

# 鉄道総研報告

第37巻 第11号

2023年11月

## 解説

- 施設 鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）の改訂概要  
..... 渡辺健，田所敏弥，池田学，岡本大（1）
- 施設 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  
..... 田所敏弥，渡辺健，池田学，岡本大（7）
- 施設 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  
..... 渡辺健，池田学，岡本大（15）
- 施設 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  
..... 渡辺健，中田裕喜，轟俊太郎（25）
- 施設 鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）「第Ⅳ編 支承構造」の要旨  
..... 池田学，田所敏弥，轟俊太郎，豊岡亮洋（35）

## 調査報告

- 施設 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（41）
- 施設 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（45）



# 鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）の改訂概要

渡辺 健\* 田所 敏弥\* 池田 学\*\* 岡本 大\*\*\*

## Outline of Revised Design Standard and Commentary for Railway Structures (Concrete Structures)

Ken WATANABE Toshiya TADOKORO Manabu IKEDA Masaru OKAMOTO

Design Standard and Commentary for Railway Structures (Concrete Structures) was revised in January of 2023. In this revision, in addition to reorganization of the previous design standards established mainly for each type of structure and material, the introduction of the latest verification techniques results in making the design standards easier to use. The application of the revised design standard to design practice will lead to realizing superior railway structures.

キーワード：コンクリート構造物，基本原則，構造要素，部位・部材

## 1. はじめに

「鉄道構造物等設計標準（コンクリート構造物）」が、2022（令和4）年12月に通達された。本稿では、2023（令和5）年1月に発刊された「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、本標準）の改訂の概要について紹介する。

## 2. 改訂の背景

### 2.1 鉄道構造物の設計に関する技術基準体系

「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」<sup>2)</sup>（以下、技術基準省令）は、2001（平成13）年12月より性能規定型へ改正された。技術基準省令は、第1条においてその目的を「安全な輸送及び安定的な輸送の確保を図り、もって公共の福祉の増進に資すること」と規定しており、人や物の安全確保や、技術的及び経済的実現性を前提に列車等の運行に対応した施設、車両等が求められている。また、同第24条の構造物では、「土工、橋りょう、トンネルその他の構造物は予想される荷重に耐えるものであって、かつ、列車荷重、衝撃等に起因した構造物の変位によって車両の安全な走行に支障を及ぼすおそれのないものでなければならない。」と規定しており、鉄道の土木構造物が保有すべき機能が示されている。

鉄道構造物等設計標準・同解説（以下、設計標準）は、技術基準省令の解釈を、強制力を持たないかたちで具体化、数値化して明示した解釈基準（通達）に、解釈基準

の設定根拠、考え方等をまとめた解説を示したものとなっている。2022（令和4）年度までに、すべての設計標準が性能照査型設計法に移行された。

### 2.2 鉄道コンクリート構造物の設計標準改訂の経緯

表1に、鉄道コンクリート構造物の技術基準の変遷を示す。黎明期、コンクリート構造物の設計・施工は、技術者の裁量に委ねられていたが、1914（大正3）年に鉄筋混凝土橋梁設計心得が制定され、統一した考えが示された。これは、1931（昭和6）年に制定される土木学会コンクリート標準示方書の原点にもなっている。1955（昭和30）年では2編構成となっており、第1編には荷重や応力度といった共通事項を集約した総則を、第2編には版、梁、柱といった部材の特有の事項を示した各論で構成されている。1970（昭和45）年では、在来線と新幹線のそれぞれで定められていた基準の統合がされた。その後、2回の改訂を経たのちに、1992（平成4）年では限界状態設計法に移行された。それまで用いられていた許容応力度設計法は、部材の各断面に作用する応力度が、部材を構成する材料の許容応力度以下であることを確認することにより照査する設計法である。一方、限界状態設計法は、限界状態を設定し、それぞれの限界状態に応じて設定された限界値を満足することを、部分安全係数法により照査する手法である。作用や材料、構造解析法等のそれぞれに安全係数を設定するため、最新の技術が反映しやすい。また、設計者は、構造物の状態を、照査結果から明確に意識することが比較的容易である。

そして、技術基準省令の性能規定に対応して、2004（平成16）年に改訂された鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）<sup>3)</sup>（以下、H16コンクリート標準）では、性能照査型設計法が導入された。これは、

\* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室  
\*\* 鉄道力学研究部 構造力学研究室  
\*\*\* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

表 1 鉄道コンクリート構造物の設計標準等の改訂経緯

制定・改訂年	名称	備考
1914(大正3)年	鉄筋混凝土橋梁設計心得	・鉄道における初めての設計施工基準
1955(昭和30)年 1958(昭和33)年	無筋コンクリートおよび鉄筋コンクリート 土木構造物の設計基準(案)	・1949(昭和24)年土木学会鉄筋コンクリート標準示方書を基本に作成 ・1編総則, 2編各論, の構成
1961(昭和36)年	新幹線構造物設計基準(案)	・新幹線固有の荷重, 構造物の許容変位
1965(昭和40)年	プレストレストコンクリート鉄道橋設計施工基準(案)	・1961(昭和36)年土木学会制定プレストレストコンクリート設計施工指針を基に作成
1970(昭和45)年	建造物設計標準(鉄筋コンクリート構造物および無筋コンクリート構造物, プレストレストコンクリート鉄道橋)	・在来線と新幹線の設計基準規定を1つに統合 ・構造物の設計に関わる基本的な内容を網羅
1972(昭和47)年	全国新幹線網建造物設計標準(上越, 東北, 成田新幹線用)	・新幹線特有の事項を制定
1974(昭和49)年	建造物設計標準(鉄筋コンクリート構造物および無筋コンクリート構造物, プレストレストコンクリート鉄道橋)	・国鉄内外の技術の進展を踏まえ, 土木学会に委託した委員会成果に基づき改訂
1983(昭和58)年	建造物設計標準(鉄筋コンクリート構造物および無筋コンクリート構造物, プレストレストコンクリート鉄道橋)	・許容応力度設計法を基本とし, 限界状態設計法概念が盛り込まれる
1992(平成4)年	鉄道構造物等設計標準(コンクリート構造物)	・限界状態設計法の導入
2004(平成16)年	鉄道構造物等設計標準(コンクリート構造物)	・性能照査型設計法の導入
2023(令和5)年	鉄道構造物等設計標準(コンクリート構造物)	・性能照査型設計法, 3層構造の導入

構造物が保有すべき性能を明示したうえで、設定した性能を確保する設計方法であり、照査法として部分安全係数法が踏襲されている。新材料や新構造の適用に柔軟であり、国際的調和性が高く、維持管理においても親和性の高い設計法である。2023(令和5)年に改訂された本標準は、性能照査型設計法を踏襲し、次節以降で示す課題や方針に従い改訂した。

### 2.3 鉄道コンクリート構造物を取り巻く課題

最近の鉄道コンクリート構造物を取り巻く課題と、求められる対応を以下に示す。

- 現行の設計標準は、コンクリート構造物、鋼・合成構造物等、構造の種別ごとにまとめられているもの、土構造物、トンネル等、構造物の種別ごとにまとめられているもの、あるいは変位制限や耐震設計等、特定の作用や性能項目を対象にまとめられているものがあり、設計実務における適用方法が複雑であったことに対して、構造物の種別に応じて適用する設計標準や、鉄道システムを構成する構造物と部位・部材との関係性を明確にする構成とすること。
- 現行の各設計標準では、設計等の行為が統一されていないこと<sup>4)</sup>に対して、鉄道システムを構成する鉄道構造物として共通の設計の考え方や基本的事項を示すこと。
- 要求性能に対し合理的な構造物を設計するために、照査の前段である構造物の形式や諸元等を設定する構造計画を含めること。
- 安全かつ経済的なコンクリート構造物を設計するために、従来の標準的な照査法の適用範囲を明確にし、従来の照査法が適用できない複雑な構造物や作用に対して最新の解析手法を適用できること。
- 骨材事情の変化やコンクリート構造物の耐久性の問題に対して、建設地点の材料の特性や供用中に受ける気

象の影響等、地域の実情に配慮した設計により、供用期間にわたり構造物の性能を確保できること。

- 様々な建設条件や建設労働者の減少に対応するために、施工に配慮した設計法であること。
- 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震や平成28年(2016年)熊本地震における被害を踏まえ、激甚化する自然災害に対して、早期復旧しやすい構造とすること。

上記を踏まえ、2017(平成29)年度より、「鉄道コンクリート構造物設計標準に関する委員会」を設置し、4年にわたり検討を行った。

## 3. 改訂の概要

### 3.1 基本方針

H16コンクリート標準は、刊行後18年以上が経過しており、コンクリート構造物に関する最新技術を踏まえた見直しをするほか、鉄道構造物が鉄道システムとしてより一層有機的に機能するため、設計標準の構成を新たに示すこととした。2.3に示した社会情勢や鉄道事業を取り巻く状況の急激な変化を踏まえ、鉄道総研の研究成果の他、2017年制定土木学会コンクリート標準示方書(設計編)<sup>5)</sup>等を参考に、鉄道固有の技術について見直しをはかりつつ、最新技術で補うことなどに努めた。また、解釈基準として、「具体的な数値や仕様を示す」こととし、「数値や仕様で示すことが困難な場合」には、「設計の方法や検証の方法等を示す」ことに努めた<sup>1)</sup>。

### 3.2 設計標準の全体構成

橋りょう、土構造物、トンネル等の鉄道構造物は鉄道システムを構成しており、これらの設計の考え方や要求性能の設定、照査等の基本的事項は共通であることが望

ましい。そこで、本標準は、すべての構造物を対象とした基本原則<sup>4)</sup>について検討し、設計標準の体系を再編した。具体的には、コンクリート構造物に限らず、設計標準が対象とするすべての鉄道構造物の設計における基本的事項をまとめた基本原則編（第1層）を新たに制定した。そして、この基本原則を各構造物の設計に関して具現化した事項として、構造物と構造要素の設計に関する事項をまとめた構造物・構造要素編（第2層）を、さらに、設計に必要な材料・構造特有の事項として、構造要素を構成する部位・部材の設計に関する事項をまとめた部位・部材編（第3層）を定めた（図1）。本標準は、以下の通りに構成される。

「第I編 基本原則」（以下、基本原則編）：要求性能や設計耐用期間等、鉄道構造物の設計に対し共通となる事項を規定<sup>1)</sup>。

「第II編 橋りょう」（以下、橋りょう編）：第I編に基づき、橋りょう（高架橋も含む）の構造計画や作用、構造解析、照査の方法等を規定<sup>6)</sup>。

「第III編 コンクリート構造」（以下、コンクリート構造編）：第I編および第II編に基づき、コンクリート構造となる部位・部材ごとに適用要件、応答値、限界値等を規定<sup>7)</sup>。

「第IV編 支承構造」（以下、支承構造編）：第I編および第II編に基づき、コンクリート橋りょうの支承部の適用要件、応答値、限界値等を規定。鋼・合成橋りょうの支承部にも今後適用されることを想定<sup>8)</sup>。

橋りょうの照査は、橋りょう編に従い橋りょう、ある

いは桁、橋脚等、橋りょうを構成する構造要素に対して行うことを原則とした。構造要素に対して行う場合には、すべての構造要素が照査を満足することを確かめることにより、橋りょうが照査を満足することとなる。ただし、一般的な設計条件では、従来と同様に、梁、支承部、橋脚く体、フーチング、杭等、構造要素を構成する部位・部材に対して行ってもよいものとした。この場合、コンクリート構造編、支承構造編に従い、すべての部位・部材が照査を満足することを確かめることで、構造要素が照査を満足することになる。

図2に、H16コンクリート標準および関連標準から本標準の各編に移設した状況を示す。H16コンクリート標準の内容を更新して本標準に反映した。その他、関連する標準<sup>9)~14)</sup>から橋りょう編、コンクリート構造編、

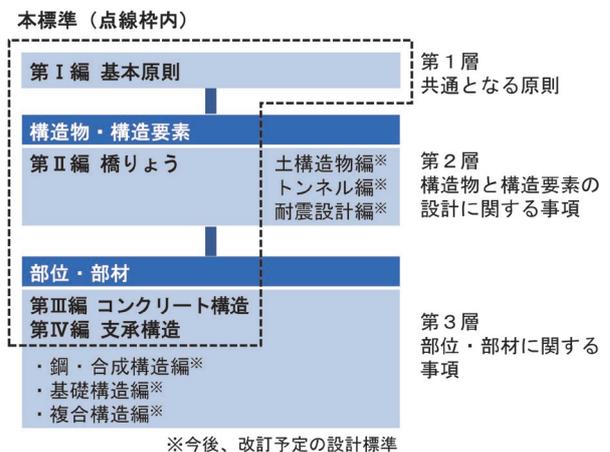


図1 本標準および将来の設計標準の体系

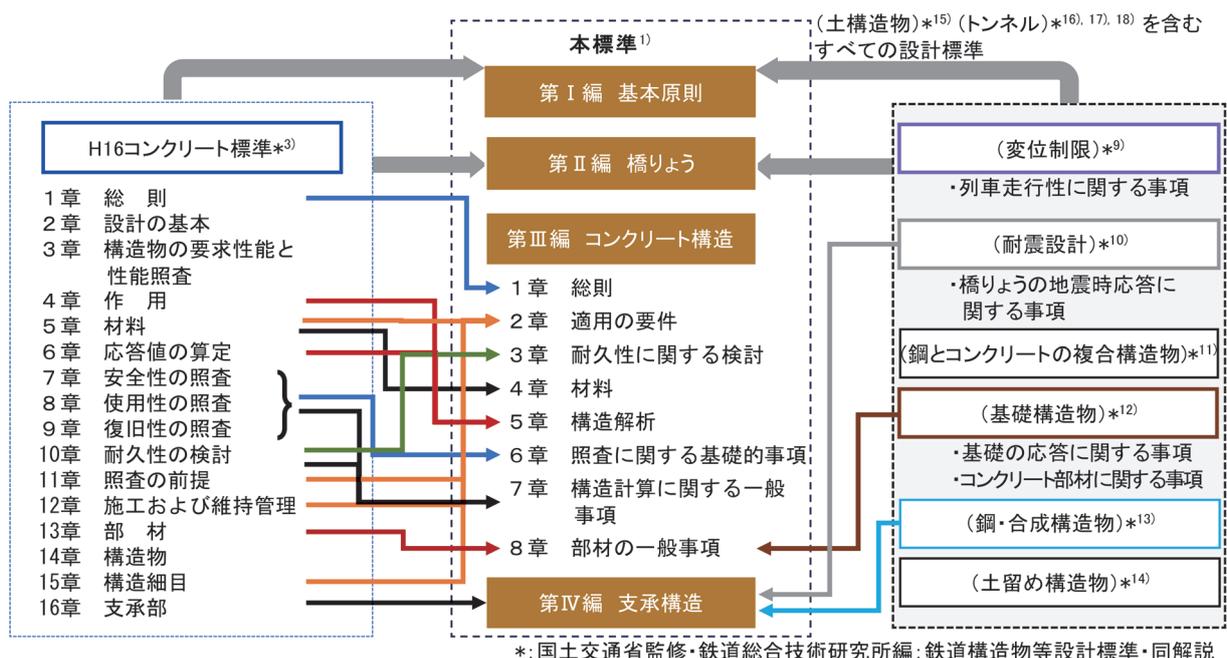


図2 H16コンクリート標準および関連標準から本標準への主な移設状況

支承構造編に関する事項を、それぞれの編に転載した。また、すべての設計標準<sup>9)~18)</sup>を踏まえ、基本原則編を作成した。

### 3.3 設計の基本

技術基準省令を参考に、「鉄道システム」を用語として新たに定義した。構造物の設計では、鉄道システムとしての目的および構造物の機能に応じた要求性能とその水準を定め、構造計画、調査および構造詳細の設定を行い、照査を行うものとした。ここで、構造計画は、H16コンクリート標準では記載していないが、より優れた構造物を設計するための重要な設計行為であるという認識のもと、追加した。持続可能な社会を実現する観点から「社会との適合性」<sup>4)</sup>、構造物の壊滅的な被害を防ぐ危機耐性の観点から、「冗長性や頑健性」<sup>4)</sup>を構造計画や要求性能の水準の設定において求めることとした。

### 3.4 安全性等に関する設計法

安全かつ経済的なコンクリート橋りょうを設計するために、従来の照査法が適用できない複雑な構造物や作用に対しては、最新の手法が適用しやすい記載とした。

橋りょう編では、橋りょうを、構造要素（桁、橋脚、橋台）、部位・部材（梁、スラブ、基礎構造、支承部等）に区分し、これらの区分に応じた照査法を示した。橋りょうまたは各構造要素に着目した照査により、例えばラーメン高架橋のような不静定構造物では、一つの部材が破壊してもすぐに構造物の限界状態に至るものではないため、より合理的な照査が可能となる。

コンクリート構造編では、コンクリート部材の破壊の照査等に用いるせん断耐力について、ラーメン高架橋の部材を想定した両端固定支持された棒部材の設計せん断耐力の算定法<sup>19)</sup>を導入した。これにより、せん断スパン比が小さい場合に、同一の断面諸元である単純支持条件下の棒部材と比較して、せん断補強鉄筋の効果を大きく見込めることとした。さらに、非線形有限要素解析による照査法を、2017年制定土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕<sup>5)</sup>に基づき導入し、適用できるようにした。照査法を充実かつ高度化したことでより合理的に照査でき、また実績の多い構造物に対してはより省力的な照査が可能であり、設計者の豊かな創造力により、柔軟な設計解を提示することが可能となる。

### 3.5 地域の特異性や時間軸等を意識した設計法

時間軸を意識した設計法や、耐久性に関する検討を見直した。すなわち、コンクリート構造編では、建設地点の降雨状況や骨材の収縮の影響も考慮できるコンクリートの収縮ひずみの算定式<sup>20)</sup>や、収縮・クリープによるPC桁の長期変形を予測するための新たな構造解析手法

を示した。また、鋼材の腐食に関する検討では、従来の「中性化に関する検討」から「水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討」<sup>21)</sup>に変更し、塩化物イオン濃度の制限値を各種セメントや水結合材比に応じた値に更新した。

