

# 鉄道構造物等設計標準（コンクリート構造物・令和5年） に基づく橋脚の試設計

鈴木 瞭\* 荒木 一徳\*\* 中田 裕喜\*  
轟 俊太郎\* 渡辺 健\*

Trial Design of the RC Pier Applying the Revised Standard for Railway Concrete Structures

Ryo SUZUKI Katsunari ARAKI Yuki NAKATA  
Shuntaro TODOROKI Ken WATANABE

Based on previous research, the formulas and values in the Design Standard and Commentary for Railway Structures (Concrete Structures) have been revised. In this report, we compare RC piers designed based on the revised standard (published in 2023) with those designed based on the current standard (published in 2004). Consequently, this comparison resulted in more rational design, for example, in the reduction of reinforcing-bar ratio, by increasing applicability of yield strength of rebars and revising formulas for the shear strength of RC members and pile foundation.

キーワード：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）、RC橋脚、試設計

## 1. はじめに

「鉄道構造物等設計標準（コンクリート構造物）」の通達（令和4年12月）に伴い、「鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）」<sup>1)</sup>（以下、改訂標準）を、2023（令和5）年1月に発刊した<sup>2) 3) 4)</sup>。

本稿では、改訂標準を適用して鉄筋コンクリート（以下、RC）橋脚の試設計を行い、従前の設計標準<sup>5)</sup>（以下、従前標準）を適用した場合との比較検討を行った。なお、RC橋脚の設計において想定される設計標準改訂に伴う主な影響を図1に示す。

## 2. 設計条件と解析手法

### 2.1 構造形式と照査方法

図2に、本検討で対象とするRC橋脚の構造一般図を示す。支持する桁は、起点側は橋長8.0mのRC単純桁、終点側は橋長25.0mのPC単純桁である。基礎は鋼管ソイルセメント杭で、周面支持杭として設計されている。なお、コンクリートの種類は普通骨材コンクリート、セメント種別は普通ポルトランドセメントである。

本検討では、復旧性検討地震動およびL2地震動に対して、改訂標準で新たに示された性能レベル3（機能は回復できるが、修復に時間を要する状態）を設定する。

すべての部位・部材が限界状態に至らないことを照査することで、橋りょう（構造要素）が限界状態に至らないことを照査する方法を用いることとする。照査は式(1)によって行うことを原則としているが、耐久性に関する検討を満たすことによって、設計耐用期間内の材料劣化を橋りょうの性能に影響しない軽微な範囲に抑えるものとし、材料劣化に起因した橋りょうの性能の経時変化を考慮しない照査方法を用いる。

