

鉄道構造物等設計標準（コンクリート構造物・令和5年） に基づくラーメン高架橋の試設計

鈴木 瞭* 荒木 一徳** 中田 裕喜*
轟 俊太郎* 渡辺 健*

Trial Design of the RC Rigid Frame Viaduct 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 rigid frame viaduct 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 rebar ratios by revising the shear strength equation of RC members and the specification for stirrup ratio in a joint.

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 ラーメン高架橋、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）」¹⁾（以下、改訂標準）を、2023（令和5）年1月に発刊した^{2) 3) 4)}。

本稿では、改訂標準を適用して鉄筋コンクリート（以下、RC）ラーメン高架橋の試設計を行い、従前の設計標準⁵⁾（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 ラーメン高架橋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 ラーメン高架橋の構造一般図を示す。5径間のRC ビームスラブ式ラーメン高架橋で、複線の直線スラブ軌道を有する。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、性能レベル2（機能は短時間で回復できるが、修復が必要な状態）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。

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

ここに、 ${}_t I_{Rd}$ ：時間 t における設計応答値

${}_t I_{Ld}$ ：時間 t における設計限界値

γ_i ：構造物係数

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

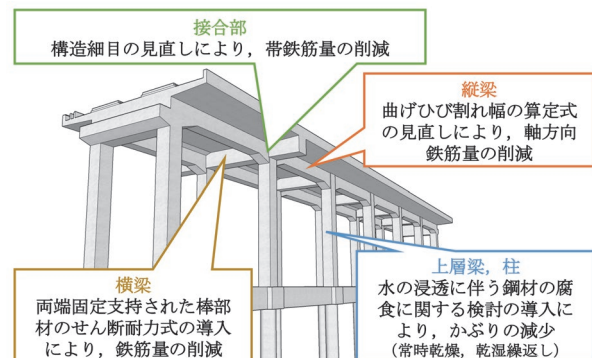


図1 ラーメン高架橋の設計において想定される設計標準改訂に伴う主な影響

* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

** 元 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

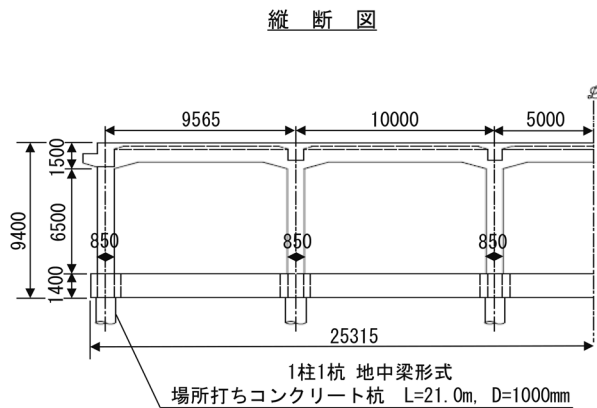


図2 対象高架橋の構造一般図(単位: mm)

表1 各部材におけるかぶり

	W/B (%)	施工誤差 (mm)	従前標準			改訂標準			
			β	γ	かぶり (mm)	気象条件等の区分	η_w	かぶり (mm)	
上層梁	上面	55	0	1.6	1.0	40	乾湿繰返し	1.0	35
	下面, 側面	55	10	1.6	1.0	50	常時乾燥	0.8	35
柱	55	10	1.6	1.3	60	乾湿繰返し	1.0	45	
地中梁	上面, 側面	55	10	1.0	1.0	40	常時湿潤	1.0	45
	下面	55	10	1.0	1.0	40	常時湿潤	1.0	45

W/B: 水結合材比, β : 環境の影響の程度を表す係数, γ : コンクリートの材料係数

η_w : 部位・部材毎の水掛か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

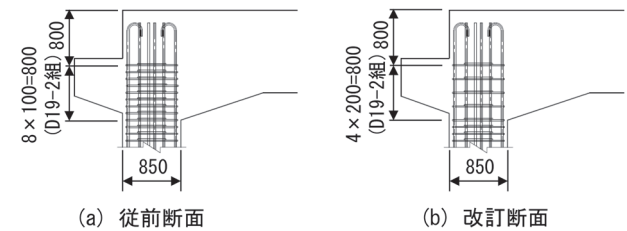


図3 柱梁接合部内の帯鉄筋量(単位: mm)

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)である。地盤種別はG3地盤(普通地盤)に分類され、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。

3.2 部材全般

耐久性に関する検討において、かぶりは、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して検討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