### 3.6 施工に配慮した設計法

コンクリート構造編では、プレキャスト構造や部材接合部の配筋量の適正化<sup>22)</sup>、高強度材料の活用<sup>23)</sup>、初期ひび割れの評価や施工工程を踏まえた構造物の長期挙動の評価等、確実な施工に資する技術の導入やそれを促す設計法について示した。

### 3.7 復旧しやすいコンクリート構造物の設計法

平成23年（2011年）東北地方太平洋沖地震や平成28年（2016年）熊本地震における被害を踏まえ、早期復旧しやすい構造物、地震復旧後も性能を確保できるコンクリート構造物の設計法について示した。

橋りょう編では、復旧性を確保するため、橋りょうの構造計画の段階で考慮すべき事項として、復旧作業のための進入路および作業ヤードの確保、修復困難な箇所の損傷の制御等について例示した。また、支承構造編では、例えば支承部のストッパー埋込み部において、損傷した場合の修復作業が困難となる桁端の遊間側より、桁座前面側を桁端の遊間側より先行して損傷させる等、修復しやすい箇所に損傷を制御することを示した。ストッパー埋込み部の耐力について鉄筋の配置等を考慮したより高精度の算定法を構築<sup>24)</sup>し、ストッパー埋込み部の鉄筋量を増やすことなく、地震時に修復しやすい箇所に損傷を制御することが可能であり、復旧にかかる費用等を削減できる。

## 4. まとめ

今回の改訂では、鉄道構造物が鉄道システムとしてより一層有機的に機能するために、主に構造物や材料の種別ごとに制定されたこれまでの設計標準の体系を再編するとともに、最新の照査技術を導入した。さらには、設計計算例や設計ツール等を順次整備する予定である。持続可能な社会が求められる中で、本標準が設計実務に適用されることで、従来の形に捉われず、より優れた鉄道構造物が実現できることを期待する。なお、各項目の具体的な内容は、別報でも詳しく報告する。

## 謝辞

本稿は、「鉄道コンクリート構造物設計標準に関する委員会」において審議した内容である。審議いただいた二羽淳一郎委員長（当時東京工業大学教授）、渡邊忠朋

幹事長（当時北武コンサルタント副社長）をはじめ、委員・幹事等の関係者各位のご尽力に対して、ここに謝意を表する。

## 文 献

- 1) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物），丸善出版，2023
- 2) 国土交通省鉄道局監修・土木関係技術基準調査研究会編：解説 鉄道に関する技術基準（土木編）第四版，2023
- 3) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物），丸善出版，2004
- 4) 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
- 5) 土木学会：2017年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕，丸善出版，2018
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 池田学，田所敏弥，轟俊太郎，豊岡亮洋：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）「第Ⅳ編 支承構造」の要旨，鉄道総研報告，Vol.37，No.11，pp.35-40，2023
- 9) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限），丸善出版，2006
- 10) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善出版，2012
- 11) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼とコンクリートの複合構造物），丸善出版，2016
- 12) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物），丸善出版，2012
- 13) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物），丸善出版，2009
- 14) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（土留め構造物），丸善出版，2012
- 15) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（土構造物），丸善出版，2007
- 16) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（トンネル・開削編），丸善出版，2021
- 17) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（トンネル・シールド編），丸善出版，2022
- 18) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（トンネル・山岳編），丸善出版，2022
- 19) 中田裕喜，渡辺健，田所敏弥：両端固定支持されたRCはりのせん断耐力算定式の提案，令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会，V-621，2022
- 20) 渡辺健，中村麻美，石田哲也，渡邊忠朋：混合セメントを考慮したコンクリートの収縮ひずみ予測式，鉄道総研報告，Vol.37，No.1，pp.11-19，2023
- 21) 轟俊太郎，石田哲也，上田洋，田所敏弥：水の浸透と中性化によるコンクリート構造物中の鉄筋の腐食に関する設計法，鉄道総研報告，Vol.37，No.10，pp.1-8，2023
- 22) 中田裕喜，渡辺健，田所敏弥：RCラーメン高架橋の柱はり接合部の構造細目が耐力に及ぼす影響，鉄道総研報告，Vol.37，No.1，pp.29-35，2023
- 23) 佐藤祐子，中田裕喜，田所敏弥，渡辺健：高強度鉄筋を用いたRC柱の損傷性状と変形性能算定式の適用性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.44，No.2，pp.175-180，2022
- 24) 轟俊太郎，森勇樹，田所敏弥，渡辺健：鋼角ストッパー埋込み部の設計耐力算定式，鉄道総研報告，Vol.37，No.1，pp.1-9，2023



# 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

田所 敏弥\* 渡辺 健\* 池田 学\*\* 岡本 大\*\*\*

Design Standard and Commentary for Railway Structures (Concrete Structures)  
Outline of “Part I: General Principles”

Toshiya TADOKORO Ken WATANABE Manabu IKEDA Masaru OKAMOTO

The functional requirements for a railway system that railway structures must satisfy are the same regardless of the type of structure, such as bridges, earth structures, and tunnels. Therefore, in order for railway structures to function as members of a railway system, “Design Standard and Commentary for Railway Structures (Concrete Structures), Part I: General Principles” was established, which includes the basic policy of railway structure design by unifying the general items such as design concepts, performance requirements, and verification for all structures that compose the railway system.

キーワード：鉄道構造物，基本原則，設計，要求性能，照査，社会との適合性

## 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、本標準）を 2023（令和 5）年 1 月に発刊した。今回の改訂では、コンクリート構造物の設計に関する最新の照査技術の導入だけでなく、鉄道構造物等設計標準（以下、設計標準）の体系を再編し、橋りょう、土構造物、トンネル等の構造物の種別によらず共通であるべき設計の基本的事項をまとめた「第 I 編 基本原則」（以下、基本原則編）を新たに制定した。本稿では、基本原則編について解説する。

## 2. 設計標準の再編と基本原則編の制定

### 2.1 設計標準の再編の背景

2002 年に国土交通省より示された「土木・建築にかかる設計の基本について」<sup>2)</sup>では、「土木構造物、建築構造物、あるいは、コンクリート構造、鋼構造、基礎構造等の設計においては、構造種別に関係なく、共通事項は共通に扱い、分野および構造種別に依存する部分はそれぞれで規定する」という基本的方針が示されている。

土木学会では、構造種別に対応した示方書が発刊されているが、これらの示方書の共通事項をまとめた「土木構造物共通示方書<sup>3)</sup>」が 2010 年に制定され、2016 年に

改訂されている。さらに、コンクリート標準示方書では、供用期間にわたるコンクリート構造物の性能確保について、設計、施工、維持管理段階における基本的な考え方をまとめた「基本原則編<sup>4)</sup>」が 2012 年に制定され、2022 年に改訂されている。

一方、鉄道構造物の設計は、構造物や部材の種別ごと、あるいは、特定の作用や性能項目ごとに制定された設計標準に従って行われている。表 1 に、従来の設計標準が適用される構造物を示す。橋りょうの設計に適用される設計標準は、「鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）」（以下、H16 コンクリート標準<sup>5)</sup>、「鉄道構造物設計標準・同解説（鋼・合成構造物）<sup>6)</sup>」（以下、鋼・合成標準）「鉄道構造物設計標準・同解説（鋼とコンクリートの複合構造物）<sup>7)</sup>」（以下、複合標準）「鉄道構造物設計標準・同解説（基礎構造物）<sup>8)</sup>」（以下、基礎標準）があり、橋台を含めると「鉄道構造物設計標準・同解説（土留め構造物）<sup>9)</sup>」（以下、土留め標準）がある。一方、盛土・切土の設計に適用される設計標準として、「鉄道構造物設計標準・同解説（土構造物）<sup>10)</sup>」（以下、土構造物標準）、トンネルの設計に適用される設計標準として、「鉄道構造物設計標準・同解説（トンネル・開削編、シールド編、山岳編）<sup>11) 12) 13)</sup>」（以下、トンネル標準）がある。その他に、各構造物の設計には「鉄道構造物設計標準・同解説（耐震設計）<sup>14)</sup>」（以下、耐震標準）「鉄道構造物設計標準・同解説（変位制限）<sup>15)</sup>」（以下、変位制限標準）が適用される。このように、設計標準には、特定の構造物を適用の対象としているものと特定の構造物を適用の対象としていないもの、さらに特定の作用や性能項目を対象にしたものがある。

\* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

\*\* 鉄道力学研究部 構造力学研究室

\*\*\* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

表 1 各設計標準が適用される構造物

適用される構造物		鉄 道 構 造 物 等 設 計 標 準								
		コンクリート構造物(H16)	鋼・合成構造物	複合構造物	基礎構造物	土構造物	土留め構造物	トンネル	耐震設計	変位制限
橋りょう	桁	○	○	○	—	—	—	—	△	○
	高架橋・橋脚	○	○	○	○	—	—	—	○	○
	橋台	○	—	—	○	△	○	—	○	○
土構造物	盛土・切土	—	—	—	—	○	△	—	○	○
	擁壁	△	—	—	△	△	○	—	○	△
トンネル	開削トンネル	△	△	△	△	—	—	○	○	—
	シールドトンネル	△	△	△	△	—	—	○	○	—
	山岳トンネル	△	—	—	△	—	—	○	○	—

○：適用（構造物に関する記載のある設計標準），△：準用（構造物に関する記載はないが設計実務で適用される場合がある設計標準），—：適用外

表 2 各設計標準が対象とする行為

対象とする行為	鉄 道 構 造 物 等 設 計 標 準								
	コンクリート構造物(H16)	鋼・合成構造物	複合構造物	基礎構造物	土構造物	土留め構造物	トンネル	耐震設計	変位制限
調査	×	×	×	○	○	○	○	×	×
構造計画	×	×*	×	○	○	○	○	○	×
照査	○	○	○	○	○	○	○	○	○
施工	×	×*	×	×	○	×	○	×	×

○：対象であることが明記されている行為，×：対象であることが明記されていない行為，\*：付属資料に記載あり

表 2 に、各設計標準が対象とする設計等の行為を示す。各設計標準の適用の範囲において示される行為は、照査のみを対象としているものとして、H16 コンクリート標準、鋼・合成標準、複合標準、変位制限標準がある。ただし、鋼・合成標準では、付属資料において、構造計画と施工が示されている。また、構造計画を含めているものとして、耐震標準、調査と構造計画を含めているものとして、基礎標準、土留め標準、調査と構造計画、施工を含めているものとして、土構造物標準、トンネル標準がある。このように、すべての設計標準において照査が対象であることは共通しているが、調査、構造計画、施工の対応は各設計標準で異なっている。

適用の対象となる構造物や設計等の行為は、各設計標準で異なっており、設計実務においては、設計標準の適用方法が複雑となり、経験の少ない技術者においては、わかりにくい場合がある考えられるため、対応が求められていた。そのため、今回の改訂では、設計実務において、より使いやすく、より優れた鉄道構造物を実現できる設計標準となることを目指し、設計標準の体系を再編することとした。なお、今回の改訂では、H16 コンクリート標準および変位制限標準を本標準にすべて取り込み、その他の設計標準についても、関連する項目を取り込むこととした。

## 2.2 設計標準の再編と基本原則編の制定方針

橋りょう、土構造物、トンネル等の鉄道構造物は鉄道システムを構成しており、これらの設計の考え方や要求性能の設定、照査等の基本的事項は共通であることが望ましい。そのため、今回の改訂では、すべての構造物を対象とした基本原則について検討し、設計標準の体系を再編した。

具体的には、コンクリート構造物に限らず、すべての鉄道構造物の設計における基本的事項（第 1 層）をまとめた基本原則編を新たに制定した。また、作用、構造解析、照査の具体的な方法は、橋りょう、土構造物、トンネル等の構造物の種別ごとに異なることから、構造物・構造要素の設計に関する事項（第 2 層）をまとめた「第 II 編 橋りょう」<sup>16)</sup>（以下、橋りょう編）を制定した。さらに、構造物・構造要素を構成する部位・部材に関する事項（第 3 層）をまとめた「第 III 編 コンクリート構造」<sup>17)</sup>（以下、コンクリート構造編）「第 IV 編 支承構造」<sup>18)</sup>（以下、支承構造編）を制定した。これらの関係を、今後改訂予定の設計標準も含めて図 1 に示した。このような三階層の体系に移行することによって、構造物の設計において適用すべき設計標準がより明確になるものと考えられる。また、技術の進歩に伴い改訂が必要となる頻度は、第 1 層よりも第 2 層、第 2 層よりも第 3 層の

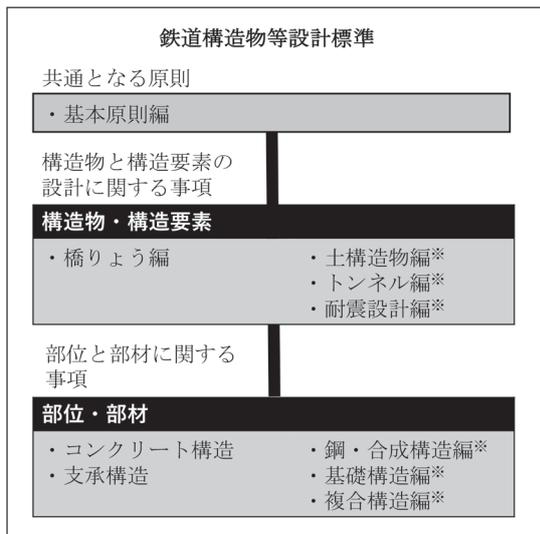


図1 本標準および将来の設計標準の体系

1 章 総 則

1. 1 適用の範囲

1. 2 用語の定義

1. 3 記 号

2 章 設計の基本

3 章 要求性能

4 章 構造計画および調査

5 章 照 査

5. 1 一 般

5. 2 照査の前提

5. 3 限界状態に対する照査

5. 4 適合みなし仕様

5. 5 記録・保存と情報伝達

6 章 作 用

7 章 材料および地盤

8 章 構造解析

9 章 安全性の照査

10 章 使用性の照査

11 章 復旧性の照査

図2 基本原則編の目次構成

方が高くなると考えられることから、第3層および第2層を定期的に改訂することにより、最新の技術を適切に導入することが可能になると考えられる。

ここで、基本原則編の目次構成を図2に示す。従来は各設計標準で対象とする行為が異なっていたが、基本原則編では、照査のみならず、構造計画、調査を含んだ一連の設計行為の基本的事項をすべての構造物に共通なものとして示した。

### 3. 基本原則編の要旨

#### 3.1 総則（1章）

##### 3.1.1 適用の範囲

本標準は、構造物を新設する場合の設計に適用するものとした。一方、既設構造物の検討では、適用範囲を考慮した上で、必要に応じて本標準に示す照査方法を用いてよいものとした。なお、実構造物を適切にモデル化した実験や解析等、工学的な方法で所要の性能を満足することを確かめた場合には、必ずしも本標準によらなくてよいが、本標準の趣旨を十分に尊重し、実状に適合するように設計する必要があることを示した。

##### 3.1.2 用語の定義

基本原則編で用いる用語は、他編にも共通して用いられることを考慮し、技術基準省令や土木学会コンクリート標準示方書等を参考に定義した。主な用語の定義を以下に示す。

鉄道システム：鉄道による旅客または貨物の運送を目的とする施設および車両により構成するシステム

鉄道構造物：列車を支持する、もしくは列車の走行空間を確保するための工作物

設計：構造物の要求性能の設定、構造計画、調査、構造詳細の設定、照査で構成される行為

要求性能：鉄道システムとしての目的および構造物の機能に応じて、構造物に求められる性能

構造計画：建設地点の環境、構造、施工および維持管理等の条件を総合的に考慮し、構造の種別、形式、形状、主要寸法、および使用材料等を決定する行為

構造詳細：構造物の具体的な形状、寸法等

照 査：構造物が、要求性能を満たしているか否かを適切な供試体による確認実験や、経験的かつ理論的確認のある解析による方法等により判定する行為

適合みなし仕様：要求性能を満足しているとみなされる解を例示したもの、過去の実績に基づいて規定される構造材料や形状、寸法

#### 3.2 設計の基本（2章）

##### 3.2.1 設計の目的

設計の目的、手順、および設計において留意すべき事項について示した。構造物の設計は、「構造物を含む鉄道システムによって、安全および安定的な輸送の確保を図る」ことを目的に行う。すなわち、構造物単体ではなく、それを含む鉄道システムが省令第一条の主旨（安全な輸送および安定的な輸送の確保）を満たさなければならないことを明示した。ただし、本文の主語は「構造物の設計」であり、鉄道システムを構成する構造物以外の構成要素には適用されないこととし、構造物の設計は、鉄道システムの構成要素の相互の影響を踏まえた上で行うことを示した。ここで、「安全な輸送」とは、具体的

表3 要求性能と性能項目・照査指標の例

要求性能	性能項目	照査指標の例	考慮するおもな作用
安全性	走行安全性*1	変位・変形，力	設定するすべての作用
	構造安全性	応力度，力	
	公衆安全性*2	鋼材腐食深さ，塩化物イオン濃度	
使用性	乗り心地	変位・変形	通常の使用時に設定する変動作用
	外観*2	ひび割れ幅，応力度	
	保守*3	変位・変形，力，応力度	
	騒音・振動*2	騒音レベル，振動レベル	
復旧性	修復性*4	変位・変形，力，応力度	地震時に設定する偶発作用

\*1：走行安全性に関する項目として，常時の走行安全性および地震時の走行安全性に係る性能項目を設定する，\*2：必要に応じ設定される性能項目，\*3：保守には，軌道の損傷に関する保守も含まれる，\*4：修復性には，地震時の軌道の損傷に係る変位も含まれる

