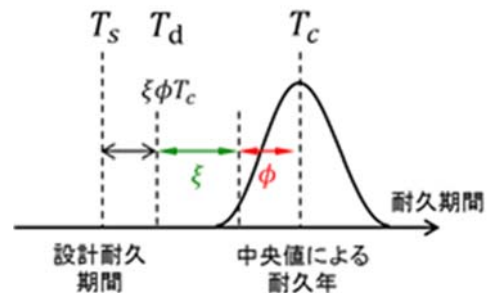


図-13 時間軸による耐久性能のイメージ

3. 1 部分安全係数の試算

試算の条件としては、通常と同じ拡散方程式により表面塩分の浸透をシミュレーションした。また、このとき浸透現象を左右すると思われる以下のパラメータについて、ばらつきを設定して最終的な耐久期間のばらつきを評価している。

- ・かぶり
- ・W/C (セメント量を固定し、水分量を 5ml 変動)

なお、在来の塩害区分に従って想定する境界点に対応するケースについて、それぞれモンテカルロシミュレーションを 1000 回実施した。また、この検討にあたり、塩害地区ごとの飛来塩分量についても全国調査から確率的に与えることとした。
- ・かぶり, W/C, 表面塩分量のばらつきを考慮

表-14 ばらつきを考慮した場合の設計耐久期間

地区	W/C	c (mm)	x (km)	推定年	+σ推定年	ln(100)/ln(Td)	ln(Tσ)/ln(Td)	非超過 15.8% (1σ) 年	非超過 20%年
A	0.36	50	0.1	1129	102	0.66	0.66	104	127
	0.43	70	0.1	1073	97	0.66	0.66	97	118
	0.36	35	0.3	∞	88			90	124
	0.43	50	0.3	∞	87			84	117
	0.5	70	0.3	∞	101			100	136
B	0.43	70	0.1	110	58	0.98	0.86	58	63
	0.36	50	0.1	116	61	0.97	0.87	61	66
	0.5	70	0.3	124	50	0.96	0.81	49	55
	0.43	50	0.3	107	43	0.99	0.81	43	48
	0.36	35	0.3	108	43	0.98	0.80	43	48
	0.5	50	0.5	97	31	1.01	0.75	32	36
	0.43	35	0.5	80	26	1.05	0.74	26	29
C	0.36	25	0.5	84	27	1.04	0.75	27	31
	0.36	50	0.02	467	94	0.75	0.74	92	109
	0.43	70	0.02	444	89	0.76	0.74	89	104
	0.36	35	0.05	1376	70	0.64	0.59	72	88
	0.43	50	0.05	1362	70	0.64	0.59	69	87
	0.5	70	0.05	1586	81	0.62	0.60	82	103
	0.36	25	0.1	∞	56			57	76
	0.36	35	0.1	∞	109			113	154
	0.5	50	0.1	∞	64			62	87

部分安全係数は、飛来塩分の中央値に対応する設計耐久期間を特性値として、部分安全係数により低減させた耐久期間が、求められる設計耐久期間よりも長いことを示すことになる。

3. 2 試算結果

試算の結果を表-14 及び図-14 に示す。表には、非超過確率を 15.8%及び 20%とした場合の時間、また、対数軸上で 100 年に対する濃度中央値による耐久年の比率、また 1σとした場合の時間の比率を示している。この比率を部分安全係数として設定することで、目標となる耐久年を設定することが可能になる。表より、A 地区及び C 地区の一部の地域で 100 年に対する比率が 0.6~0.7 程度になるケースがある一方、時間の比率が設定できないケースが存在することがわかる。また、B 地区で濃度中央値による時間と 100 年との比がほぼ 1 となっている。すなわち、濃度中央値による時間を特性値とした場合には、濃度中央値による時間がほぼ 100 年となり、他のケースと同等の信頼性の確保が困難であることがわかる。