$$\gamma_i \cdot t_{Rd} / t_{Ld} \leq 1.0 \quad (1)$$

ここに、 $t_{Rd}$ ：時間  $t$  における設計応答値

$t_{Ld}$ ：時間  $t$  における設計限界値

$\gamma_i$ ：構造物係数

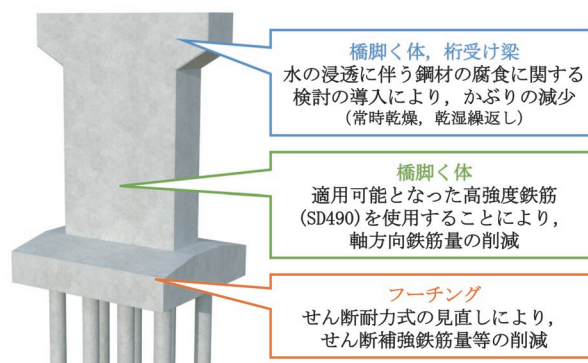


図1 橋脚の設計において想定される設計標準改訂に伴う主な影響

\* 構造物技術研究部 コンクリート構造物研究室

\*\* 元 構造物技術研究部 コンクリート構造物研究室

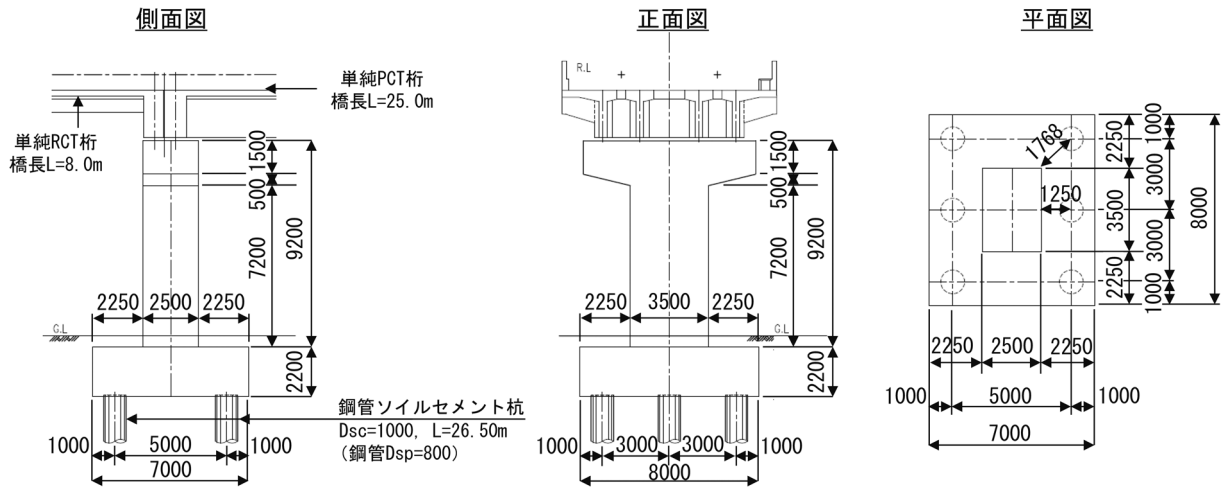


図2 対象構造物の構造一般図 (単位: mm)

表1 各部材におけるかぶり

	W/B (%)	施工誤差 (mm)	従前標準 <sup>*1</sup>			改訂標準 <sup>*2</sup>		
			$\beta$	$\gamma$	かぶり (mm)	気象条件等の区分	$\eta_w$	かぶり (mm)
く体	50	10	1.6	1.3	45	乾湿繰返し	1.0	40
桁受け梁	50	10	1.6	1.3	45	乾湿繰返し	1.2 <sup>*3</sup>	45
フーチング	上面、側面	55	10	1.0	40	常時湿潤	1.0	45
	下面 <sup>*4</sup>	55	10	1.0	40	常時湿潤	1.0	45

W/B: 水結合材比,  $\beta$ : 環境の影響の程度を表す係数,  $\gamma$ : コンクリートの材料係数  
 $\eta_w$ : 部位・部材毎の水掛りの程度を表す係数

\*1: 中性化に関する検討

\*2: 水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討

\*3: 桁遊間に設けた接合工が材料劣化に伴い漏水し、桁受け梁が比較的頻繁に乾湿を繰り返すことを想定し、 $\eta_w=1.2$ とした。

\*4: フーチング下面は、GL-2.0m以下のため、耐久性に関する検討は不要だが、かぶりを設定する際は、上記の条件としている。

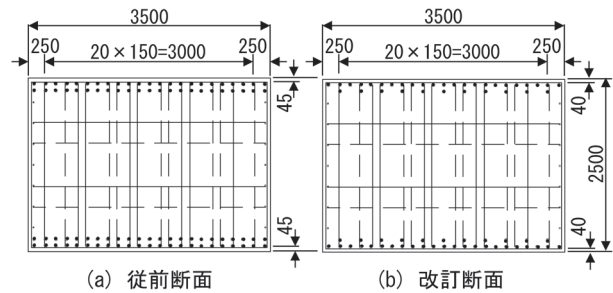


図3 橋脚く体断面図 (単位: mm)

## 2.2 解析手法

解析手法は二次元静的骨組解析法とする。また、地震時以外は線形解析とし、地震時は非線形解析とする。

設計地震動について、L2地震動は簡易な手法により算定し、標準応答スペクトルを用いる。損傷に関する復旧性の照査においては標準L2地震動(スペクトルII)を、損傷に関する使用性の照査および地震時の走行安全性に係わる変位の照査においては、それぞれ変動作用および偶発作用としてL1地震動を用いる。なお、地域別係数は1.0(地域区分A)とした。地盤種別はG4地盤(普通～軟弱地盤)であり、液状化しない地盤であると判定している。

## 3. 試設計結果の比較

### 3.1 試設計結果の比較の方法

「①従前標準による断面・配筋(以下、従前断面)」をもとに、「②改訂標準に従って従前断面を照査(以下、改訂計算)」し、改訂標準と従前標準による照査値の比較を行う。そして、「③従前標準と概ね同等の照査値となるような改訂標準を満たす断面・配筋(以下、改訂断面)」と「①従前断面」を比較し、配筋の変化等を示す。