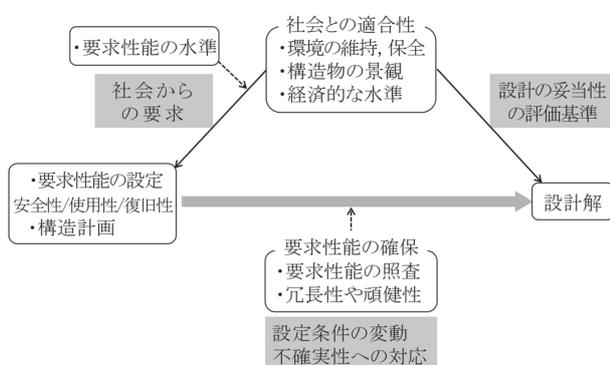


図3 設計における社会との適合性の位置づけ

には旅客，第三者，鉄道係員，または第三者等の財産が対象である。一方，「安定的な輸送」については，実際に列車が運行する場合に必要な能力，すなわち，列車等の運行に対応した施設，車両等が整備されていることを求めるものであり，技術的および経済的実現性を前提とした輸送の安定性を確保するものである。つまり，保守が容易であることや，災害等に起因する機能の低下が社会に重大な影響をおよぼさないことも含まれる。

構造物の設計では，目的および機能に応じた要求性能を設定し，その水準を定め，構造計画，調査および構造詳細を設定し，照査を行う。H16 コンクリート標準では，対象とする行為を照査に限定しているため，構造計画については，記載していない。しかし，構造物が要求性能を満足する場合であっても，構造計画が十分になされない場合，供用後に様々な問題が生じることがある。そこで，構造計画は，より優れた構造物を設計するための重要な設計行為であるという認識のもと，基本原則編では，適用の範囲を構造計画も含めた設計全般とし，要求性能の設定から構造計画，調査，構造詳細の設定，照査までの基本的事項を示した。

### 3.2.2 社会との適合性

構造物は，人が安全・安心で豊かな生活を営み，社会の持続可能な発展を支えるために整備される一方で，社

会に様々な影響をおよぼす。構造物の整備にあたって，地球環境や地域環境が維持，保全されること，自然環境に配慮した景観であること，ならび経済的な水準が適切で，社会が長期的に持続可能であることが求められる。経済的な水準には，建設費や維持管理費のほか，地震等の復旧費も含まれる。本標準では，これらの環境および景観，経済的な水準に適合することを社会との適合性と称した。設計における社会との適合性の位置づけを図3に示す。なお，本標準では，社会との適合性は，照査の対象とはせず，「要求性能の設定」「構造計画」において評価し，設計の妥当性を評価する基準とするものとした。

「構造計画」は，構造物の建設地点の条件を考慮し，供用期間中の構造物の挙動の変化等，設計条件の変動や不確実性の影響に対応できるように，冗長性や頑健性を有する必要がある。すなわち，構造物は，設計で設定した条件を超える事象により構造物の一部が損傷した場合でも，急激な性能の低下を生じないための冗長性や，作用や材料の特性が設計において設定した条件から変化したとしても，設計で想定した性能を構造物が保持することのできる頑健性を有している必要がある。例えば，大規模地震において，設定した大きさを上回る作用に対しては，構造物を曲げ破壊先行型として設計することや不静定なラーメン構造を適用すること，曲げ破壊やせん断破壊の損傷レベルの余裕度を十分に確保すること等により冗長性や頑健性が確保される。このような災害時の復旧コストに対する経済的な水準の確保も社会との適合性の配慮に相当することを示した。

## 3.3 要求性能（3章）

### 3.3.1 要求性能の設定

構造物の設計では，様々な性能の中から適切な要求性能を設定する必要がある。本標準では，鉄道構造物の機能を踏まえ，要求性能として安全性，使用性，復旧性を設定するものとした。本標準における要求性能と性能項目・照査指標の例を表3に示す。

安全性：設定するすべての作用のもとで、構造物が使用者や周辺の人の生命や財産を脅かさないための性能

使用性：通常の使用時に設定する変動作用等のもとで、構造物を正常に使用できるための性能

復旧性：地震時に設定する偶発作用等のもとで、構造物の機能が低下した場合に機能回復が行えるための性能

安全性については、H16 コンクリート標準の「破壊」「疲労破壊」をあわせて「構造安全性」とした。

使用性については、H16 コンクリート標準の復旧性のうち、「想定される作用のもとで、構造物が損傷を受けない性能」は、構造物を正常に使用するための性能であることから、使用性に関する性能項目として、「保守」を新設した。そのため、本標準では、従来のL1地震動であるしばしば生じる大きさの地震動は、通常の使用時に考慮するものとし、変動作用として扱うものとした。「保守」は、構造物の損傷、残留変位が通常の保守作業の範囲で、正常な使用を妨げないようにするための性能とし、H16 コンクリート標準の常時の復旧性やL1地震動に対する復旧性に関する性能項目に対応する。

復旧性については、H16 コンクリート標準における性能項目である「損傷」の名称を「修復性」に変更した。これは、すべての構造物を対象に損傷だけでなく、残留変位等の限界状態も想定しているためである。

### 3.3.2 要求性能の水準

要求性能のうち、使用性および復旧性については、要求性能の水準を以下に示す性能レベルから設定するものとした。また、その水準は、社会との適合性のほか、構造物の供用期間と重要度等を考慮して定めるものとした。

性能レベル1：機能は健全で修復をしないで使用可能な状態

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

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

「保守」に関する使用性の照査に関しては、性能レベル1を設定し、修復性に関する復旧性の照査に関しては性能レベル1～3を設定することができる。

### 3.4 構造計画および調査（4章）

構造計画では、持続可能な社会を実現するため、社会との適合性に優れ、要求性能を満足するよう構造物の種類および構造形式を選定し、構造物の配置、形状、寸法、使用材料等を選定することを求めた。また、構造計画では、施工および維持管理が確実かつ容易にできるように配慮すべき事項を示した。さらに、限界値の変化に与える影響に対応できるよう、構造物の冗長性や頑健性を確保

することを求めた。

調査では、設計、施工、維持管理に関わる重要な役割を担うことを示し、建設地点の状況や構造物の規模等に応じて行うものとした。

### 3.5 照査（5章）

#### 3.5.1 限界状態に対する照査

照査は、安全性、使用性、復旧性に対して行う。照査の方法は、各要求性能に対応した限界状態を設定し、構造物が限界状態に至らないことを確認する方法を用いるものとした。本標準では、式(1)を満足することを確認することにより行われる。

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

ここに、 ${}_tI_{Rd}$ ：時間 $t$ における設計応答値、 ${}_tI_{Ld}$ ：時間 $t$ における設計限界値、 $\gamma_i$ ：構造物係数

構造物の応答値や限界値は、施工段階における構造系の変化や劣化に伴う材料特性の変化、荷重履歴の影響等により時間の経過に伴って変化する。設計耐用期間内のすべての時点において、構造物が要求性能を満足することを確かめるには、構造物の性能の経時変化に及ぼす各種要因の影響を考慮し、照査する必要がある。そのため、本標準では、構造物の性能の経時変化を考慮することを原則とした。そのため、式(1)の各記号には、時間軸を考慮することを表現するため、添字 $t$ を付けた。時間の経過に伴って変化する構造物の性能を確認することで、設計から維持管理段階にわたる連続的な性能確保ができる体系とした。ただし、橋りょう編において、設計耐用期間内の材料劣化を構造物の性能に影響しない軽微な範囲に留める従来の検討方法について示している。

また、設計耐用期間にわたり性能確保するためには、適切な施工と維持管理が必要であることから、これらを照査の前提とした。適切な施工は、鉄道事業者の定める土木工事標準示方書等、適切な維持管理は、鉄道構造物等維持管理標準<sup>19)</sup>に示された事項とした。

#### 3.5.2 安全係数

部分係数法に用いる安全係数は、作用係数 $\gamma_F$ 、応答値係数 $\gamma_R$ 、材料係数 $\gamma_m$ 、限界値係数 $\gamma_L$ 、および構造物係数 $\gamma_i$ とした。H16 コンクリート標準における応答値算定時の構造解析の不確実性を考慮した構造解析係数 $\gamma_a$ は、応答値係数に名称変更した。応答値係数には、構造解析係数のほか、地盤調査の信頼度が応答値に与える影響である地盤の変形係数に関する地盤調査係数 $\gamma_{GE}$ 等がある。また、構造解析により限界値を定める場合のばらつきおよび不確実性等の影響は、新設した限界値係数に含まれる。限界値係数には、H16 コンクリート標準に

における部材係数 $\gamma_b$ のほか、基礎の支持力算定における地盤抵抗係数 $f_b$ 、盛土の安定の照査における円弧すべり抵抗係数 $f_{rs}$ がある。

### 3.5.3 適合みなし仕様

構造物によっては、形状寸法、使用材料、施工および維持管理の方法等が具体的に示され、適用条件下において、十分な実績から要求性能を満足することが確かめられた具体的な設計解がある。これを適合みなし仕様とし、これに従って構造物の設計を行う場合には、その形状寸法、使用材料の適用範囲が明確であること、施工および維持管理が実施できることを確かめるものとした。適合みなし仕様には、山岳トンネルの覆工の形状、巻厚、強度や盛土の法面高さや勾配等がある。

### 3.5.4 記録・保存と情報伝達

構造物の構造系と施工方法は、構造計算の仮定と一致する必要がある。構造物の確実な施工、および維持管理を実施するためには、設計で決定された構造物の種別、構造形式、構造詳細、使用材料、施工方法、維持管理方法等の情報を設計計算書や設計図等の設計図書に記録する必要がある。そして、施工や維持管理において活用できるように、施工や維持管理段階の措置等の記録とともに設計耐用期間にわたって保存するのがよいことを示した。また、設計図書に記載すべき事項として、構造計算の仮定や、施工過程等の条件、復旧性の照査における前提とした構造物周辺条件等についても、情報伝達するのがよいことを示した。

## 3.6 作用 (6章)

照査においては、施工時および設計耐用期間に設定する永久作用、変動作用および偶発作用を要求性能に応じて、適切な組合せのもとに考慮する。具体的な特性値、設計作用の組合せは、橋りょう編に示した。

## 3.7 材料および地盤 (7章)

構造物の設計は、所要の品質を有した材料の使用を前提としている。ここでは、材料の選定、選定された材料の諸数値の設定、および地盤の調査や試験の種類と諸数値の設定について、基本的な考え方を示した。具体的な特性値については、コンクリート構造編、支承構造編、または、関連する各設計標準によるものとした。

## 3.8 構造解析 (8章)

構造解析は、応答値のみならず限界値の算定においても用いられるため、H16コンクリート標準の「応答値の算定」の章を「構造解析」に変更した。また、解析手法の検証と妥当性の確認を十分に行うことで、非線形有限要素解析等、様々な解析手法を制約なく導入できるようにした。時間軸の影響、材料非線形の考慮の有無、構

造物や作用のモデル化手法等、従来の2次元骨組みモデルに捉われない、多様な応答値と限界値の算定法を許容するが、信頼性と精度の確保に留意する必要があることを示した。モデル化および構造解析の方法は、橋りょう編、コンクリート構造編、支承構造編に示した。

## 3.9 安全性の照査、使用性の照査、復旧性の照査 (9~11章)

要求性能に対する照査は、要求性能と等価な限界状態を設定し、構造物の種別に応じた方法により行う。復旧性の照査は、修復性について行うが、要求性能の水準の設定において、構造物周辺の状況等の復旧の条件を考慮することから、本標準では、これまでの復旧性の名称使用の連続性を踏まえ、これらを含めて復旧性と称することにした。

## 4. おわりに

今回の改訂では、より優れた鉄道構造物を実現でき、より使いやすい設計標準を目指し、設計標準の体系を再編した。本標準の一部として制定された基本原則編では、鉄道システムを構成する構造物共通の設計の考え方、要求性能の設定、照査等の基本的事項を示し、設計実務における利便性の向上と将来の設計標準の改訂に向けて、各設計標準の基本的事項の統一を図った。今後、順次、基本原則に基づいて設計標準が改訂され、設計標準が新たな体系に移行することによって、より優れた鉄道構造物の設計がなされることを期待する。

## 文献

- 1) 国土交通省監修・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) 国土交通省：土木・建築にかかる設計の基本について，<https://www.mlit.go.jp/kisha/kisha02/13/131021/131021.pdf>（参照日：2023年8月25日）
- 3) 土木学会：2016年制定 土木構造物共通示方書 [基本編/構造計画編] [性能・作用編]，2016
- 4) 土木学会：2022年制定 コンクリート標準示方書 [基本原則編]，2023
- 5) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：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
- 6) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物），丸善，2009
- 7) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼とコンクリートの複合構造物），丸善，2016
- 8) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設

- 計標準・同解説（基礎構造物），丸善，2012
- 9) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（土留め構造物），丸善，2012
- 10) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（土構造物），丸善，2007
- 11) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（トンネル・開削編），丸善，2021
- 12) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（トンネル・シールド編），丸善，2022
- 13) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（トンネル・山岳編），丸善，2022
- 14) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），丸善，2012
- 15) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限），丸善，2006
- 16) 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
- 17) 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
- 18) 池田学，田所敏弥，轟俊太郎，豊岡亮洋：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）「第Ⅳ編 支承構造」の要旨，鉄道総研報告，Vol.37，No.11，pp.35-40，2023
- 19) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準（構造物編），2007.1



# 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

渡辺 健\* 池田 学\*\* 岡本 大\*\*\*

Design Standard and Commentary for Railway Structures (Concrete Structures)  
Outline of “Part II: Bridge Structures”

Ken WATANABE Manabu IKEDA Masaru OKAMOTO

This paper outlines Design Standard and Commentary for Railway Structures (Concrete Structures) “Part II: Bridge”. All technology related to the design of railway bridges is summarized in this Part II, which have been described commonly into related design standards. By developing “Part II: Bridge”, the detail of bridge dimension is optimized, not optimized only beams, columns, foundations, and other members. In addition, it supports to address compatibility with society and to evaluate redundancy and robustness.

キーワード：ラーメン高架橋，桁式橋りょう，構造要素，部位・部材，コンクリート橋

## 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）」（以下、本標準）を、2023（令和5）年1月に発刊した。今回の改訂により、基本原則編，構造物・構造要素編，部位・部材編の3階層で構成されることとなった<sup>1) 2)</sup>。本稿は，構造物・構造要素編に位置づけられる「第Ⅱ編 橋りょう」（以下、橋りょう編）について，構成や各章の概要を解説する。

## 2. 橋りょう編の作成方針

### 2.1 作成方針

「鉄道に関する技術上の基準を定める省令（平成十三年国土交通省令第百五十一号）」第二十四条（構造物）には、「土工，橋りょう，トンネルその他の構造物は，予想される荷重に耐えるものであって，かつ，列車荷重，衝撃等に起因した構造物の変位によって車両の安全な走行に支障を及ぼすおそれのないものでなければならない」とあり，この具体的な設計は設計標準によることとされている<sup>3)</sup>。土工とトンネルについては適用される明確な設計標準が整備されていたが，橋りょうに対しては特定の標準が存在していなかった。

そこで，橋りょう（以下，高架橋を含めて橋りょうとする）が，社会との適合性<sup>1) 2)</sup>への対応や，冗長性，頑

健性に関する評価等を実現するために，梁，柱，基礎など部材の最適化ではなく，橋りょうとしての全体最適化を図ることを目的に，橋りょうに対して，関連する設計標準の記載を集約し，明確に適用対象とした設計標準を作成することとした。

橋りょう編の目次構成は，「第Ⅰ編 基本原則」（以下，基本原則編<sup>2)</sup>）と同様である。構造物としての橋りょう全体を意識するとともに，コンクリート（RC，PC）構造のみでなく，将来的には鋼・合成構造，複合構造，あるいはその組合せで構成される，橋りょう全てに適用される原則的な内容とした。なお，橋りょう編で新たに定義した主な用語を3.1(2)に示しているので，併せて参照頂きたい。

### 2.2 橋りょう編と関連する設計標準

橋りょう編には，橋りょう，あるいは橋りょうを構成する橋脚，橋台，ラーメン高架橋等の構造要素の設計に必要な内容が網羅される必要がある。例えば，コンクリート橋の設計は，鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物<sup>4)</sup>）（以下，H16コンクリート標準）の他，鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限<sup>5)</sup>）（以下，変位制限標準），鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼とコンクリートの複合構造物<sup>6)</sup>）（以下，複合標準），鉄道構造物等設計標準・同解説（基礎構造物<sup>7)</sup>）（以下，基礎標準），鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計<sup>8)</sup>）（以下，耐震標準），鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物<sup>9)</sup>）（以下，鋼・合成標準），鉄道構造物等設計標準・同解説（土留め構造物<sup>10)</sup>）（以下，土留め標準）等に含む必要があった。今回の改訂では，表1に示すように，コンクリート橋の設計に必要な内容を新規に追加す

\* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

\*\* 鉄道力学研究部 構造力学研究室

\*\*\* 構造物技術研究部 鋼・複合構造研究室

表1 橋りょう編の目次構成と関連する設計標準の記載場所について

目次	記載事項	関連する設計標準の記載場所
1章 総則	橋りょう編の適用範囲, 用語の定義, 記号	[コン]等を基に作成
2章 設計の基本	設計耐用期間, 要求性能, 構造計画及び調査, 照査, 耐久性に関する検討, 記録・保存と情報伝達に関する基本事項	2.1~2.5 [コン] [変位]より作成 2.6~2.7 [コン] [複合]を基に作成
3章 構造計画	橋りょうを計画する上で考慮・検討すべき事項として, 構造計画の方法, 要求性能, 社会との適合性, 冗長性・頑健性, 施工, 維持管理, 維持管理, に関する検討	新規作成 3.2 【解説】 [基礎]から一部転載 3.3 【解説】 [耐震]から一部転載
4章 調査	構造計画等に必要となる橋りょうの立地 (構造条件, 気象条件, 周辺条件), 施工条件に関する調査	4.1, 4.3, 4.4. 新規作成 4.2 [基礎]から一部転載
5章 作用	作用の特性値, 作用係数, 作用の種類, 組合せ	[コン] [鋼合] [複合] [基礎]から転載
6章 材料および地盤	材料の品質と特性値および設計値, 地盤の特性値および設計用値	[コン] [基礎]から転載
7章 構造解析	解析計画, 解析法の選定, 検証と妥当性の確認, 橋りょう・作用・材料・地盤のモデル化, 安全性・使用性・復旧性の照査に関する構造解析	7.1~7.4 新規作成 7.5~7.9 [コン]を基に作成, [変位]から一部転載 7.10 [耐震]の各論から一部転載
8章 安全性の照査	常時の走行安全性および地震時の走行安全性に係る変位の照査, 構造安全性, 公衆安全性の照査	8.2 [変位]から転載 8.3 [耐震]から一部転載, [コン]等を基に作成 8.4 [コン] [鋼合]から転載
9章 使用性の照査	乗り心地, 外観, 保守, 騒音・振動の照査	9.2 [変位]から転載 9.3 [コン] [鋼合]から転載 9.4 [変位]から一部転載, [コン] [耐震]を基に作成 9.5 [コン] [鋼合]を転載, 一部加筆
10章 復旧性の照査	復旧性に関する修復性の照査	10.1~10.2 [コン] [耐震]を基に作成 10.1~10.2 [変位]から一部転載
11章 コンクリート橋	コンクリート橋の設計に関する構造解析, 応答値算定, 細目に関する特有の事項	11.1~11.11 [コン]から転載 11.12 [土留]から転載 11.13~11.19 [コン]から転載