なお、図の横軸のケースに示される数値の組合せは、

かぶり、海岸からの距離、W/C をそれぞれ意味している。これより、塩害が激しい地区においては、中央値による腐食発生までの期間が、他の試算による場合とほぼ違いがない傾向が確認できる。

地区 A および C では、推定年（濃度中央値による推定年）は 100 年を大きく超えるか、解なし（設定した塩分濃度では時間を無限大にしても腐食限界に達しない）となる。この場合、濃度の初期値を +σとした場合には、ほぼ推定年が 100 年となる。一方、地区 B では推定年がほぼ 100 年となるよう、かぶりが設定されている。

地区 A と C において推定年が算出できる場合、推定年の自然対数の値と設計供用年 100 年の自然対数の値との比はほぼ 0.6 となる。この値は、推定年の 1σ（非超過 15.8%）に相当する。A と C で平均値（中央値）を用いると、推定年は∞となり係数を掛けることができない。ただし、海岸性からもっとも遠い設定のかぶりなので、この区間を対象外にすることはできる。

地区 B については確率論での取り扱いができないため、別途信頼性を変化させて中央値での扱いが必要で

あることがわかる。

よって、設計耐久期間を用いた部分係数設計法を実施するためには、以下の方針が必要となる。

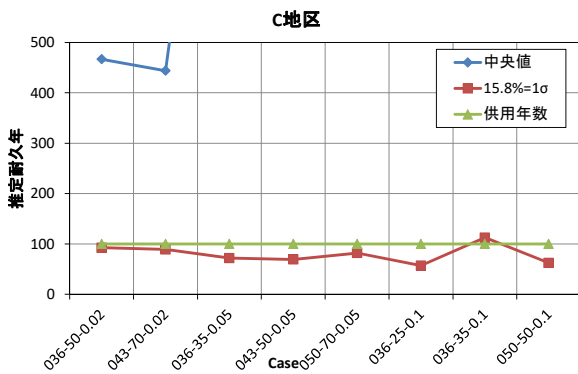
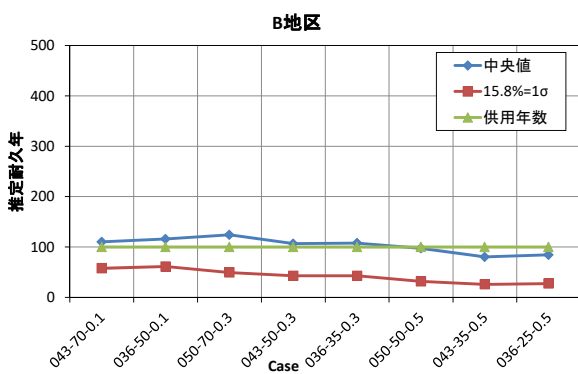
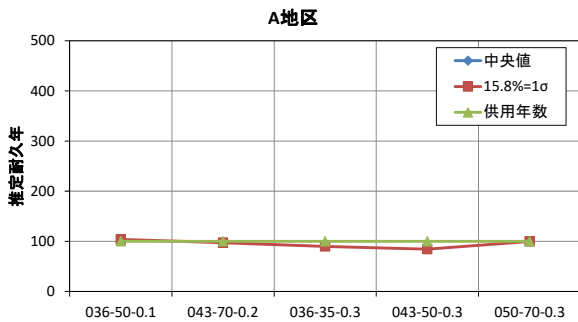