表2 橋脚く体(橋軸方向)の破壊形態の確認結果

	橋軸方向			
	①従前断面 <sup>*1</sup>	②改訂計算 <sup>*2</sup>	③改訂断面 <sup>*3</sup>	
設計基準強度 $f_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )	27	40	40	
鉄筋の引張降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	軸方向	390	490	490
	帯	390	390	390
軸方向鉄筋の配置		D38-23本	D38-23本	D38-23本
設計かぶり (mm)		45	45	40
帯鉄筋の配置	塑性ヒンジ部	D25-5組 ctc125mm	D25-5組 ctc125mm	D25-5組 ctc125mm
	塑性ヒンジ部以外	D25-5組 ctc250mm	D25-5組 ctc250mm	D25-5組 ctc250mm
$V_{mm}/V_{wd}$		0.41	0.51	0.40
破壊形態の判定		曲げ破壊	曲げ破壊	曲げ破壊
等価固有周期 $T_{eq}$ (s)		1.121	1.110	1.129
地震時 使用性(損傷)	設計限界値	損傷レベル1	損傷レベル1	損傷レベル1
	応答塑性率 $\mu$	2.91	2.53	2.96
	降伏震度 $K_{hy}$	0.401	0.435	0.392
	L1地震動の設計応答値 $K_b$	0.378	0.378	0.378
	$\gamma \cdot K_b/K_{hy}$	0.94	0.87	0.96
	判定	OK	OK	OK
地震時 修復性(損傷)	応答塑性率 $\mu$	4.24	3.55	4.32
	応答回転角 $\theta_d$ (rad)	0.0505	0.0442	0.0520
	損傷レベル3制限値 $\theta_{d3}$ (rad)	0.0554	0.0551	0.0552
	$\gamma \cdot \theta_d/\theta_{d3}$	0.91	0.80	0.94
	損傷レベル	3	2	3
	損傷レベル限界値	3	3	3
判定		OK	OK	OK

$V_{mm}$ : 曲げ耐力に達する時のせん断力,  $V_{wd}$ : 設計せん断耐力,  $\gamma$ : 構造物係数

\*1: 従前標準による断面・配筋

\*2: 改訂標準に従って従前断面を照査

\*3: 従前標準と概ね同等の照査値となるような改訂標準を満たす断面・配筋

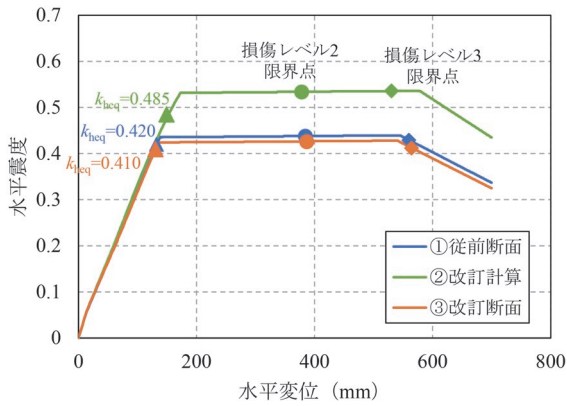


図4 橋脚く体の荷重変位関係

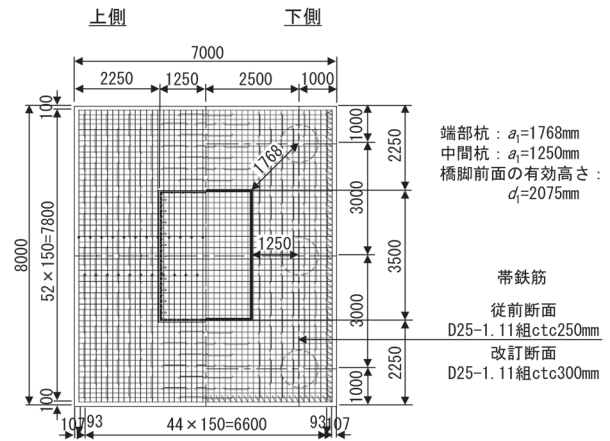


図5 フーチング平面図 (単位: mm)

### 3.2 部材全般

耐久性に関する検討において、かぶり、従前標準では中性化に関する検討に従って定めていたが、部位・部材が比較的乾燥している場合には、中性化が進行しても鉄筋の腐食の進行は小さく、水掛かりの影響を考慮することが重要であることから、改訂標準では水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討により定めることとした<sup>4)</sup>。