\* [コン]: H16 コンクリート標準, [変位]: 変位制限標準, [複合]: 複合標準, [基礎]: 基礎標準, [耐震]: 耐震標準, [鋼合]: 鋼・合成標準, [土留]: 土留め標準

るとともに, 関連する各設計標準の内容を導入し, 橋りょう編として集約した。

変位制限標準の内容について, コンクリート橋のみならず, 鋼橋および複合構造橋の設計に係わる内容を全て転載した。その際, 橋りょう編の構成および照査体系に合わせて一部変更したが, 設計の考え方, 照査方法等は変更していない。したがって, コンクリート構造物に対する変位制限標準に関する事項は, 橋りょう編によってよい。

耐震標準の内容について, 桁式橋りょう, ラーメン高架橋の応答に関する事項として, 「10章 橋梁および高架橋の応答値の算定と性能照査」「11章 橋台の応答値の算定と性能照査」の条文解説を, 全て橋りょう編に転載した。

基礎標準の内容について, 基礎の応答値の算定については, 橋りょう全体系を対象に構造解析を実施する必要があるため, 内容を変更せずに, 橋りょう編に転載した。

### 2.3 橋りょう編とコンクリート構造編, 支承編の関係

図1に, 橋りょう編と部位・部材編であるコンクリート構造編および支承構造編の関係を示す。橋りょうの設計は, 橋りょう編によって行い, 部位・部材特有の設計を部位・部材編により行う。例えば, 骨組解析を用いてコンクリート橋の照査を行う場合には, 橋りょう編に

よって, 作用の設定, 構造解析および照査を行うが, コンクリート構造および支承構造特有の事項である材料の特性値や設計用値, 算定式, 構成則, 仕様等を, コンクリート構造編, 支承構造編に従い定める。

橋りょう編の5章~7章において, 選定された解析手法, モデル化の条件, 材料劣化の取扱いに必要な材料入力値, 解析モデル, 耐久性に関する事項を, 部位・部材編の3章~5章に従い定める。

橋りょう編の8章~10章において, 部位・部材の限界状態に従い橋りょうの照査を行う場合には, コンクリート構造編の6章, 7章あるいは支承構造編の6章~10章に従い照査を行う。特に, コンクリート構造編の場合, 「7章 構造計算に関する一般事項」に示す耐力算定式等は, 載荷実験や数値実験により検証された適用範囲を有している。したがって, 「6章 照査に関する基礎的事項」では, 部材の支持条件等の適用範囲が適合している算定式等を選定できるように示している。なお, 部位・部材編に従い照査を行う場合, 満足する必要がある事項を「2章 適用の要件」に定めた。

非線形有限要素解析を用いてコンクリート橋の照査を行う場合には, 設計の基本は橋りょう編によるが, 照査指標がコンクリート構造特有であるため, コンクリート構造編に従い照査指標を定める。

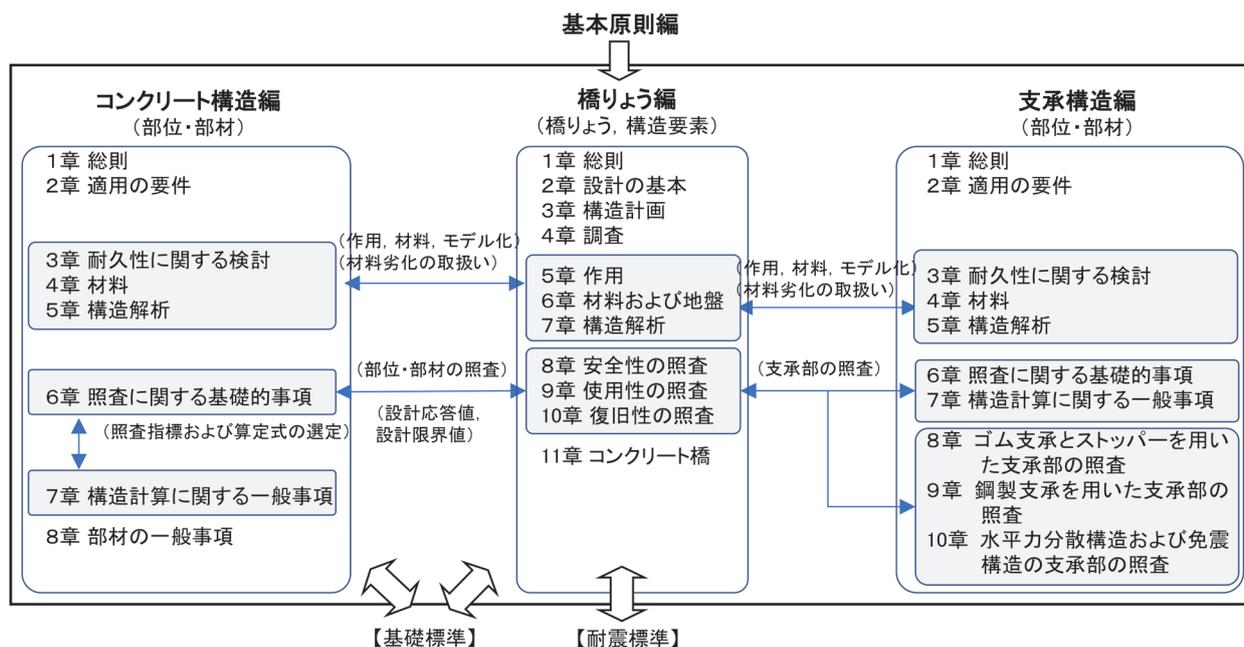


図1 橋りょう編とコンクリート構造編および支承構造編の関係

### 3. 橋りょう編の要旨と改訂概要

#### 3.1 総則（1章）

##### (1) 適用範囲

橋りょう編は、橋りょうを新設する場合の設計に適用するものとし、照査だけでなく、構造計画および調査を含む設計全般を対象とした。H16 コンクリート標準<sup>1)</sup>では新設・既設の区分を明確に記載されていなかったが、橋りょう編に示す構造物・構造要素、部位・部材を対象とした照査は、新設構造物を対象とした標準的な方法であることから、橋りょう編の適用範囲に、新設の設計が対象であることを明示した。

##### (2) 用語の定義

橋りょう編に従来から追加した用語の定義のうち、主なものは以下の通りである。

**橋りょう**：桁、橋脚、橋台、ラーメン高架橋等で構成される列車を支持する工作物の総称（図2）

**構造計画**：建設地点の環境、構造、施工および維持管理等の条件を総合的に考慮し、構造の種別、形式、形状、主要寸法および使用材料等を決定する行為

**構造要素**：橋りょうを構成する桁、橋脚、橋台、ラーメン高架橋等の総称（図2）

**部位・部材**：スラブ、梁、柱、壁、基礎構造およびこれらの接合部、支承部等の総称（図2）

**構造の種別**：鋼橋、コンクリート橋等の橋りょうの種別

**構造の形式**：桁式橋りょう、ラーメン高架橋等の橋りょうの形式

#### 3.2 設計の基本（2章）

##### (1) 設計

橋りょうの設計では、安全および安定的な輸送の確保を図ることを目的として、持続可能な社会の実現のため、社会との適合性に優れ、要求性能を満たし、かつ冗長性や頑健性を有するように行うことを明示することとした。なお、冗長性は設計で設定した条件を超える事象により橋りょうの一部が損傷した場合にも、急激な性能の変化を生じないための性質、であり、頑健性は作用や材料の特性が、設計において設定した条件から変化したとしても、設計で想定した性能を橋りょうが保持することのできる性質、と新たに設定した。そのうえで、H16 コンクリート標準<sup>1)</sup>と同様に、橋りょうの設計では、要求性能、設計耐用期間を設定し、構造計画、調査および構造詳細の設定、照査を行う。

また、H16 コンクリート標準において耐久性は、「時間の経過に伴って生じる材料特性の変化に起因した構造物の性能の変化に対する抵抗性」と定義されていた。橋りょう編では、耐久性を「橋りょうが設計耐用期間にわたり、安全性、使用性、復旧性の各要求性能を保持する性能」と定義を変更し、独立した要求性能ではないが、安全性、使用性、復旧性のすべての要求性能に対して、材料劣化を考慮した照査を行う行為において考慮されるものとした。

##### (2) 照査

表2に要求性能、性能項目および限界状態を示す。橋りょうの設計では、一般に安全性、使用性、復旧性の3つの要求性能を橋りょうに対して設定する。一方、照査



造計画は、社会との適合性に優れ、かつ要求性能を満足するように橋りょうを具現化するものとした。橋りょうの構造計画では、まず、建設地点の状況や規模に応じて必要な調査を行い、構造条件、周辺条件、地形・地質・地盤条件、および気象条件に関する設計条件を設定するものとした。そして、設定した設計条件のもとで、橋りょうの設計耐用期間、種別、構造の種別、形式、形状、主要寸法および使用材料等を決定するものとした。構造計画では、要求性能のほかに、社会との適合性、冗長性・頑健性、施工、維持管理について検討を行うものとした。

要求性能に関する検討では、安全性、使用性、復旧性について、照査の段階で構造の形式や主要寸法等の変更が生じないように考慮すべき事項を、具体的な例を挙げて説明した。例えば、復旧性を確保するためには、復旧に関する技術開発や被災後の復旧資材の確保等のハード面や、復旧体制の整備等のソフト面の両面を考慮する必要があることを示し、ハード面に関して構造計画の段階で考慮すべき事項として、以下の項目を例示した。

- a) 橋りょうへの進入路および復旧作業のための作業ヤードの確保
- b) 高架橋下等の利用状況に応じて点検しやすくすることへの配慮と修復困難な個所の損傷の制御
- c) 橋りょう崩壊防止と補修困難な箇所の損傷を小さくすることへの配慮

社会との適合性に関する検討については、環境、景観、経済性について、橋りょうが与える影響として検討すべき内容を示した。

冗長性・頑健性に関する検討については、設定した設計条件を超える事象に対しても、橋りょうが急激に破局的な状態に至らないように構造の種別や構造の形式等の選定で留意すべき事項を、例を挙げて説明した。

施工に関する検討については、確実な施工を実施するために構造計画段階で配慮する事項として、工期、施工の制約条件における配慮事項を示した。

維持管理に関する検討については、適切な維持管理を実施するために構造計画段階で配慮する事項として、構造の形式や使用材料、検査設備等について説明した。

### 3.4 調査 (4章)

調査については、橋りょう編で新たに章を設け、地形・地質・地盤条件に関する調査について、基礎標準から転載した。調査は、以下の目的から、設計、施工および維持管理の前提となる橋りょうの立地、施工条件について行うものとした。

- a) 適切な構造の種別、形式等を選定するために必要な建設地点の周辺条件、構造条件、施工条件等の基本的な条件に関する資料を得ること
- b) 構造計画で選定した構造の種別、形式等を具体的に

設計するために必要となる建設地点の周辺条件、構造条件、施工条件等の資料を得ること

- c) 設計された橋りょうを確実に施工するために、施工条件等に関する資料を得ること
- d) 供用開始後の橋りょうの保守、補修や補強等の維持管理、または防災上必要となる資料を得ること

立地に関しては、構造条件、周辺条件、地形・地質・地盤条件、気象条件を調査項目とし、これらの調査方法等を示した。

施工条件に関しては、近接構造物や埋設物の有無、作業空間の大きさや資材の輸送経路、使用材料、施工時の給排水施設、施工時の騒音・振動の許容の程度、地下水の利用状況、排水、発生土の処理等について、資料による調査のほか、踏査や関係機関との協議等により行うものとした。

### 3.5 作用 (5章)

橋りょうの照査に用いられる作用を網羅的に示した。ただし、地震の影響については、耐震標準によることを基本とし、保守に関する使用性の照査に用いる地震の影響のみ設定の考え方を示した。また、材料や構造に応じた特有な扱いは、一部、他編等によることとした。例えば、収縮・クリープ、プレストレス力については、コンクリートの形状寸法、温度・湿度、材料特性、荷重・高速条件等の影響を受けるため、これらの取扱いはコンクリート構造編によることとした。また、地球環境や社会環境等、本標準では構造物が影響を及ぼすものに対して環境という用語を用いることとしたため H16 コンクリート標準で定められていた環境の影響 (Ev) に代えて、気象の影響 (CI) と名称を変更した。

以下に、H16 コンクリート標準を含め、関連する設計標準からの主な変更点を示す。

#### (1) 衝撃荷重

衝撃係数算定時の部材の曲げ剛性には再載荷時の有効剛性を用いることを原則とし、繰り返し荷重によるひび割れ発生や進展に伴う剛性低下がある場合や、非構造部材の剛性寄与を考慮する場合等の設定時の留意点を示した<sup>11)</sup>。また、「鋼・合成標準」のように特有の衝撃係数の算定法がある場合は、それによってよいことを記載した。

#### (2) 保守用車荷重

従来は名称を「軌道作業用車荷重」としていたが、最近では多種多様な保守用車が使用されているため「保守用車荷重」に変更した。最近の代表的な保守用車について標準列車荷重の相当値の算出事例を示すとともに、保守用車荷重の設定の考え方を記載した。

#### (3) 水圧、流水力および波力

近年、夏場の過度な降雨量による河川増水や東日本大震災における津波等、橋りょうの流出被害や復旧に時間

を要する事例が報告されている。このような被害を事前に把握するため、コンクリート橋りょうに作用する流体力の評価や判定方について、付属資料にまとめた。

#### (4) 設計作用の組合せ

橋りょう、構造要素毎に作用の組合せの例を示した。従来、構造の種別や構造要素や部位・部材ごとに設計作用の組合せが示されており、同一の構造形式でも構造の種別によって設計作用の組合せが異なる場合もあった。橋りょう全体としてモデル化し、応答値を算定する場合は、複数の構造要素で構成されるため、構造の種別および構造の形式に依存しない設計作用の組合せが必要である。そこで、橋りょうに関する設計標準に記載されている設計作用の組合せを調査し、橋りょう全体としての設計作用の組合せの例を示すとともに、部位・部材、構造の種別および構造の形式別の構造要素における設計作用の組合せを再整理した。

### 3.6 材料および地盤 (6章)

本章は、H16 コンクリート標準の内容に基礎標準<sup>7)</sup>の地盤に関する内容を一部転載したものである。橋りょうに用いられる材料は、使用目的、気象条件、設計耐用期間、施工条件等を考慮して、適切な種類および品質のものを使用し、試験によりばらつきを明らかにするものとした。また、地盤は、段階的に実施された調査や試験に基づいて、その特性とばらつきを明らかにするものとした。

### 3.7 構造解析 (7章)

本章は、応答値算定だけでなく限界値の設定に関する内容も含んでいることから、H16 コンクリート標準の「応答値の算定」から「構造解析」に名称を変更した。

#### (1) 解析計画

橋りょうの設計における解析計画での検討事項として、解析法の選定、照査指標の設定、検証と妥当性の確認、橋りょうのモデル化、作用のモデル化、材料および地盤のモデル化等について新たに記述した。解析法としては、橋りょうを構成する部位・部材を「線材やばねにモデル化した解析」および「有限要素にモデル化した解析」について、経時変化の影響、解析モデルの線形・非線形、モデル化の次元、モデル化の範囲等の考え方について記述した。また、非線形有限要素解析など、自由度の高い解析法の活用を想定して、解析法の検証と妥当性の確認を行い、適用範囲を明確にした上で解析を実施する原則を明示した。

#### (2) 橋りょうのモデル化

橋りょうに関するモデル化について、H16 コンクリート標準に加え、耐震標準を基に作成した。橋りょうのモデル化では、橋りょうの応答特性に応じて挙動を適切に表現できるように、モデル化の範囲、モデル化の次元、

および境界条件を設定し、作用や橋りょうのモデル化を行うものとした。また、橋りょうは、作用に対して地盤と橋りょうが一体となって挙動するため、橋りょうのモデル化は、地盤を含めて、作用によって応答が発生する範囲を一体として解析対象の範囲とすることを原則とした。ただし、モデル化の範囲と外部との相互作用が解析結果に与える影響を無視できる場合や、境界条件によりその影響が適切に考慮できる場合には、モデル化の範囲を橋りょう、構造要素あるいは部位・部材に分離してモデル化してもよいものとした。

その他、本章では、作用、材料および地盤のモデル化について、基本的な考え方を示した。

#### (3) 安全性、使用性、復旧性の照査に関する構造解析

安全性、使用性、復旧性に関する構造解析は、H16 コンクリート標準に加え、耐震標準、変位制限標準を基に作成した。安全性に関する構造解析については、走行安全性、および構造安全性に関する構造解析の基本的考え方について記述した。

使用性に関する構造解析については、乗り心地、外観、および保守に関する構造解析の基本的考え方について記述した。

復旧性に関する構造解析では、修復性、軌道の損傷に関する構造解析の基本的考え方を示した。また、復旧性における橋りょうのモデル化として、地震動に対する構造解析におけるモデル化方法や応答値の算定方法等について、耐震標準の該当箇所から転載した。