なった⁴⁾。

表1にラーメン高架橋の部位・部材ごとの比較を示す。常時乾燥、乾湿繰返しとなる上層梁や柱(水結合材比W/B=55%)は、従前標準に比べてかぶりを5~15mm減じることができる。一方で、常時湿潤となる地中梁(W/B=55%)はかぶりが5mm増加する。

3.3 接合部

柱梁接合部における接合部内の帯鉄筋量は、従前標準では柱の塑性ヒンジ部と同量配置することとしていたが、帯鉄筋の配置が接合部の耐力に大きく寄与しないという実験結果から、改訂標準ではせん断力に対して必要となる柱のせん断補強鉄筋量と同量以上配置することとなった⁴⁾。

図3に柱梁接合部の断面を示す。帯鉄筋は、従前断面ではD19を2組、100mm間隔の配置となっていたのに対して、改訂断面ではD19を2組、200mm間隔と、柱梁接合部内の帯鉄筋量を削減することができる。

3.4 縦梁

曲げひび割れ幅の算定における、収縮およびクリープ等の影響によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値 ϵ'_{csd} は、従前標準では常時乾燥に相当する桁下面の実態調査等を踏まえた値であったが、降雨等による水掛かりが収縮に及ぼす影響を踏まえて、改訂標準では水掛かりの影響をも考慮することとなった⁴⁾。

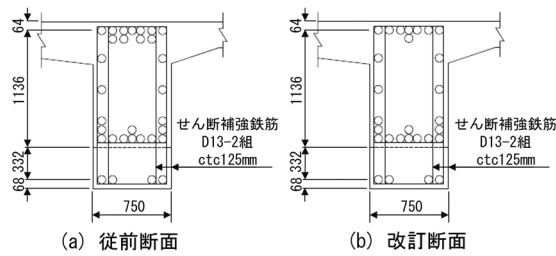


図4 上層縦梁 (単位: mm)

表2 上層縦梁の耐久性に関する検討の結果

		上側引張			
		①従前断面 ^{*1}	②改訂計算 ^{*2}	③改訂断面 ^{*3}	
設計基準強度 f_{ck} (N/mm ²)		27	27	27	
鉄筋の引張降伏強度 (N/mm ²)	軸方向	345	345	345	
	せん断補強	345	345	345	
引張側の軸方向鉄筋の配置		D32-7本 D32-4本	D32-7本 D32-4本	D32-7本 D32-1本	
軸方向鉄筋の設計かぶり (mm)		48	48	48	
せん断補強鉄筋の配置		D13-2組 ctc125mm	D13-2組 ctc125mm	D13-2組 ctc125mm	
ひび割れ発生材齢 (日)		30	30	30	
環境条件		腐食性環境	乾湿繰返し	乾湿繰返し	
耐久性	曲げひび割れ幅の検討	ϵ'_{csd} (μ)	450	250	250
		w_d (mm)	0.181	0.138	0.170
		w_{lim} (mm)	0.192	0.192	0.192
	検討	$w_d \leq w_{lim}$	$w_d \leq w_{lim}$	$w_d \leq w_{lim}$	
検討結果		OK	OK	OK	

※ ϵ'_{csd} : 収縮およびクリープ等の影響によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値, w_d : 設計曲げひび割れ幅, w_{lim} : 鋼材の腐食に関するコンクリートのひび割れ幅の制限値

*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に上層縦梁の断面を、表2に耐久性に関する検討の結果を示す。断面は高さ1600mm、腹部の幅750mmのT形である。上層縦梁の上側の気象条件等の区分は乾湿繰返しとなることから、 ϵ'_{csd} の値は450 μ から250 μ に小さくなり、設計曲げひび割れ幅 w_d は①従前断面に比べて②改訂計算では小さくなる。このことから、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、軸方向鉄筋の2段目が4本から1本に減少する。

3.5 横梁

梁のせん断スパン a と有効高さ d の比 a/d が小さい領域における設計せん断耐力 V_{ud} は、従前標準では設計せん断圧縮破壊耐力 V_{dd} の算定式を適用して求めていた。近年の研究により、この領域のせん断耐力は支持状態により異なることが明らかになったため、改訂標準では横梁のような部材に対しては、両端固定支持された棒部材の設計せん断耐力 V_{asud} を適用することとなった。また、せん断補強鉄筋を多量に配置してもせん断補強効果が得られないことが明らかになり、改訂標準では有効とならないせん断補強鉄筋の配置を抑制するために $p_w \cdot f_{wyd} / f'_{cd} \leq 0.10$ とする条件を付した⁴⁾。