図-14 推定年の結果

【提案方法】

1) 塩化物イオンの飛来が少量の地域

・塩分の中央濃度値では腐食発生しないことから、中央値を特性値とするのではなく、1σ程度濃度の多い状態を想定する。そして、1σ濃度に対して目標期間の照査を行う。

$$T_d \leq T_{1\sigma} \text{ (1}\sigma \text{ 程度濃度の少ない場合の値)}$$

2) 塩化物イオンの飛来が中程度の地域

・塩分濃度中央値による腐食発生年が推定可能

・この場合、各種材料に起因するばらつきを部分安全係数で表現（対数正規分布とする）

$$\log(T_d) \leq \xi\phi\log(T_c) = 0.6 \times 1.0 \times \log(T_c)$$

3) 塩化物イオンの飛来が大量の地域

・塩分濃度中央値による腐食発生年度が100年程度となることから、中央値による照査と別途の対策を設ける。つまり

$$T_d \leq T_c \text{ (中央値での推定年)}$$

を照査する。

4. まとめ

本研究では、部分係数化にあたり必要な抵抗側のばらつきについて検討を行った。その結果、以下のことがわかった。

1) 在来の道路橋におけるコンクリート構造物の信頼性指標は、荷重の不確実性が全くないと仮定した場合に2~3程度の値を示した。よって、既往断面に近づけるよう調整を行うことで、必然的に2~3となるため、荷重側のばらつきを考慮して係数設定する場合には、既往構造物において確保されていた安全余裕をとるよう設計を行うことによって信頼性指標としても十分なβ値が得られている。

2) 時間軸を指標にした耐久性照査を試行したが、時間を対数軸上で表現すること、飛来塩分量の状況に応じて照査方法を変えることなどによって対応が可能である。

今回の検討では、濃度の中央値を特性値としたが、その場合には解がないケースが存在した。そのため、時間軸において部分安全係数を導入するためには、塩分濃度の中央値を特性値とせず、必ず解のある指標を特性値とする必要がある。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説Ⅰ，Ⅲ，2012.3
- 2) 鈴木 著：「構造物信頼性設計法の基礎」，森北出版，2010.12.
- 3) 玉越・白戸：「部分係数と限界状態-設計基準の性能規定化-」，土木施工 vol.56 No.1, 2015.1
- 4) 星谷・石井 著：「構造物の信頼性設計法」，鹿島出版会，1986.5
- 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」，土木技術資料 55-9, pp30-33, 2013
- 6) 独立行政法人土木研究所：既存コンクリート構造物の健

全度実態調査結果－1999年調査結果－，土木研究所資料
第3854号，2002.3

- 7) 建設省土木研究所：施工によるコンクリート品質の
ばらつき調査報告書，土木研究資料第632号，
1971.1
- 8) 高橋久雄ほか：構造体コンクリートの強度管理に関
する研究（その1～5），日本建築学会大会学術講
演梗概集，pp.123-132，1977
- 9) 佐原晴也，森濱和正，野永健二，渡辺正：小径コア
による実構造物コンクリートの圧縮強度の推定，
土木学会第58回年次学術講演会，V-427，2003.9
- 10) 建設省土木研究所，（社）プレストレスト・コンク
リート協会，共研69号 プレキャストブロック橋
の設計法に関する共同研究報告書（I），1992.2
- 11) 建設省土木研究所，（社）プレストレスト・コンク
リート協会，共研82号 プレキャストブロック橋
の設計法に関する共同研究報告書（II），1992.2

DESIGN METHODS CORRESPONDING TO VARIOUS STRUCTUR AND MATERIAL IN ROAD BRIDGES

Budged : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2012-2016

Research Team : Bridge and Structural Engineering
Research Group

Author : ISHIDA Masahiro

OSHIMA Yoshinobu

FUJII Yusuke

Abstract : In the revision of the design codes of road bridges in 2002, the concept of ‘performance based design’ was proposed in spite of ‘specification based design.’ Throughout this revision, required performance of a bridge and principles were clarified. To correspond various types of structures and materials, as well as guarantee the quality of structures, the design based on partial safety factors has been prepared. Herein the design method based on partial safety factor for concrete structures was proposed and discussed to consider the uncertainties concerning material strength and strength prediction. In particular, the safety factors for joint structure of pre-cast segment and cover concrete for steel corrosion was evaluated.

Key words : reliability design method, reliability index, partial safety factor, salt damage, Monte Carlo simulation