### 3.8 安全性の照査 (8章)

安全性の照査として、走行安全性（常時の走行安全性、地震時の走行安全性に係る変位）、構造安全性および公衆安全性の照査を定めた。

走行安全性の照査については、地震時の照査の基本的な考え方を含め、変位制限標準の内容を転載した。

構造安全性の照査については、設計耐用期間中に生じるすべての作用、すなわち想定する最大の影響をもたらす作用や変動作用の繰返しに対して、構造物が耐荷能力および安定を保持することを確認する。桁式橋りょうとラーメン高架橋に分けて、橋りょうあるいは各構造要素で耐荷能力に関する照査方法を明示した。例えば、桁式橋りょうでは、図3に例示する限界状態に至らないことを、図4のようなモデルにより荷重を増分させて解析を行い、所要の作用において橋りょうあるいは構造要素としての耐荷能力や安定が保持できることを確認する。図4は、橋りょうを有限要素または線材等でモデル化し、鉛直荷重を作用させた上で、地震時慣性力のように水平荷重（荷重群）を増分する解析のイメージを示している。この照査により、例えば不静定構造物のように、一部の部位・部材が破壊しても橋りょうとしては荷重を安定して

保持でき限界状態に至らない場合には、橋りょうの抵抗機構を考慮した合理的な評価が可能となる。

また、H16コンクリート標準と同様に、橋りょうを構成するすべての部位・部材を照査することで、橋りょうの構造安全性を照査してよいものとした。この部位・部材が破壊および疲労破壊しないことの照査は、第Ⅲ編コンクリート構造や各設計標準によるものとした。安定に関する照査は、桁や橋脚等の転倒や浮上り、地盤の破壊等による基礎構造の不安定な状態等に至らないことを確認するものとし、基礎構造の変位・変形に関する安定の照査は基礎標準によることとした。

公衆安全性の照査については、H16コンクリート標準と同様に、かぶりコンクリートのはく落等に起因した公衆災害を生じないようにするために、必要に応じて行うものとした。コンクリートの材料劣化については、「耐久

性に関する検討」により満足するとみなしてよいこととした。

### 3.9 使用性の照査 (9章)

使用性の照査として、乗り心地、外観、保守および騒音・振動の照査を定めた。保守は、新たに性能項目として設定し、照査方法を本章に明示した。

乗り心地の照査については、変位制限標準の内容を転載した。

外観の照査については、構造物の表面に発生するひび割れや汚れ等が不安感や不快感を与えず、使用を妨げないようにするため行うものとし、コンクリートのひび割れに関する外観の照査はH16コンクリート標準と同様に行うこととした。

保守の照査については、永久作用、変動作用による橋りょうの損傷や残留変位が、想定する保守作業のもとで正常な使用が困難となる限界状態に至らないことを確認するものとした。変動作用には、しばしば生じる地震、降雨、降雪、暴風等の影響に対しても安定的な輸送の確保が求められるため、これらについても設定する必要がある。保守の照査は、橋りょうの損傷と残留変位、軌道の損傷に関して行うものとし、一般に性能レベル1以内であることを確認することとした(図5)。橋りょうの損傷に関しては、構造要素で照査する方法を示すとともに、橋りょうを構成する部位・部材の損傷レベルおよび基礎の安定レベルがともに1であること(表3)を確認することでよいものとした。この部位・部材の損傷レベルや基礎の安定レベルの照査は、各構造編や各設計標準によるものとした。損傷に関する保守の照査は、図5に示すように、主に、H16コンクリート標準等における復旧性の照査のうち、変動作用に対する性能レベル1の照査に相当する。また、橋りょうの残留変位に関しては、一般に桁の長期変形や基礎構造の支持性能に対して行うものとし、後者は基礎標準<sup>7)</sup>によることとした。

騒音・振動の照査については、H16コンクリート標準や鋼・合成標準<sup>9)</sup>等と同様であるが、騒音・振動の予

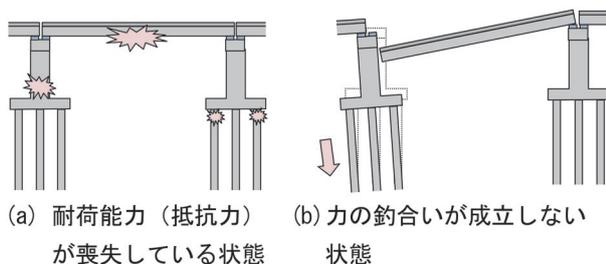


図3 桁式橋りょうの限界状態の例

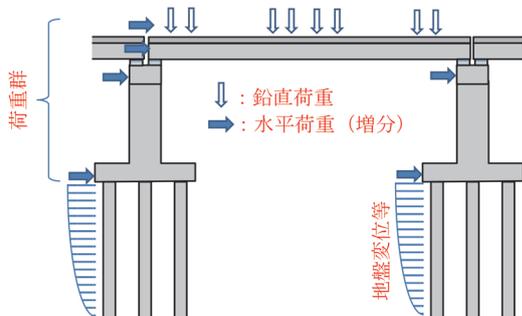


図4 桁式橋りょうのモデルの例

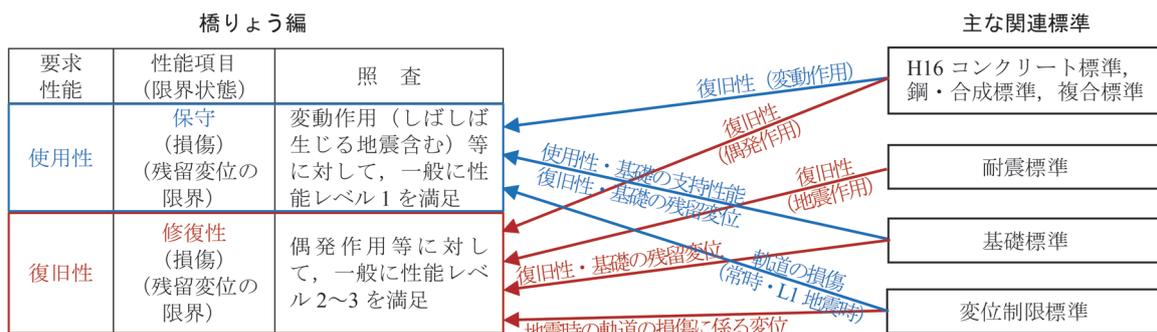


図5 保守(使用性)および修復性の照査と主な関連標準との対応

表3 桁式橋りょうの性能レベル、部位・部材の損傷レベルおよび基礎の安定レベル

性能レベル		1	2	3	
部位・部材 の 損傷レベル	桁	梁	1	2	3
		スラブ	1	2	3
		接合部	1	1~2	2~3
	支承部		1	2~3	3
	橋脚 橋台	く体(橋脚)	1	2~3	3
		く体(橋台)	1	2	3
		基礎部材	1	1~2	2~3
		接合部	1	1~2	2~3
	基礎の安定レベル		1	1~2	2~3

測方法や、橋りょう上の電車線路設備や防音壁等の付帯設備の振動の留意点に関して加筆した<sup>12) 13)</sup>。

### 3.10 復旧性の照査(10章)

H16コンクリート標準のうち、地震の影響等の偶発作用に対する照査に加えて、耐震標準、基礎標準、変位制限標準を基に作成した。復旧性は、損傷等に対する修復の難易度のみでなく、橋りょう周辺の状況、被災後の調査の難易度、復旧資材の確保、復旧体制等のハード・ソフト両面での検討が必要となる。橋りょうの復旧性の照査では、橋りょうの修復の難易度である修復性を性能項目として設定して照査する。図5に照査概要と主な関連標準との対応を示す。

修復性の照査については、橋りょうの損傷と残留変位、軌道の損傷に関して行うものとし、性能レベルを一般に2~3に設定(重要度の高い橋りょうは性能レベル1~2)し、表3に例示するように、部位・部材の損傷レベル、基礎の安定レベルと関連付けて評価するものとした。橋りょうの損傷に関しては、構造要素で照査する方法を示すとともに、橋りょうを構成するすべての部位・部材の損傷レベルや基礎の安定レベルで照査することでよいものとした。この部位・部材の損傷レベルや基礎の安定レベルの照査は、部位・部材編や各設計標準によるものとした。橋りょうの残留変位に関しては、一般に基礎構造に着目し、基礎標準<sup>7)</sup>によることとした。

修復性の照査に考慮する作用は、地震の影響を主たる対象としているが、それ以外の偶発作用として、自動車の衝突や津波に対しては一般に構造計画の段階で配慮すべきものとした。また火災については必要に応じて照査を行うことを示した。

### 3.11 コンクリート橋(11章)

橋りょうの性能を照査する際に、橋りょうの構造の形式や構造要素毎に応じて配慮する事項を示した。本章の内容は、H16コンクリート標準を踏襲し、橋台(抗土

圧橋台、補強土橋台)については、土留め標準<sup>10)</sup>の内容を取り込んだ。

## 4. おわりに

橋りょう編を策定した目的と主な記載事項をまとめると以下のとおりである。

- 1) 橋りょう編は、梁、柱、杭といった局所最適化ではなく、橋りょうの全体最適化を図ることで、冗長性・頑健性に関する評価の他、配筋や寸法の合理化、損傷部位や損傷順序の適正評価などを実現することを目的に作成した。
- 2) 橋りょうに関連する各設計標準の内容を集約したほか、構造計画および調査を追加し、橋りょうの設計に関わる一連の設計法を定めた。
- 3) 照査の対象を、橋りょう/構造要素/部位・部材に区分し、その区分に応じた作用の組合せや照査法を示した。
- 4) 津波等、地震の影響等による橋りょうの被害や最近の保守用車の実態を踏まえ、保守用車荷重や流体力等の見直しを行った。
- 5) 構造解析について、応答値算定のみならず、限界値設定へも適用することや、非線形有限要素解析等の適用を図りやすくするために、解析法の検証と妥当性確認の記載を充実した。

本標準を活用し、従来の形式にとらわれない設計に挑戦することを期待する。

## 文献

- 1) 渡辺健, 田所敏弥, 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)の改訂概要, Vol.37, No.11, pp.1-5, 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, Vol.37, No.11, pp.7-13, 2023
- 3) 国土交通省鉄道局監修・土木関係技術基準調査研究会編: 解説鉄道に関する技術基準(土木編)第四版, 2023
- 4) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物), 丸善出版, 2004
- 5) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(変位制限), 丸善出版, 2006
- 6) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(鋼とコンクリートの複合構造物), 丸善出版, 2016
- 7) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(基礎構造物), 丸善出版, 2012
- 8) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設

- 計標準・同解説（耐震設計），丸善出版，2012
- 9) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物），丸善出版，2009
- 10) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説（土留め構造物），丸善出版，2012
- 11) 徳永宗正，池田学：鉄道コンクリート桁におけるひび割れと非構造部材の影響を考慮した曲げ剛性の算定方法，鉄道総研報告，Vol.37，No.9，pp.17-24，2023
- 12) 徳永宗正，曾我部正道，後藤恵一，山東徹生，玉井真一，小野潔：列車通過時の鉄道構造物上防音壁の動的設計法，土木学会論文集 Vol.69，No.2，pp.392-409，2013
- 13) 常本瑞樹，松岡弘大，後藤恵一，薄広歩，以倉慶子：列車通過時の高架橋振動による電車線路設備損傷の低減対策，鉄道総研報告，Vol.34，No.9，pp.35-40，2020



# 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

渡辺 健\* 中田 裕喜\* 轟 俊太郎\*

Design Standard and Commentary for Railway Structures (Concrete Structures)  
Outline of “Part III: Concrete Structure”

Ken WATANABE Yuki NAKATA Shuntaro TODOROKI

Design Standard and Commentary for Railway Structures (Concrete Structures) “Part III: Concrete Structure” summarizes interpretations of the verification described in Part II: Bridge, as well as concrete structure-specific techniques: materials, structural analysis methods, member verification, load-bearing capacity formulas, etc. that can be used as reference in the verification. The latest information is introduced, such as formulas, values, etc., which have been published through actual results, specifications, and papers, and have been verified and validated in the committee meetings.

キーワード：コンクリート構造，部位・部材，非線形有限要素解析，骨組解析，構造細目，照査

## 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）」（以下、本標準）を、2023（令和5）年1月に発刊した。今回の改訂により、基本原則編、構造物・構造要素編および部位・部材編の3階層で構成されることとなった<sup>1) 2)</sup>。本稿では、部位・部材編に位置づけられる「第Ⅲ編 コンクリート構造」（以下、コンクリート構造編）について、構成や各章の概要を解説する。

## 2. コンクリート構造編の作成方針

コンクリート構造編では、橋りょう編で記載された照査に対する解釈や、照査に用いられるコンクリート構造およびプレストレストコンクリート構造特有の技術（材料、構造解析、部材に関する照査、耐力算定式等）の具体を示した。また、実績や2017年制定コンクリート標準示方書【設計編】<sup>3)</sup>（以下、コ示方書）、論文等を通して公表され、「鉄道コンクリート構造物設計標準に関する委員会」において検証や妥当性が確認された数式や値等を選定した。

コンクリート構造編では、平成16年制定鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）<sup>4)</sup>（以下、H16コンクリート標準）の他、橋りょう編やトンネル編等における照査に用いられることを想定して、鉄道構造

物等設計標準・同解説（基礎構造物）<sup>5)</sup>（以下、基礎標準）、関連する設計標準に記載されているコンクリート構造特有の事項も記載した<sup>1)</sup>。

コンクリート構造に関する数式、数値等は、これまでの実績に基づき整備されてきたものであり、標準的な構造物の設計の省力化に資する技術である。一方、性能照査の原則は、構造物の性能を評価できれば、これを構成する構造細目や材料等の制約はない。今後も、定着・継手等の新しい工法の導入や、セメント、骨材等の材料事情の変化が想定されるなかで、従来とは異なる特性であっても、適用する部位の工夫や、コンクリートの配合や条件により、コンクリート構造の性能を制御することが可能な仕組みとなっている。コンクリート構造の特性に合わせて、設計で対応することを想定したものである。

表1に、コンクリート構造編の目次構成と各章の記載事項、解析手法特有の記載事項を示す。新しい構造形式や材料を用いる場合、構造条件により算定式の適用範囲外となる場合、または仕様で定められた諸元を変更する場合等に対して、柔軟に対応可能な構造解析手法が求められていた。そこで、従来の手法である「線材やばねにモデル化した解析：骨組解析（部材モデルによる解析）」に加えて「非線形有限要素解析（以下、FEM）による照査」を導入することとした。そして、土木構造物に対する実績<sup>3) 6)</sup>を踏まえ、多数のひび割れにより応力状態が不均一になるコンクリート部材の破壊現象の構造解析の課題に対して、応力やひずみを空間平均化して扱うことで対応した、平均化材料モデルを用いた材料損傷指標等に基づくFEMによる照査方法を採用することとした。そして、コ示方書で示されるモデル化方法、材料モ

\* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

表 1 コンクリート構造編の目次構成と概要

目次	記載事項	解析手法特有の記載事項	
		骨組解析	非線形有限要素解析
1章 総則	適用範囲、構成、用語の定義、記号に関する基本事項	—	—
2章 適用の要件	本編で定められる数値・式・手法等を適用するための要件、材料の品質、照査の前提、施工、維持管理で構成	—	—
3章 耐久性に関する検討	材料劣化を設計耐用期間中に構造物の性能に影響しない範囲に留めるための方策	—	—
4章 材料	材料の特性値の他、骨組解析、非線形有限要素解析に用いる力学モデル	材料の特性値	材料の特性値、モデル化方法
5章 構造解析	非線形有限要素解析・骨組解析によるモデル化、プレストレス力、収縮・クリープ、温度の影響等の算定方法およびモデル化	応答値算定に関するモデル化手法	要素分割や付着有効領域の設定、境界条件の設定、検証と妥当性の確認
6章 照査に関する基礎的事項	部材の照査に用いる照査指標、設計応答値、設計限界値を限界状態・解析手法に応じて設定、安全係数の標準値	設計応答値、設計限界値、安全係数	照査指標、設計応答値、設計限界値、安全係数
7章 構造計算に関する一般事項	非線形有限要素解析、骨組解析における設計応答値、設計限界値を算定する方法、力学に基づく数理モデルを用いること、実験等による実証を原則	応力度制限値、設計応答値、設計限界値の算定	設計応答値の算定
8章 部材の一般事項	部材特有のモデル化・応答値・限界値・構造細目等	—	—

デル、照査方法等の具体的な適用方法を各章に転載した。

線材やばねを用いた解析では、照査プログラムを鉄道総研で整備することで、解析手法の検証や妥当性確認を確保していた。一方、FEMでは、汎用の解析ツールを用いることを想定している。すなわち、今後、更なる進化が見込まれる構造解析技術の適用に対応するため、技術者は解析手法の検証および妥当性の確認をすることを記述した。なお、解析の精度を担保するために必要な実験結果および解析事例（ベンチマーク）については、今後、手引き等を整備する。

解析計画や解析手法の検証と妥当性の確認、構造物のモデル化、妥当性の評価、照査指標の選定は、FEMのみならず、構造解析全般に関わる共通事項であることから、構造解析手法によらず章立てを同一とした。

### 3. コンクリート構造編の要旨と改訂概要

#### 3.1 総則（1章）

コンクリート構造編の適用範囲、コンクリート構造編を構成する各章の役割、および用語の定義を記載した。用語は、H16コンクリート標準を踏襲した他、基礎標準からコンクリート構造編に関連する用語、さらには水掛かりに関連する用語を追記した。

#### 3.2 適用の要件（2章）

##### (1) 適用の要件について（2.1）

コンクリート構造編に示す数値、算定式、手法等を照査に適用する場合の、要件を纏めた。H16コンクリート標準の内容を踏襲し、材料の品質、鋼材・部材・排水および防水に関する構造細目、施工および維持管理で構成される。すなわち、構造計算における前提条件を規定するものや、構造上の弱点を補う項目、構造計算や施工

の不確定性、作用等の不確定性を考慮して定めたのが趣旨である。本来、FEMや実験技術の高度化に伴い、こうした事項が評価できることが予想される。性能照査の原則では、本章の記載が足かせになることは望ましくない。したがって、本章に示す項目の趣旨を十分に理解した上で、対象とする構造物または部位・部材をモデル化することとし、形状・寸法、構造詳細および作用やその変動が明確で、設計耐用期間にわたり妥当性が確認された解析手法や、実物を忠実に模擬した実験によることが原則である旨、新たに記述した。