なお、本試設計では、ラーメン高架橋の接続形式とし

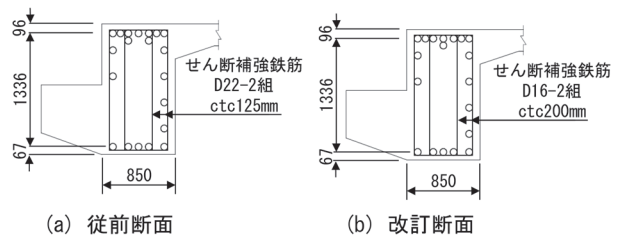


図5 端部ラーメンの上層横梁 (単位: mm)

表3 端部ラーメンの上層横梁の破壊形態の判定結果

		①従前断面 ^{*1}	②改訂計算 ^{*2}	③改訂断面 ^{*3}
設計基準強度 f_{ck} (N/mm ²)		27	27	27
鉄筋の引張降伏強度 (N/mm ²)	軸方向	345	345	345
	せん断補強	345	345	345
軸方向鉄筋の配置		D32-7本 D32-2本 D32-5本	D32-7本 D32-2本 D32-5本	D32-7本 D32-1本 D32-5本
せん断補強鉄筋の配置		D22-2組 ctc125mm	D22-2組 ctc125mm	D16-2組 ctc200mm
$p_w \cdot f_{wyd} / f'_{cd}$		0.242	0.242	0.078
せん断スパン比 a/d		1.49	1.49	1.49
破壊形態の確認	設計曲げ耐力 M_{ud} (kN・m)	4377.6	4377.6	3971.3
	せん断スパン a (m)	2.075	2.075	2.075
	曲げ耐力に達する時のせん断耐力 V_{mu} (kN)	2109.7	2109.7	1913.9
	設計せん断耐力 V_{ud} (kN)	V_{dd} 2008.9	V_{asud} 2504.9	V_{asud} 2364.9
	V_{mu} / V_{ud}	1.03	0.84	0.81
	破壊判定	せん断破壊	曲げ破壊	曲げ破壊
	損傷レベル	1	1	2
	設計曲げモーメント M_{dmax} (kN・m)	3433.0	-	-
	設計曲げ降伏耐力 M_{fd} (kN・m)	3944.3	-	-
	構造物係数 γ	1.0	-	-
$\gamma \cdot M_{dmax} / M_{fd}$	0.87	-	-	
降伏判定	降伏以内	-	-	

※ p_w : せん断補強鉄筋比, f_{wyd} : せん断補強鉄筋の引張降伏強度

f'_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度

V_{dd} : 設計せん断圧縮破壊耐力

V_{asud} : 両端固定支持された棒部材の設計せん断耐力

*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

てゲルバー桁式を想定しており、端部ラーメンの上層横梁には桁受けを設置することから、横梁の断面高さが端部ラーメンと中間部ラーメンで大きく異なっているため、それぞれについて比較検討を行う。

図5に端部ラーメンの上層横梁の断面を、表3に破壊形態の判定結果を示す。断面は高さ1500mm、腹部の幅850mmのT形である。①従前断面は、せん断破壊形態であったのに対し、②改訂計算では、設計せん断耐力 V_{ud} (= V_{asud})は、 V_{dd} よりも大きなせん断耐力を見込めることから、曲げ耐力に達する時のせん断耐力 V_{mu} と設計せん断耐力 V_{ud} の比 V_{mu} / V_{ud} は0.84となり、曲げ破壊形態と判定される。③改訂断面では、①従前断面や②改訂計算で $p_w \cdot f_{wyd} / f'_{cd}$ が0.10を超える多量のせん断補強鉄筋が配置されていたことから、0.10となるまでせん断補強鉄筋を減じて設計せん断耐力が変わらないことから、せん断補強鉄筋の配置間隔を125mmから200mmに広げることができる。さらに、③改訂断面では、曲げ破壊形態となることから、柱の曲げ降伏後に上層横梁の曲げ降伏を許容することで、①従前断面と比較して、

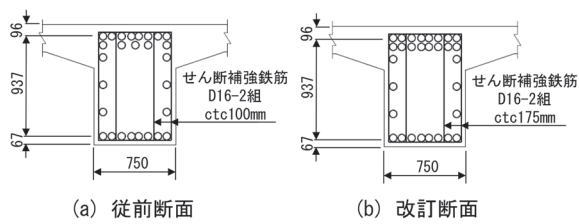


図6 中間部ラーメンの上層横梁 (単位: mm)