表1に橋脚の部位・部材ごとの比較を示す。乾湿繰返しとなるく体(水結合材比  $W/B=50\%$ )では、従前標準と比べてかぶりを5mm減じることができる。一方で、同様に乾湿繰返しとなる桁受け梁( $W/B=50\%$ )では、PC桁とRC桁の間に設けた接合工が何らかの原因で十分に機能しなくなって漏水することを想定し、桁受け梁が比較的頻繁に乾湿を繰り返すことから、水掛かりの程度を示す係数 $\eta_w=1.2$ としたため、かぶりは変化しなかった。また、常時湿潤となるフーチング( $W/B=55\%$ )では、かぶりが5mm増加する。

### 3.3 橋脚く体

軸方向鉄筋の種類について、従前標準では、特別な検討なしに使用できるのはSD390までであったが、改訂標準では、SD685A,Bまで使用できるようになった<sup>4)</sup>。

図3に橋脚く体の断面、図4に荷重変位関係を、表2に破壊形態の確認結果、使用性(損傷に関する保守)の照査結果と復旧性(損傷に関する修復性)の照査結果(橋軸方向)を示す。断面は幅3500mm、高さ2500mmの矩形である。①従前断面では軸方向鉄筋、帯鉄筋ともにSD390を使用している。改訂標準では、軸方向鉄筋にSD490を用い、設計基準強度 $f_{ck} \geq 40\text{N/mm}^2$ のコンクリートを用いる場合には、改訂標準に示す復元力モデル(変形性能算定式)を適用してよいことを踏まえ、②改訂計算と③改訂断面では軸方向鉄筋をSD490、 $f_{ck}=40\text{N/mm}^2$ とした場合の試計算を行い、従来よりも強度が高い材料の使用が断面諸元に与える影響を分析した。帯鉄筋は従前断面と同じSD390を用いた。②改訂計算

表3 フーチングの損傷に関する復旧性の照査結果

		橋軸方向				
		①従前断面 <sup>*1</sup>	②改訂計算 <sup>*2</sup>	③改訂断面 <sup>*3</sup>		
設計かぶり(上面/下面) (mm)		45/84	45/84	45/84		
設計基準強度 $f_{ck}$ (N/mm <sup>2</sup> )		27	27	27		
鉄筋の引張降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	軸方向	390	390	390		
	帯	390	390	390		
軸方向鉄筋の配置		D32-6.67/m	D32-6.67/m	D32-6.67/m		
帯鉄筋の配置		D25-1.11組 ctc250mm	D25-1.11組 ctc250mm	D25-1.11組 ctc300mm		
鉄筋の定着長 (mm)		1270	1270	950		
杭の有効幅 (mm)		2414.4(端部)	7000	7000		
		2000(中間部)	(3本分)	(3本分)		
地震時	復旧性(損傷)	押抜き	$V_d$ (kN)	7965.1	23895.4	23895.4
			$V_{fda}$ (kN)	8956.4	28856.7	28426.4
			$\gamma \cdot V_d/V_{fda}$	0.89	0.83	0.84
		判定	OK	OK	OK	
		引抜き	$V_d$ (kN)	4062.8	12188.3	12188.3
			$V_{sd}(V_{su})$ (kN)	6689.7	26979.3	21557.8
$\gamma \cdot V_d/V_{sd}(V_{su})$	0.61		0.45	0.57		
判定	OK	OK	OK			

$V_d$ : 設計せん断力,  $V_{fda}$ : 設計せん断圧縮破壊耐力  
 $V_{sd}$ : せん断補強鋼材により受け持たれる棒部材の設計せん断耐力  
 $V_{su}$ : 棒部材の設計せん断耐力,  $\gamma$ : 構造物係数  
<sup>\*1</sup>: 従前標準による断面・配筋  
<sup>\*2</sup>: 改訂標準に従って従前断面を照査  
<sup>\*3</sup>: 従前標準と概ね同等の照査値となるような改訂標準を満たす断面・配筋  
 ※従前断面は照査値の大きい中間部について、改訂計算、改訂断面は3本分を記載  
 ※引抜きせん断耐力は、従前標準では $V_{sd}$ で有効幅は直接支持の場合と同一とし、改訂標準では $V_{sd}$ で全幅とした。