##### (2) コンクリートおよび鋼材の品質（2.2）

H16コンクリート標準では、「材料」に記載していた「材料の品質」を2章に移設した。性能照査では、材料によらず構造物の性能を評価できれば、材料の制約はない。一方で、コンクリート構造編に記載した標準的な手法は、以下に示す、JIS等の材料を用いることを前提としているため、2章に記載した。

コンクリートに混和材を混入することで、構造物の耐久性を確保しようとする事例にも対応するため、JIS R 5210「ポルトランドセメント」、JIS R 5211「高炉セメント」に加えて、JIS R 5213「フライアッシュセメント」に適合するセメントを標準とした。これは、鋼材腐食、収縮ひずみ、クリープ係数に関する検討を実施し、混合セメントを普通セメントと同様に扱えることとしたことによる。

JIS G 3112-2020「鉄筋コンクリート用棒鋼」の改正への対応として、実績に基づき、軸方向鉄筋にはSD295、SD345、SD390、SD490、SD685A、SD685Bを、横方向鉄筋にはSR235、SR295、SD295、SD345、SD390、SD490、SD685A、SD685B、SD685R、SD785Rを標準とした。一方、算定式や構造細目において、鋼材の降伏強度に関する適用範囲を示した。表2に、主な適用範囲

表2 コンクリート標準における算定式および構造細目の材料強度に関する適用範囲<sup>※1</sup>

令和5年版(改訂版)コンクリート構造編 における記載箇所	算定式, 構造細目等	適用範囲		
		H16年版	令和5年版(改訂版)	
2章 適用 の要件	2.3.6 鉄筋の曲げ形状	折曲げ鉄筋の曲げ内半径 ラーメン隅角部の外側に沿う軸方向鉄筋の曲げ内半径	SD390 まで SD390 まで	SD390 まで <sup>※3</sup> SD490 まで <sup>6)※3</sup>
	2.3.7.2 鉄筋の標準フック	標準フックの曲げ内半径	SD490 まで	SD490 まで <sup>※3</sup>
	2.3.7.3 鉄筋の定着長	鉄筋の基本定着長	SD390 まで	SD685A・B まで
4章 材料	4.3.2 鋼材の疲労強度	異形鉄筋の母材の設計引張疲労強度 $f_{fd}$	SD490 まで	SD685A・B まで
5章 構造 解析	5.2.3 骨組解析におけるモデル化	軸方向鉄筋の材料修正係数 $\rho_m=1.2$ の適用	SD390 まで	SD685A・B まで
	5.2.3.3 復元力モデル	復元力モデル	軸方向鉄筋:SD390 まで	軸方向鉄筋:SD685A・B まで <sup>※4</sup>
	7.9.1 部材角	変形性能算定式	横方向鉄筋:SD785 相当まで	横方向鉄筋:SD785R まで (付属資料 4-1 で SD1275 相当 <sup>※5</sup> )
7章 構造 計算に 関する 一般 事項	7.6.1 曲げひび割れ幅	コンクリート表面の設計曲げひび割れ幅 $w_d$	SD390 まで	SD685A・B まで
	7.7.1 曲げ耐力および軸方向耐力	設計曲げ耐力 $M_{od}$ および設計軸方向圧縮耐力 $N_{oud}$ <sup>※2</sup>	$f_{ck}=50N/mm^2$ $f_{syd}=390N/mm^2$	$f_{ck}=80N/mm^2$ $f_{syd}=685N/mm^2$
	7.7.2.1 鉄筋コンクリート構造の設計せん断耐力	棒部材の設計せん断耐力 $V_{yd}(RC)$ <sup>※2</sup>	$f_{cd}=47N/mm^2$ $f_{wyd}=800N/mm^2$ または $25f_{cd}$	$f_{cd}=47N/mm^2$ $f_{wyd}=1275N/mm^2$ または $25f_{cd}$
		腹部コンクリートの設計斜め圧縮破壊耐力 $V_{wcd}$ <sup>※2</sup>	$f_{ck}=50N/mm^2$	$f_{ck}=80N/mm^2$
	7.7.2.2 プレストレストコンクリート構造の設計せん断耐力	両端固定支持された棒部材の設計せん断耐力 $V_{asud}$ <sup>※2</sup>	算定式無し	$f_{cd}=47N/mm^2$ $f_{wyd}=800N/mm^2$ または $25f_{cd}$
		棒部材の設計せん断耐力 $V_{yd}(PC)$ <sup>※2</sup>	(RC と同一の算定式を適用)	$f_{cd}=47N/mm^2$ $f_{wyd}=800N/mm^2$ または $25f_{cd}$
	7.7.3 面部材の設計押抜きせん断耐力	面部材の押抜きせん断耐力 $V_{pcd}$ <sup>※2</sup>	$f_{ck}=50N/mm^2$	$f_{ck}=50N/mm^2$
	7.7.4 面内力を受ける面部材の設計断面耐力	面内力を受ける面部材の設計断面耐力 $T_{yd}, C_{ud}$ <sup>※2</sup>	$f_{ck}=50N/mm^2$ $f_{syd}=390N/mm^2$	$f_{ck}=50N/mm^2$ $f_{syd}=685N/mm^2$
	7.7.5 設計せん断伝達耐力	設計せん断伝達耐力 $V_{cud}$ <sup>※2</sup>	$f_{syd}=390N/mm^2$	$f_{syd}=490N/mm^2$
	7.7.6 設計ねじり耐力	ねじり補強鉄筋のない場合の設計ねじり耐力 $M_{cud}, M_{tud}$ <sup>※2</sup>	—	—
ねじり補強鉄筋のある場合の設計ねじり耐力 $M_{tcud}, M_{tyd}, M_{tud}$ <sup>※2</sup>		$f_{ck}=50N/mm^2$ $f_{wyd}, f_{tyd}=390N/mm^2$	$f_{ck}=80N/mm^2$ $f_{wyd}, f_{tyd}=490N/mm^2$	

$f_{ck}$ : コンクリートの圧縮強度の特性値,  $f_{cd}$ : コンクリートの設計圧縮強度,  $f_{syd}$ : 鋼材の設計引張降伏強度,  $f_{wyd}$ : せん断補強鉄筋(横方向鉄筋)の設計引張降伏強度,  $f_{tyd}$ : 軸方向鉄筋の設計引張降伏強度

※1: 鉄筋種別, 強度に関わる算定式, 構造細目について示している。表に記載が無い項目については, JIS G 3112:2020 (ただし, SR785, SD590A・B を除く)の鉄筋を適用範囲とする。※2: 令和5年版(改訂版)コンクリート標準の適用範囲は, 算定式における材料強度の上限値を表し, 材料強度が上限値を超える場合は, 上限値を用いて算定してよい。※3: SD490 や SD685A, SD685B に対し, コンクリートの設計圧縮強度に応じて定める例を示している。 ※4: コンクリート強度との組合せによる。 ※5: 付属資料 2-1 に示す品質を満足することが前提である。

を示す。コンクリートの圧縮強度についても併記した。なお, コンクリート標準におけるコンクリートの圧縮強度の適用範囲は, 特性値が  $18N/mm^2$  以上  $80N/mm^2$  以下の普通骨材コンクリート,  $18N/mm^2$  以上  $40N/mm^2$  以下の軽量骨材コンクリートであり, H16 コンクリート標準と同一である。実績や最近の知見を踏まえ, H16 コンクリート標準と比較して, 適用範囲を拡大した。また, 算定式において, 高強度材料に対する適用性が確認されていない範囲については, 想定する耐荷機構等を踏まえ, 算定式で考慮できる上限値として示した。

JIS によらない鉄筋を用いる場合は, 用途をふまえ, 機械的性質, 溶接性, 継手, 疲労, 部材のひび割れ, 部材の変形性能等に対して, 十分に検討した上で使用することとした。

### (3) 鋼材の配置 (2.3.5)

鉄筋に関する構造細目は, 基本的に棒部材に基づいた知見が示されている。せん断補強鉄筋の配置について, 実績に基づき, 面部材に対応する事項を新たに示した。

柱はり接合部では, 塑性ヒンジ部とともに帯鉄筋量も増大し, 施工に影響を及ぼしていた。そこで, 柱梁接合部の帯鉄筋量を「柱の塑性ヒンジ部に配置する帯鉄筋と同量」の規定から, 「柱中間部に配置する帯鉄筋と同量」に改訂した。帯鉄筋を配置しても柱梁接合部の耐力にはあまり影響しないといった実験を踏まえつつ, 軸方向鉄筋の定着を確保するために, ある程度の帯鉄筋量を配置することとしたものである<sup>7)</sup>。

### (4) 鉄筋の曲げ形状 (2.3.6)

ラーメン構造の隅角部の外側に沿う軸方向鉄筋の曲げ

内半径として、鉄筋の直径の10倍以上を適用できる鉄筋種別の範囲を、隅角部をモデル化した実験やFEMの結果に基づきSD490までに拡大した<sup>7)</sup>。SD685A、SD685Bを隅角部の外側に沿う軸方向鉄筋に用いた場合や、SD490、SD685A、SD685Bを折曲げ鉄筋に用いた場合の曲げ内半径は、実験によって、あるいは曲げ加工部に生じる支圧力等を考慮して定めることとした。一方、解説では、H16コンクリート標準の付属資料で記載されていた、曲げ加工部に生じる支圧力に基づく、コンクリートの設計圧縮強度に応じて定める方法を示した。

#### (5) 鉄筋の定着 (2.3.7)

鉄筋の定着は、埋め込むコンクリートの状態により、力学的機構や破壊性状が大きく異なる。そこで、従来の基本定着長の算定式がコンクリートの状態をマッシュとみなせない場合の方法であるのに対して、フーチング等、マッシュなコンクリートに埋め込む鉄筋を対象とした基本定着長の算定式を、定着に関するコ示方書の照査法に基づき新設し<sup>8)</sup>、付着力の低減区間や低減定着長の考え方を整理した。

SD685A、SD685B、SD685R以上の鉄筋を軸方向鉄筋またはせん断補強鉄筋として用いた場合の標準フックの曲げ内半径は、実験によって、あるいは曲げ加工部に生じる支圧力等を考慮して定めることとしたが、解説では、H16コンクリート標準の付属資料で記載されていた内容を記載した。

機械式定着は、基本的に標準フック同等の特性を有することとし、機械式定着単体に求められる特性と、部材として求められる特性を区別して記載することとした。

#### (6) 鉄筋の継手 (2.3.8)

コンクリート構造編では、プレキャスト構造等、設計強度に応じて、継手位置を定めることを想定している。鉄筋相互を接合する継手に関して、照査において、継手部を有する部材が一般部材としてみなせる場合の扱いを示した。これに依らない場合は「8.7継手部および接合面を有する部材」により照査することとした。その場合、その特性（種類、施工、検査の信頼度）、部材の力学特性、継手の集中度等に応じて、設計強度等を定めるとした。設計強度の算定を4章に、低減係数の算出に必要となる情報を（付属資料2-4）に記載した。

#### (7) 部材に関する構造細目 (2.4)

照査の方法とは直接関係せず、構造上の弱点を補うため等の項目を定めた。耐火工について、一般にかぶりに対応することを標準としていたH16コンクリート標準の方針に変更はない。一方、（付属資料2-5）には、高架下やトンネル内の火災等を想定して耐火工を検討する場合でも、受熱温度等に依存したコンクリートおよび鋼材の力学的性質を考慮して耐火工を検討する方法を示した。

#### (8) 排水および防水に関する構造細目 (2.5)

既設構造物における事例から、コンクリート構造の性能を設計耐用期間にわたり確実に確保するためには、排水に関する対処の重要性が報告されている。水切りの形状等、実績に基づき更新した。

#### (9) 施工 (2.6)

コンクリート構造物は、寸法・形状、養生、境界条件等により、セメントの水和熱による温度ひび割れや収縮によるひび割れが発生し、これらが構造物の性能に影響を及ぼす可能性がある。（付属資料2-6）には、こうしたひび割れ発生の検討方法について示した。鉄筋工では、継手に関して、所要の強度、剛性等を発揮できる施工方法を用いることを追記した。

### 3.3 耐久性に関する検討 (3章)

本章では、鋼材の腐食、コンクリートの劣化を設計耐用期間中に構造物の性能に影響しない範囲に留める場合の検討事項を示した。

#### (1) 鋼材の腐食に関する検討 (3.3)

塩化物イオンが供給されない場合の鋼材の腐食について、部位・部材が比較的乾燥している場合には、中性化残りが10mm以下であっても、鉄筋の腐食によってコンクリートのはく落が生じる可能性が低いことが報告されている<sup>9)</sup>。一方で、設計や維持管理において、中性化残りを指標とする場合、比較的乾燥している部位・部材の方が、中性化の進行が速いため、実態とは逆に、設計ではかぶりを大きく、維持管理では措置を優先することとなる。これらの実態から、鋼材の腐食に水掛かりの程度を考慮することが重要であり、水掛かりの程度に応じて、鋼材の腐食に関する検討を行うこととした。

具体的には、既設構造物における水掛かりの状態や腐食の実態、水と酸素の供給程度を考慮し、水掛かりの程度を常時乾燥、乾湿繰返し、常時湿潤に区分して（3.2）、ひび割れ幅の制限値（3.3.2.2）等、鋼材の腐食に関する事項を定めた。また、水掛かりの程度とコンクリートの中性化が鉄筋の腐食によるコンクリートのはく落の発生に及ぼす影響<sup>2)</sup>を考慮し、従来の「中性化に関する検討」から、「水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討」（3.3.3）に改訂した。

塩化物イオンが供給される場合には、鋼材位置の塩化物イオンがある濃度を超えると鋼材の腐食が加速し、構造物の性能への影響も大きくなると考えられるため、従来通り、設計耐用期間中に鋼材位置の塩化物イオン濃度が制限値に達しないことを確かめることにより検討を行うこととした（3.3.4塩化物イオンの侵入に伴う鋼材の腐食に関する検討）。塩化物イオン濃度の制限値について、従来ではセメント種によらず一般的に1.2kg/m<sup>3</sup>としてきたが、普通ポルトランドセメント、高炉セメント

B種、フライアッシュセメントB種等、各種セメントや水結合材比に応じた値に更新した。

水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討および塩化物イオンの侵入に伴う鋼材の腐食に関する検討で定まる設計耐用期間を100年とした場合の部位・部材ごとの設計かぶりの例を付属資料に示した(付属資料3-1)。

#### (2) コンクリートの劣化に関する検討(3.4)

アルカリシリカ反応によるコンクリートの劣化に関する検討(3.4.4)について、これまでアルカリ総量を $\text{Na}_2\text{O}$ 換算で $3.0\text{kg}/\text{m}^3$ 以下に抑えてきたが、使用骨材や配合、気象条件によっては、アルカリシリカ反応による変状が生じた事例が報告されている<sup>10)</sup>。この実態を踏まえ、アルカリ総量を規制する場合、アルカリシリカ反応による変状が構造物の性能に与える影響や補修の容易さ確かさを考慮したうえで、使用骨材や配合、気象条件に応じて、 $3.0\text{kg}/\text{m}^3$ よりも十分に小さく設定すること等アルカリ総量を適切に制限することとした。

### 3.4 材料(4章)

本章では、材料の特性値の他、骨組解析、FEMに用いる力学モデルを定めた。

#### (1) コンクリートの収縮およびクリープ(4.2.8)

コンクリートの収縮は、建設地点の温度、相対湿度、部材断面の形状・寸法、乾燥開始時材齢、配合の他、骨材の性質、セメントの種類、コンクリートの締固め、養生等の影響を受ける。そこで、養生、温度・湿度、形状・寸法を統一したJIS A 1129に従い計測した値を特性値とし、骨材の吸水率を考慮して収縮ひずみを算定するコ示方書の式を導入した<sup>3)</sup>。これに伴い、プレストレストコンクリートの有効プレストレスの算定(7.5.2)における、収縮ひずみの設計用値について、条件を踏まえて無筋コンクリートの収縮ひずみの標準値を示した<sup>11)</sup>。

コンクリートのクリープひずみ算定式は、コ示方書と同様にH16コンクリート標準の「圧縮強度の特性値が $55\text{N}/\text{mm}^2$ を超えるコンクリート」に用いていた式に統一した。そして、普通ポルトランドセメントのみならず、早強ポルトランドセメント、高炉セメントB種およびフライアッシュセメントB種にも用いてよいこととした。これは、当面、セメントの種類の影響を、使用するセメントの強度発現特性を考慮して表現したものである<sup>12)</sup>。

#### (2) コンクリートへの物質の浸透、拡散等に関する係数

コンクリート構造の時間軸性能評価や耐久性に関する検討において重要な情報となる水分の浸透に関する係数(4.2.9)を新たに示し、塩化物イオンの拡散に関する係数(4.2.10)を更新して示した。両係数共に、普通ポルトランドセメント、高炉セメントB種、フライアッシュセメントB種等、各種セメントに対応した特性値の算定式を示した。

#### (3) 鋼材(4.3.1, 4.3.2)

SD685A, SD685Bの鉄筋の設計疲労強度の算定式について、データの蓄積を踏まえ、H16コンクリート標準の付属資料の算定式を解説に移設した。ただし、疲労寿命 $N$ が $2 \times 10^6$ 回を超える場合については<sup>13)</sup>、(付属資料4-1)に新たに示した。

鉄筋相互を接合する継手の強度は、継手の施工および施工時の検査に起因する信頼度の区分に応じた低減係数を乗じて算定する方法を導入した。これにより、新たに開発される継手に対して、施工や検査による信頼度を定めることで、設計強度を算出可能となる。

#### (4) FEMにおける材料のモデル化(4.4)

コ示方書の内容を導入した。材料のモデル化は、要素の大きさや種類、要素に生じる応力状態等、材料の力学モデルの前提条件と適用範囲を考慮して定めることとし、解説に具体例を示した。

### 3.5 構造解析(5章)

本章では、構造物の力学性状を明らかにするための構造解析に関して、解析計画、検証と妥当性の確認、部位・部材のモデル化、作用(気象条件の影響)のモデル化、について記載した。