表4 中間部ラーメンの上層横梁の破壊形態の判定結果

設計基準強度 f_{ck} (N/mm ²)		①従前断面 ^{*1}	②改訂計算 ^{*2}	③改訂断面 ^{*3}
鉄筋の引張降伏強度 (N/mm ²)	軸方向	345	345	345
	せん断補強	345	345	345
軸方向鉄筋の配置		D32-8 本 D32-5 本 D32-8 本	D32-8 本 D32-5 本 D32-8 本	D32-8 本 D32-8 本 D32-8 本
せん断補強鉄筋の配置		D16-2 組 ctc100mm	D16-2 組 ctc100mm	D16-2 組 ctc175mm
$p_w \cdot f_{wyd} / f'_{cd}$		0.176	0.176	0.101
せん断スパン比 a/d		2.12	2.12	2.13
破壊形態の 確認	設計曲げ耐力 M_{ud} (kN・m)	4150.0	4150.0	4858.7
	せん断スパン a (m)	2.075	2.075	2.075
	曲げ耐力に達する時のせん断耐力 V_{mu} (kN)	2000.0	2000.0	2341.2
	設計せん断耐力 V_{ud} (kN)	V_{yd} 2476.1	V_{asud} 1748.1	V_{asud} 1779.3
	V_{mu} / V_{ud}	0.81	1.14	1.32
	破壊判定	曲げ破壊	せん断破壊	せん断破壊
	損傷レベル	2	4	1
	設計曲げモーメント M_{dms} (kN・m)	-	3946.7	3947.4
	設計曲げ降伏耐力 M_{fd} (kN・m)	-	3742.6	4450.1
	構造物係数 γ	-	1.0	1.0
$\gamma \cdot M_{dms} / M_{fd}$	-	1.05	0.89	
降伏判定	-	降伏	降伏以内	

※ p_w : せん断補強鉄筋比, f_{wyd} : せん断補強鉄筋の引張降伏強度
 f_{cd} : コンクリートの設計圧縮強度
 V_{yd} : 棒部材の設計せん断耐力
 V_{asud} : 両端固定支持された棒部材の設計せん断耐力

*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

軸方向鉄筋も減少する。

図6に中間部ラーメンの上層横梁の断面を、表4に破壊形態の判定結果を示す。断面は高さ1100mm、ウェブ幅750mmのT形である。①従前断面は曲げ破壊形態であったが、②改訂計算では、 V_{mu} / V_{ud} (V_{asud}) は1.14となり、せん断破壊形態と判定される。これは、 $p_w \cdot f_{wyd} / f'_{cd}$ が0.10を超える多量のせん断補強鉄筋量が配置されており、 $p_w \cdot f_{wyd} / f'_{cd} = 0.10$ として算定した V_{asud} が、従前の棒部材の設計せん断耐力 V_{yd} よりも小さくなったためである。そして、設計曲げ降伏耐力を上回る設計曲げモーメントが生じるために損傷レベル4となり、損傷レベルの制限値を満足しない結果となる。なお、照査値の超過がわずかであり、スラブに配置された鉄筋を考慮する等厳密な検討を行えば照査を満足することができると思われるが、通常の設計における検討範囲を超えているため、本稿では省略する。

③改訂断面では、せん断破壊形態と判定されるため損

傷レベル制限値が1となることから、曲げ降伏しないように軸方向鉄筋が3本増加する結果となる。一方で、 $p_w \cdot f_{wyd} / f'_{cd}$ が0.10を超過する分のせん断補強鉄筋は有効とならないため、せん断補強鉄筋の配置間隔を100mmから175mmに広げることができる。

なお、端部ラーメンおよび中間ラーメンの地中横梁 ($a/d=1.4$) においては、端部ラーメンでの上層横梁と同様に、せん断補強鉄筋と軸方向鉄筋の削減が期待できることを確認している。せん断耐力の観点から、端部ラーメンと中間部ラーメンにおける上層横梁の大きな違いは a/d であり、 a/d が小さいほど、本検討における端部ラーメンや地中横梁と同様な傾向になると考えられる。

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、従前標準と比較して、水結合材比 W/B や水掛かりの程度に応じた区分に応じて、従前標準と比較して増加する場合と減少する場合がある。
- (2) 接合部においては、鋼材に関する構造細目の見直しにより、帯鉄筋量を削減できる。
- (3) 縦梁においては、収縮およびクリープ等の影響によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値 ϵ'_{csd} の見直しにより、軸方向鉄筋量を削減できる場合がある。
- (4) 横梁においては、両端固定支持された棒部材のせん断耐力式の導入により、せん断補強鉄筋量および軸方向鉄筋量を削減できる場合がある。

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