では、①従前断面と軸方向鉄筋の種類やかぶりが異なるものの、鉄筋の本数は同一とした。

いずれのケースも破壊形態の判定によりすべて曲げ破壊形態であることを確認している。使用性(損傷に関する保守)の照査では、①従前断面では軸方向鉄筋にD38を23本ずつ2段配置することで照査を満足している。一方で②改訂計算では、軸方向鉄筋の強度が高くなったことで、設計曲げ降伏耐力 $M_{yd}$ が増加し、①従前断面に比べて照査値が小さくなる。このことから、使用性(損傷に関する保守)の照査において、①従前断面と同等の照査値とする場合には、③改訂断面において、軸方向鉄筋の2段目を23本から11本に削減できる。なお、①従前断面と比較して、③改訂断面の設計曲げ耐力 $M_{ud}$ は微増、損傷レベル3限界値 $\theta_{nd}$ は微減し、等価固有周期は概ね同等の結果となった。 $M_{ud}$ の微増によって降伏震

度が大きくなったことにより、応答塑性率 $\mu$ および応答回転角 $\theta_d$ は減少した。これらのことより、復旧性（損傷に関する修復性）の照査においても、①従前断面に対して②改訂計算の照査値は小さくなり、①従前断面と③改訂断面の照査値は同程度となった。

### 3.4 フーチング

杭基礎のフーチングの設計せん断耐力について、従前標準では、橋脚前面から杭中心までの距離 $a_1$ と橋脚前面の有効高さ $d_1$ の比 $a_1/d_1$ が1.25程度以下となると有効幅が減少する影響が大きくなり、せん断耐力が過小に算定されていた。改訂標準では、実験や解析に基づき、せん断耐力の算定式中の有効幅を従前より広くとれるように見直した。また、せん断補強鉄筋がせん断力を受け持つこと等を踏まえた設計引抜きせん断耐力の算定式を導入した<sup>4)</sup>。

図5にフーチングの平面図を、表3に復旧性（損傷に関する修復性）の照査結果（橋軸方向）を示す。寸法は幅7000mm、奥行8000mm、高さ2200mmである。 $a_1/d_1$ は端部杭で0.85、中間杭で0.60である。杭は橋軸方向に2列、橋軸直角方向に3列配置されている。①従前断面では各杭の有効幅が重なっていないため照査値の大きい中間杭1本分の値を示し、②改訂計算、③改訂断面では隣接する杭と有効幅が重なるため杭3本の合計値を示す。

復旧性（損傷に関する修復性）の照査において、押抜き側、引抜き側ともに、①従前断面に比べて②改訂計算の照査値が小さくなる。これらのことから、①従前断面と同等の照査値とするためには、③改訂断面において、単位幅あたり1.11組の帯鉄筋を250mm間隔の配置から300mm間隔の配置とすることができる。

また、鉄筋の定着長に関して、マッシブなコンクリートに埋め込む鉄筋の基本定着長 $l_{d01}$ の算定方法が新たに導入され、また、フーチング内の定着が有効とならない範囲が有効高さの1/2もしくは $10\phi$ から $5\phi$ （ $\phi$ ：軸方向鉄筋径）に見直された。このことより、杭のアンカー筋のフーチング側への定着長が、①従前断面では1270mmであったことに対して、③改訂断面では

950mmとなる。

## 4. まとめ

- (1) 水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討におけるかぶりは、水掛かりの程度に応じた区分が乾湿繰返しに分類される部材では従前標準による試算結果と比べて減少し、常時湿潤に分類される部材では増加する。なお、乾湿繰返しに分類される場合でも、桁受け梁のように比較的頻繁に乾湿が繰返される場合には、かぶりは従前標準による試算結果と変わらない。
- (2) 橋脚く体においては、従前よりも強度の高い鉄筋が使用可能となり、軸方向鉄筋にこれを用いることで鉄筋量を削減できる。
- (3) フーチングにおいては、設計引抜きせん断耐力の算定式でせん断補強鉄筋の貢献等を踏まえたこと、せん断耐力の算定式中の有効幅が広くとれるように見直したことにより、せん断補強鉄筋を削減できる場合がある。また、マッシブなコンクリートに埋め込む鉄筋の定着長の導入により、杭の軸方向鉄筋の定着長が小さくなる。

## 文 献

- 1) (公財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，丸善，2023
- 2) 田所敏弥，渡辺健，池田学，岡本大：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）「第Ⅰ編 基本原則」の要旨，鉄道総研報告，Vol.37，No.11，pp.7-13，2023
- 3) 渡辺健，池田学，岡本大：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）「第Ⅱ編 橋りょう」の要旨，鉄道総研報告，Vol.37，No.11，pp.15-23，2023
- 4) 渡辺健，中田裕喜，轟俊太郎：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）「第Ⅲ編 コンクリート構造」の要旨，鉄道総研報告，Vol.37，No.11，pp.25-33，2023
- 5) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物，丸善，2004