#### (1) 検証と妥当性の確認(5.1)

コンクリート構造の物理的現象と化学的現象を連成して解く材料-構造連成応答解析システム<sup>11)</sup>等、コンクリート構造に関する構造解析技術は、更なる発展が見込まれる。こうした解析技術の発展に対して、コンクリート構造物の破壊や変形等の性能全般を、任意の材齢で評価可能な構造解析に配慮して、「5.1一般(3)コンクリート構造の応答特性を精度よく算定するには、コンクリートの力学的特性と熱力学的特性を考慮して算定するのがよい。」を新たに記載した。また、本標準が長期にわたり活用できるように、構造解析の条件設定を適切に行う記載や、解析手法の検証、妥当性の確認および評価の方法を充実した(付属資料5-1)。解析の精度を担保するために、解析手法の検証や妥当性の確認方法・評価、材料モデル、照査方法等の具体的な適用方法を整備する必要がある。骨組解析、FEMに関する標準的な事項を記載した他、必要な実験や解析事例(ベンチマーク)は、今後、手引き等で示す。

#### (2) 部位・部材のモデル化と特性(5.2)

骨組解析およびFEMにおけるモデル化について、留意事項を示した。解析手法は、照査対象のコンクリート構造物の破壊形態や履歴性状等の力学特性、限界状態や照査指標に応じて選定する。構造解析モデルは、破壊形態が適切に再現されるように、検証と妥当性が確認されたモデルを用いる。ここで、破壊形態は、コンクリート構造に生じるコンクリートのひび割れや圧縮破壊、鋼材

の降伏等、一連の損傷事象やその発生順序を含めて再現できることを指している。

### (3) 剛性および変位・変形量 (5.2.3.2)

列車運行速度の向上や低剛性な桁の採用等により、一部のコンクリート橋りょうにおいて、主桁の曲げひび割れによる剛性低下に起因した、列車通過に伴う共振現象が確認されている。衝撃係数およびたわみの算定に必要な曲げ剛性について、曲げひび割れが発生したコンクリート部材の再載荷時の剛性は、全断面有効として算出される剛性より大きく低下する場合がある。一方、桁等の構造要素では、軌道構造、地覆、高欄等の非構造部材等が曲げ剛性に寄与している。そこで、曲げひび割れによる主桁の剛性の低下と非構造部材の寄与を考慮した再載荷時に有効な剛性を用いることとした。一般に、RC構造およびPC構造の再載荷時に有効な剛性は、ひび割れによる剛性低下に対して非構造部材による剛性の寄与が大きくなる傾向にあることから、従来通り、全断面を有効とした剛性としてもよい。また、共振が発生する可能性のあるPRC構造や、再載荷時に有効な剛性を厳密に算定する場合には、(付属資料5-2)に算定方法を示した<sup>14)</sup>。

### (4) 復元力モデル (5.2.3.3)

曲げ破壊形態の棒部材を線材にモデル化する場合の復元力モデルについて、実験データの蓄積や適用実績等を踏まえ、高強度鉄筋や高軸方向力に対応した算定方法を導入した。これにより、高強度鉄筋を用いることで、過密配筋に対する鉄筋量の削減や断面縮小が可能となる。H16コンクリート標準では、軸方向鉄筋はSD390までの鉄筋を適用範囲としていたが、実験結果に基づき、軸方向鉄筋にSD490を用い、 $f_{ck} \geq 40\text{N/mm}^2$ のコンクリートを用いる場合には、本項に示す算定方法を用いてよいこととした<sup>15)</sup>。また、帯鉄筋強度の影響( $k_{w0}$ )については、SD785Rまで示されていたH16コンクリート標準を踏襲した。SD1275相当の鉄筋については、柱への適用を念頭に、 $k_{w0}$ の設定方法を(付属資料4-1)に新たに示した<sup>15)</sup>。

場所打ち杭のような高軸方向力が作用する場合の復元力モデルについては、橋梁および高架橋耐震照査の手引き<sup>16)</sup>に記載された方法の実績が蓄積されたことから、コンクリート構造編に記載した。また、履歴法則については、鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計)<sup>17)</sup>の付属資料の方法をコンクリート構造編に記載した。

### (5) 気象条件に起因した作用の影響のモデル化と特性

コンクリートの収縮およびクリープの影響( $S_H$ )、( $C_R$ )について、収縮ひずみ算定式、クリープひずみ算定式の単体で対応することは難しく、材料や気象の条件等、時間的、空間的分布の影響を構造解析において考慮することが重要である(5.3.1)。そこで、収縮・クリー

プによるPC桁の変形を評価することを念頭にした構造解析を実施するためのモデル化方法を示した。降雨の影響、フライアッシュセメントや高炉セメントにも対応可能なコンクリートの収縮ひずみの算定式を、材料-構造連成応答解析システムの解析結果に基づき導入した。この算定式では、材料や気象条件の他、骨材の収縮ひずみを入力可能とした<sup>18)</sup>。これは、今後、骨材事情の変化が想定されるなかで、収縮ひずみが大きい骨材であっても、コンクリートの配合や気象条件により、コンクリートの収縮を制御することが可能であることを示唆している。そして、これをPC桁の断面部位に応じて組合せて算定することで、時空間的分布の影響を再現できる仕組みとした(5.3.2.1)。

照査は設計耐用期間にわたり行うといった原則に対応するために、鋼材の腐食、コンクリートの凍害・化学的侵食、水の浸透や塩化物イオンの侵入に関する検討について、構造解析におけるモデル化を新たに示した(5.3.4)。

## 3.6 照査に関する基礎的事項 (6章)

本章では、構造物を構成する部位・部材の限界状態に対して照査が成立するための根本となる考えを集約した。橋りょう編の照査において参照されることを想定し、設計応答値および設計限界値の選定は、限界状態および構造解析法に応じて定めた。

### (1) 安全係数 (6.2)

照査では、解析に関する知識や経験ならびに、鉄道構造物の設計に豊富な経験を有した技術者が安全係数を適切に設定しなければならない。骨組解析に関する安全係数は、H16コンクリート標準と変わらない。一方、FEMにおける応答値係数や限界値係数は、一般に1.1~1.5とした。

### (2) 破壊・疲労破壊に関する設計応答値・設計限界値

せん断力に対する棒部材の破壊の照査について、実験結果に基づき定式化された耐力算定式の適用範囲を踏まえ、桁のような単純支持、橋脚のような片持ち支持の他、杭やカルバートに対する等価せん断スパン法、ラーメン高架橋を想定した両端固定支持等、部材の支持条件等に応じて算定式を選択することを示した。

FEMによる照査では、限界値を安全側に定めているため、基本的に解説に記載した。ただし、「6.3.2 材料の損傷指標による部材の照査」では、安全性に係わる目安の値として、限界値を条文に示した。また、材料の損傷指標を照査指標とする場合、コンクリートの疲労破壊と部材の破壊を区別なく同一の限界値とした。

### (3) 損傷に関する設計応答値および設計限界値 (6.6)

損傷に関する照査は、使用性、復旧性に応じて設定した部材の損傷レベルを満足することを確かめる。損傷状態と修復工法のイメージに基づき、FEMおよび骨組解

析に対応した設計応答値，設計限界値を解説に示した。また，修復後の部位・部材の性能回復を照査するが，一般に，実績のある修復工法が適用できる場合には，その修復工法を適用することを前提として，性能回復の照査を省略してよい旨，記述した。

### 3.7 構造計算に関する一般事項（7章）

応力度やひび割れ幅，断面耐力，損傷等に関する算定式や数値をまとめた。

#### (1) ひび割れ幅（7.6）

H16 コンクリート標準では，曲げひび割れ幅の算定における収縮およびクリープの影響を，収縮およびクリープ等の影響による曲げひび割れ幅の増加を考慮するための数値  $\epsilon'_{csd}$  で考慮し，ひび割れ発生材齢に依存した値としていた。実績を踏まえ，水掛かりの程度に応じた区分に依存した  $\epsilon'_{csd}$  に更新した。その結果，乾湿繰返しや常時潤滑の区分では  $\epsilon'_{csd}$  が小さくなり，上層梁や地中梁の上側等，曲げひび割れの検討で定まっていた部材の上側軸方向鉄筋量は削減される<sup>19)</sup>。

#### (2) 断面耐力（7.7）

棒部材の設計せん断耐力算定式では，実構造物への適用や，FEMの適用等の判断の参考となる算定式の導出背景や耐荷機構，適用範囲を，解説および（付属資料6-1）に記載した。

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  $V_{sd}$  において  $p_w \cdot f_{wyd} / f'_{cd} \leq 0.1$  とする上限を導入した。せん断補強鋼材を大量に配置すると，せん断補強鋼材が降伏する前に，圧縮側コンクリートのせん断圧縮破壊が生じる<sup>20) 21)</sup>。こうした有効とされないせん断補強鋼材の配置を回避することを意図したものである。

両端固定支持された棒部材の設計せん断耐力  $V_{asud}$  を導入した。これは，ラーメン高架橋の横梁等，その両端が固定されており，せん断スパン比  $a/d$  が小さい場合に，同一の断面諸元である単純支持条件下の棒部材と損傷状況やせん断耐力が異なることを反映したものである<sup>22)</sup>。

プレストレストコンクリート構造の設計せん断耐力  $V_{yd}$  の算定式について，プレストレス等の軸方向圧縮力の大きさによって，圧縮ストラットや斜めひび割れの角度  $\theta$  が変化することでせん断耐力が増減することを，修正圧縮場理論に基づき表した算定式<sup>23)</sup> を導入した。

棒部材に用いる設計せん断耐力  $V_{ud}$  は，耐荷機構の変化，支持条件に応じて，以下のとおり算定することとした。この結果，H16 コンクリート標準では  $a/d=2.0$  で算定値が不連続となる場合がある課題を解消した<sup>24)</sup>。

単純・片持ち支持  $V_{ud} = \max.(V_{dd}, \min.(V_{yd}, V_{wcd}))$

両端固定支持  $V_{ud} = \max.(V_{asud}, \min.(V_{yd}, V_{wcd}))$

ここで， $\min.$  はいずれか小さい方を， $\max.$  はいずれか大きい方を選定する。

「7.7.5 設計せん断伝達耐力」に示す設計せん断伝達耐力  $V_{csd}$  に対し，プレキャストの梁同士の接合面のように接合面周辺の拘束が小さい場合や，ねじりや高応力の繰返しを受ける場合においては，その影響を別途，実験等により確認することとした。

#### (3) 損傷（7.9）

線材やばねにモデル化した解析における各損傷レベルの設計限界値である部材角において，高強度鉄筋や高軸方向力へ対応するため，算定式の適用範囲を拡大した。材料の損傷指標に関する設計応答値は，コンクリートや鋼材に生じる損傷事象に対応した算定方法を導入した。

### 3.8 部材の一般事項（8章）

本章は，構造解析や限界値の算定等を行うための部材に関する一般事項を定めた。

#### (1) プレキャスト部材（8.6）

構造物の全ての部材がプレキャスト部材の場合や，一部がプレキャスト部材の場合を対象に，養生方法や工場における部材の製作，養生，保管方法や据え付け方法等によりひび割れ発生材齢が異なるため，H16 コンクリート標準に対し，これらを踏まえた  $\epsilon'_{csd}$  を設定するのがよいことを追記した。

#### (2) 継手部および接合面を有する部材（8.7）

継手部および接合面を有する部材は，継手部または接合面のいずれかを有する部材，プレキャスト部材のように，機械式継手等が用いられた継手部および部材同士が接合される接合面のいずれも有する部材を指す。特に，プレキャスト構造に関する知見や適用を踏まえ，これらの特有の事項として，新たに節を設けた。

継手部および接合面を有する部材は，実験あるいはFEMにより部材が限界状態に至らないことを確認することを原則とした。一方，既往の実験結果や類似条件での適用例等がある場合には，それを参照してモデル化や限界値の算定等を行ってよいこととした。これを確認するためには，接合面におけるせん断伝達について，一般には，せん断力に対して，せん断伝達耐力に関する照査が必要である。

継手部を有する部材の設計限界値は，4章に従い定めた継手の設計強度や部材の設計耐力等により定める他，塑性ヒンジ部の軸方向鉄筋に継手を設けた場合については，部材の力学特性におよぼす影響を実物大の模型実験等により確認する必要があることを記載した。

#### (3) 基礎部材等（8.8）

H16 コンクリート標準のフーチング等に関する記載に加え，基礎構造の基礎部材等あるいは地盤抵抗に関する事項のうち，コンクリート構造の基礎部材等に関わる事項を基礎標準より転載した（図1）。主な構造細目は，（付属資料8-4）に示した。

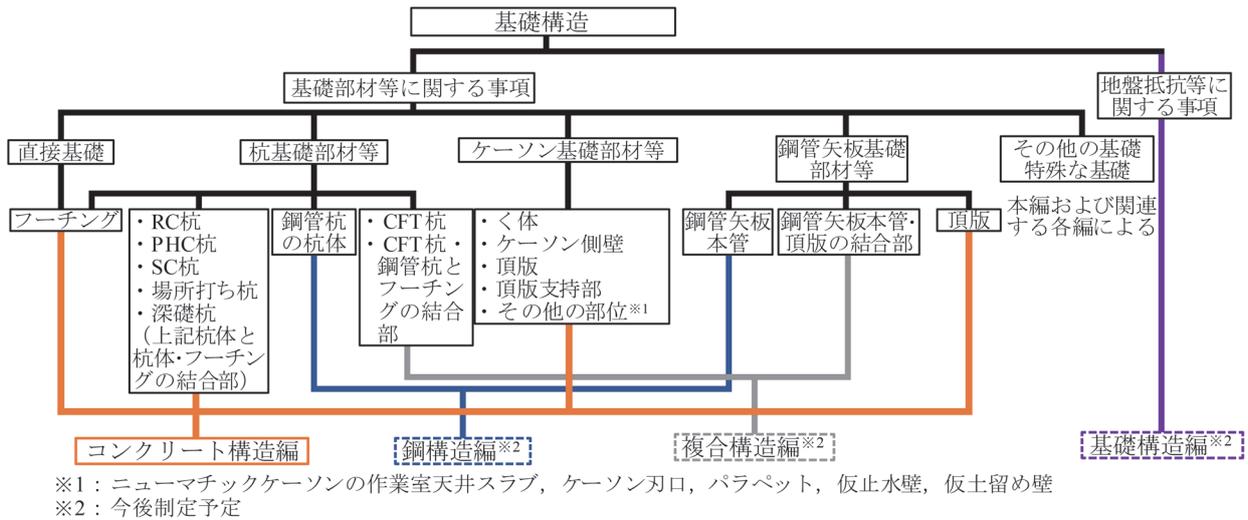


図1 基礎構造と設計標準の関係

杭基礎のフーチングの設計せん断耐力について、柱または壁前面から杭中心までの距離  $a_1$  と柱または壁前面の有効高さ  $d_1$  の比  $a_1/d_1$  が 2.0 以下である場合の算定式を次のように更新および新たに記載した (8.8.5.2)。 $a_1/d_1$  がせん断補強鉄筋比等の諸元によるが 1.0 程度以下の小さい場合に  $a_1/d_1$  が小さいほどせん断耐力が小さく算定されていた従来の設計引抜きせん断耐力の算定式に対し、実験や解析に基づき<sup>25)</sup>、 $a_1/d_1$  が小さいほどせん断耐力が比較的小さく算定されることのないよう式中の有効幅の算定式を更新した。また、杭に引き抜きが生じる場合、従来、せん断補強鉄筋の効果が不明確であったため、その効果を別途確認して耐力を評価する必要があったが、せん断補強鉄筋がせん断力を受け持つこと<sup>26)</sup>等を踏まえて、設計引抜きせん断耐力の算定式を新たに記載した。

#### 4. おわりに

コンクリート構造編で新たに導入した主な項目は、以下のとおりである。

- (1) 鉄筋に関する JIS G 3112:2020 に対応した。
- (2) 柱はり接合部の配筋や、マッシュなコンクリートに埋め込む鉄筋の基本定着長の算定方法を見直した。
- (3) 耐久性に関する鋼材の腐食に関する検討について、従来の「中性化に関する検討」から、「水の浸透に伴う鋼材の腐食に関する検討」に改訂した。
- (4) 収縮・クリープによる PC 桁等の変形を評価する構造解析法や、降雨の影響、混合セメントや骨材の品質を考慮可能なコンクリートの収縮ひずみの算定式を導入した。
- (5) 主桁の曲げひび割れと非構造部材を考慮した、桁の再載荷時剛性の算定方法を導入した。

- (6) 施工や検査の信頼性に応じた継手の設計強度の設定法や、継手部および接合面の照査を導入した。
- (7) 両端固定支持された RC 棒部材や、杭頭部、PC 棒部材、フーチング特有のせん断耐力算定式を整備した。
- (8) 非線形有限要素解析による照査法を導入した。

#### 文献

- 1) 渡辺健, 田所敏弥, 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) の改訂概要, 鉄道総研報告, Vol.37, No.11, pp.1-5, 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) 土木学会: 2017 年制定 コンクリート標準示方書 (設計編), 2018
- 4) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (コンクリート構造物), 丸善出版, 2004
- 5) 国土交通省監修 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (基礎構造物), 丸善, 2012
- 6) 土木学会: 原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル・照査例 (2021 年版), 原子力土木シリーズ 5, 2021.10
- 7) 中田裕喜, 渡辺健, 田所敏弥: RC ラーメン高架橋の柱はり接合部の構造細目が耐力に及ぼす影響, 鉄道総研報告, Vol.37, No.1, pp.29-35, 2023
- 8) 室内悠吾, 田所敏弥, 渡邊忠朋: マッシュなコンクリートに埋め込む鉄筋の定着長算定式, 令和 2 年度土木学会全国大会第 75 回年次学術講演会, V-626, 2020.9
- 9) 轟俊太郎, 石田哲也, 上田洋, 田所敏弥: 水の浸透と中性化によるコンクリート構造物中の鉄筋の腐食に関する設計法, 鉄道総研報告, Vol.37, No.10, pp.1-8, 2023

- 10) 松田芳範, 隈部佳, 木野淳一, 岩田道敏: アルカリ骨材反応の JR 東日本版抑制策の制定について, コンクリート工学, Vol.50, No.8, pp.669-675, 2012
- 11) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書改訂資料基本原則編・設計編・施工編, コンクリートライブラリー 138, 2013.3
- 12) 中村麻美, 渡辺健: セメント種類を考慮したコンクリートのクリープ係数の設計値に関する検討, プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, No.30, pp.515-518, 2021.10
- 13) 中田裕喜, 岡本大, 渡辺健, 田所敏弥: 高繰返し領域を考慮した SD685 の鉄筋の疲労強度, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.44, No.2, pp.955-960, 2022
- 14) 徳永宗正, 池田学: 衝撃係数および短期の変位・変形量の算定における部材の曲げ剛性, 鉄道総研報告【投稿中】
- 15) 佐藤祐子, 中田裕喜, 田所敏弥, 渡辺健: 高強度鉄筋を用いた RC 柱の損傷性状と変形性能算定式の適用性, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.44, No.2, pp.175-180, 2022
- 16) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 [耐震設計] (平成 24 年版) 橋梁および高架橋耐震照査の手引き～静的非線形解析による照査～, 2017.3
- 17) 国土交通省監修 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (耐震設計), 丸善, 2012
- 18) 渡辺健, 中村麻美, 石田哲也, 渡邊忠朋: 混合セメントを考慮したコンクリートの収縮ひずみ予測式, 鉄道総研報告, Vol.37, No.1, pp.11-19, 2023
- 19) 鈴木瞭, 荒木一徳, 中田裕喜, 轟俊太郎, 渡辺健: 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, 鉄道総研報告, Vol.37, No.11, pp.41-44, 2023
- 20) 坂口淳一, 土屋智史, 渡邊忠朋, 齊藤成彦, 牧剛史: セン断補強鉄筋を多量に配置した RC 梁部材のせん断破壊耐力に関する検討, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.69, No.2, pp.192-206, 2013
- 21) 中田裕喜, 渡辺健, 田所敏弥: セン断補強鉄筋を多量に配置した単純支持矩形 RC はりのせん断破壊性状に関する実験の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.631-636, 2018
- 22) 中田裕喜, 渡辺健, 田所敏弥: 両端固定支持された RC はりのせん断耐力算定式の提案, 令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会, V-621, 2022
- 23) 中田裕喜, 渡辺健, 渡邊忠朋, 谷村幸裕: セン断スパン比に対する連続性を考慮した RC 棒部材の設計せん断耐力算定法, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.69, No.4, pp.462-477, 2013
- 24) 三方康弘, 井上晋, 小林和夫, 仁枝保: PC はり部材のせん断耐力に及ぼすプレストレスの効果, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.149-159, 2001.2
- 25) 轟俊太郎, 田所敏弥, 谷村幸裕, 進藤良則: セン断スパン比の小さい杭基礎フーチングのせん断耐力評価法, 鉄道総研報告, Vol.37, No.10, pp.9-14, 2023
- 26) 轟俊太郎, 田所敏弥, 谷村幸裕, 進藤良則: 上側引張を受ける RC 梁のせん断耐力に及ぼすせん断補強鉄筋の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.739-744, 2011



# 鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物） 「第Ⅳ編 支承構造」の要旨

池田 学\* 田所 敏弥\*\*  
轟 俊太郎\*\* 豊岡 亮洋\*\*\*

Design Standard and Commentary for Railway Structures (Concrete Structures)  
Outline of “Part IV: Bearing Structures”

Manabu IKEDA Toshiya TADOKORO  
Shuntaro TODOROKI Akihiro TOYOOKA

This paper outlines the Design Standard and Commentary for Railway Structures (Concrete Structures) “Part IV: Bearing Structures”. Every technology related to the design of bearing structures in railway bridges is summarized in this part, which has been described in several related design standards. This part provides common design methods for bearing structures, and specific design methods for three typical bearing structures: (a) rubber bearings and stoppers, (b) steel bearings, and (c) bearings for horizontal force dispersing structures and isolation structures. This paper introduces the outline of each chapter of this part and revisions from related design standards.

キーワード：支承構造，ゴム支承，ストッパー，鋼製支承，水平力分散構造，免震構造

## 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）」を、2023（令和5）年1月に発刊した。今回の改訂により、基本原則編、構造物・構造要素編および部位・部材編の3階層で構成されることとなった<sup>1) 2)</sup>。本稿では、部位・部材編に位置づけられる「第Ⅳ編 支承構造」（以下、支承構造編）について、構成や各章の要旨を解説する。

## 2. 支承構造編の作成方針

### 2.1 支承構造編の位置づけ

支承構造編は、橋りょう編に基づき、橋りょうの支承部特有の設計に関わる一連の事項をまとめたものである。コンクリート構造の橋りょうの支承部のみでなく、鋼・合成構造、複合構造、あるいはその組合せで構成される橋りょうの支承部全てに適用されることを想定している。

### 2.2 支承構造編と関連する設計標準

支承部の設計は、「鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）」（平成16年4月）<sup>3)</sup>（以下、H16コンクリート標準）以外に、「鉄道構造物等設計標準・同解説（鋼・合成構造物）」（平成21年7月）<sup>4)</sup>（以下、鋼・合成標準）、「鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）」（平成24年9月）<sup>5)</sup>（以下、耐震標準）、「鉄道構造物等設計標準・同解説（変位制限）」（平成18年2月）<sup>6)</sup>（以下、変位制限標準）と多数の設計標準に記載されている。このうち変位制限標準における支承部の設計は、支承部自体の照査というより、支承部の変位・変形に伴う軌道面の不同変位を照査しており、橋りょう編に記載されることとなった<sup>7)</sup>。

支承構造編は、H16コンクリート標準の「16章 支承部」の内容をもとに、鋼・合成標準における鋼製支承や水平力分散支承等の照査や、耐震標準における地震時の支承部のモデル化や照査を取り込み、さらには新たな知見を導入して再整理している。

### 2.3 支承構造編の構成

表1に、支承構造編の目次構成と概要、およびH16コンクリート標準、鋼・合成標準、耐震標準の記載場所を示す。これまでは、支承部の照査の基本が複数の設計標準に記載されており、鉄道橋の支承部の照査の原則や、支承形式や構造物の種類によらない共通の照査の考え方が必ずしも明確ではなかった。また、設計標準間で、共

\* 鉄道力学研究部 構造力学研究室  
\*\* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室  
\*\*\* 鉄道地震工学研究センター 地震応答制御研究室

表 1 支承構造編の目次構成と概要、関連標準の記載場所について

目次	記載事項	関連標準 <sup>*2</sup>
1章 総則	設計の基本、対象、支承構造選定時に考慮すべき事項、用語や記号の定義 材料や装置の品質、照査の前提となる細目、施工や維持管理に関する条件 ゴムやコンクリートの劣化、鋼材の腐食に対する検討 ゴム、鋼材、コンクリート等の特性値および設計値 支承部のモデル化（ばね、有限要素） 各装置 <sup>*1</sup> の照査の考え方や各要求性能に対する照査の方法 各装置 <sup>*1</sup> の力、応力、変位・変形の設計応答値の算定方法や設計限界値の設定方法	[コン]16章
2章 適用の要件		[鋼]第Ⅱ編9章
3章 耐久性に関する検討		[耐震]8.4.4,9.5.2,10.3
4章 材料		
5章 構造解析		
6章 照査に関する基礎的事項		
7章 構造計算に関する一般事項		
8章 ゴム支承とストッパーを用いた支承部の照査	ゴム支承とストッパーを用いた支承部の照査の特有な事項	[コン]16章 [鋼]第Ⅱ編9章（一部） [耐震]8.4.4,9.5.2,10.3
9章 鋼製支承を用いた支承部の照査	鋼製支承を用いた支承部の照査の特有な事項	[コン]16.8 [鋼]第Ⅱ編9章 [耐震]8.4.4,9.5.2,10.3
10章 水平力分散構造および免震構造の支承部の照査	水平力分散構造、免震構造の積層ゴム支承（ゴム支承が落橋防止装置を兼ねる）、ゴム支承とダンパー式ストッパーを用いた支承部の照査の特有な事項	[コン]16章（一部） [鋼]第Ⅱ編9章 [耐震]8.4.4,9.5.2,10.3

注) \*1 装置については3.1.1参照

\*2 [コン]: H16 コンクリート標準, [鋼]: 鋼・合成標準, [耐震]: 耐震標準

通する内容でありながら、材料・構造種別で慣例的な照査法の違いや改訂時期の違い等により記載内容が異なる項目があるという課題もあった。

そこで、1章～7章に、支承部の設計の基本的な考え方を含め支承形式共通の一連の設計法を示した上で、8章～10章に、一般的な支承形式として、ゴム支承とストッパーを用いた支承部、鋼製支承を用いた支承部、および水平力分散構造、免震構造の支承部を対象に具体的な設計法を定めることとした。これにより、支承構造編は、内容はこれまでの設計標準を基本的に踏襲しているが、鉄道橋の支承部の設計を包括する新たな編として定めており、支承部の設計に関する事項が網羅されている。

## 2.4 橋りょう編との関連

支承部の設計に関連する事項は、新しい設計標準の構成の原則<sup>1) 2)</sup>に従い、橋りょう編と支承構造編に跨って記載されている。このため、支承部の設計にあたっては、橋りょう編により、支承部の照査に用いる作用の設定、支承部を含む橋りょうの構造解析、性能レベルに応じた支承部の損傷レベルの設定等を行い、支承構造編によって支承部の応答値の算定や照査を行う。なお、橋りょうを設計する際の支承形式選定時の留意事項、構造解析における支承部のモデル化についても支承構造編による。

## 3. 支承構造編の要旨と改訂概要

### 3.1 総則（1章）

#### 3.1.1 適用範囲

支承構造編は、主に、鉄道橋のゴム支承あるいは鋼製支承を用いた支承部を対象としている。

支承部は、これまでと同様に以下の装置で構成されるものとしている。

- ・支承本体：桁からの鉛直力を橋脚、橋台等に伝達する装置
- ・移動制限装置：桁からの水平力を橋脚、橋台等に伝達するとともに、桁の移動を制限する装置
- ・落橋防止装置：偶発作用による桁の橋脚、橋台等からの逸脱を防止する装置
- ・桁座・桁端：支承本体、移動制限装置、落橋防止装置の各装置の取付け部

図1にゴム支承とストッパーを用いた支承部の各装置の例を、図2に鋼製支承を用いた支承部の各装置の例を示す。ゴム支承としては、パッド型ゴム支承、積層ゴム支承、鉛プラグ入り積層ゴム支承、高減衰ゴム支承、鋼製支承としては、線支承、支承板支承、球面支承等がある。

#### 3.1.2 支承部の設計の基本

支承部の設計の基本的な考え方として、桁からの鉛直力および水平力を確実に橋脚、橋台へ伝達できる構造とし、その役割が十分に発揮できるように設計するものとした。また、地震時における落橋を防止するため、落橋防止装置を設置するものとした。さらに、支承部の照査は、構成される各装置が、橋りょうの各要求性能から定まる支承部の限界状態に至らないことを確かめることにより行うものとした。

支承形式選定時に考慮すべき事項として、橋りょう編に示される橋りょうの構造計画時に検討すべき事項に対応して、桁および橋脚、橋台の構造、支持状態、移動量と回転量、移動方向と回転方向の関係、常時の走行安全性や乗り心地の確保等における留意事項を定めた。

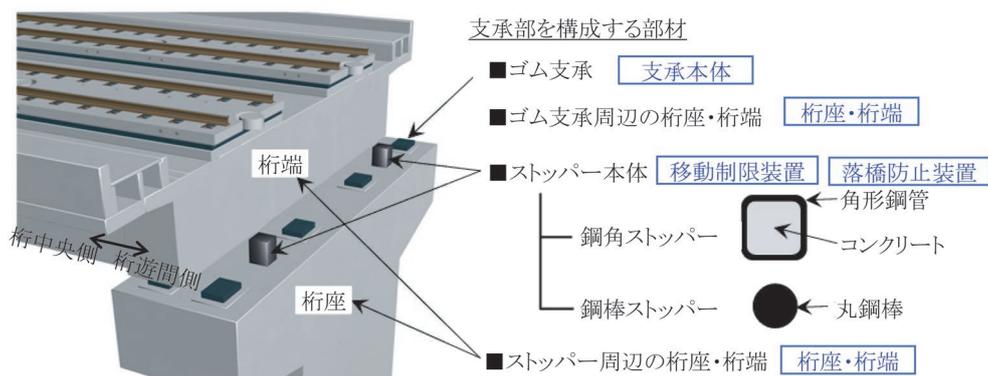


図1 ゴム支承とストッパーを用いた支承部の構造例

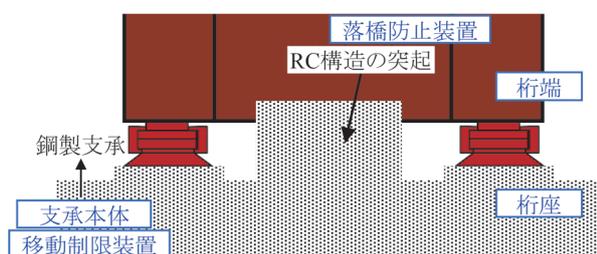


図2 鋼製支承を用いた支承部の構造例  
(落橋防止装置を鋼製支承と別にした構造の例)

### 3.2 適用の要件 (2章)

支承構造編に記載した手法を適用する上での要件となる、材料や装置の品質、照査の前提となる細目、施工や維持管理に関する条件を示した。支承部に使用される材料として、ゴム、各種鋼材、コンクリート等の品質について定めた。また、各材料を組み立てて構成された装置としての品質管理も重要であるため、試験等により品質が確認されたものを用いること等を定めた。一例として、主に鋼橋や合成桁に用いられる、ゴム支承と鋼製支承を対象に、品質管理の方法を付属資料に示した。

### 3.3 耐久性に関する検討 (3章)

支承構造編の6章、7章には、材料劣化に伴う性能の経時変化を考慮しない照査法を示している。この前提として、支承部の材料について、設計耐用期間における水、飛来塩分、日射、温度、湿度、酸素、紫外線、オゾン等の気象の影響により生じる材料劣化が、橋りょうの性能に影響しない軽微な範囲に留めることが必要となる。このため、設計耐用期間における、ゴムやコンクリートの劣化、鋼材の腐食等の材料劣化が支承部の性能に影響しない範囲に留まることを確かめる必要がある。

### 3.4 材料 (4章)

支承部に用いる材料の特性値および設計値は、支承部の構造、材料の機械的性質の試験値やそのばらつき等を

考慮して定めるものとした。

### 3.5 構造解析 (5章)

設計では、一般に支承部をモデル化せずに橋りょうの構造解析を行うことが多いが、免震構造や水平力分散構造等では、特に地震時において支承部の挙動が橋りょう全体の挙動に及ぼす影響は無視できず、支承部をモデル化して橋りょうの構造解析を行う事例も増えている。支承部をモデル化することで、構造解析から支承部の応答値を直接算定することができる。この場合には、各装置、例えばゴム支承等の非線形特性や減衰特性を適切に設定する必要がある。

### 3.6 照査に関する基礎的事項 (6章)

支承部の照査は、設計耐用期間中に生じる設計作用に対し、橋りょうが要求性能を満足するように、各装置が、各要求性能から定まる支承部の限界状態に至らないことを確かめることにより行う。表2に、支承部の各装置について、橋りょうの要求性能、限界状態に対応する照査指標の例を示す。支承本体および移動制限装置の照査は、一般に、安全性、使用性および復旧性、落橋防止装置の照査は、安全性および復旧性、必要に応じて使用性に関して行う。桁座・桁端の照査は、取り付く装置に応じた要求性能に関して行う。

表3に、橋りょうの性能レベルと支承部の損傷レベルの関連を示す。保守や修復性の照査では、橋りょう編に基づき、表3のように、性能レベルをもとに支承部の損傷レベルが設定される。表4に支承部の各損傷レベルの定義を示すが、H16コンクリート標準または耐震標準等から定義を一部見直した。具体的には、一部の装置が損傷・破壊（このような場合は耐震標準等では損傷レベル3）しても、支承部としての耐力低下はほとんどなく早期復旧が可能な場合は、損傷レベル2とみなせるようにした。これは、最近の大規模地震でストッパーの桁座が損傷しても早期に修復可能であった事例等を踏まえた

表 2 橋りょうの要求性能, 限界状態および各装置の照査指標の例 (支承部の照査に関わる項目のみ)

要求性能	性能項目	限界状態	照査指標			
			支承本体	移動制限装置	落橋防止装置*1	桁座・桁端
安全性	構造安全性	破壊	(落橋防止装置を兼ねる場合) 力, 応力度	(落橋防止装置を兼ねる場合) 力, 応力度	力, 応力度	力, 応力度
		疲労破壊	—	—	—	—
	変位・変形の限界 (桁ずれ, 桁転倒等)	(落橋防止装置を兼ねる場合) 力, 応力度	(落橋防止装置を兼ねる場合) 力, 応力度	力, 応力度, 水平変位 (桁ずれ) *2	力, 応力度	
	公衆安全性	—	— (必要に応じて)			
使用性	外観	—	— (必要に応じて)	— (必要に応じて)	— (必要に応じて)	ひび割れ幅, 応力度 (必要に応じて)
	保守	損傷	力, 応力度, 変形 (圧縮, せん断等)	力, 応力度	—	力, 応力度
復旧性	修復性	損傷	力, 応力度, 変形	力, 応力度, 変形	力, 応力度, 変形	力, 応力度
		残留変位の限界	— (必要に応じて)			

注) \*1 支承本体, 移動制限装置となる装置とは別に設ける落橋防止装置を対象とする。

\*2 桁座寸法の確保による落橋防止装置の場合の照査指標を表す。

表 3 橋りょうの性能レベルと支承部の損傷レベルの関連

要求性能	使用性 (保守)		復旧性 (修復性)	
性能レベル	1	1	2	3
支承部の損傷レベル	1	1	2~3	3

表 4 支承部の損傷レベルの定義

	損傷状態
損傷レベル 1	無損傷の状態
損傷レベル 2	桁ずれの少ない比較的軽微な損傷状態。場合により補修が必要な状態
損傷レベル 3	桁ずれは生じるが落橋はしない。補修が必要で、場合によっては取替えが必要な状態

ものである。このように、支承部の損傷レベルを、各装置の状態から定義するのではなく、橋りょうの要求性能を満足する状態に基づき定義するように改めた。

また、復旧しやすい構造物の設計法を意図し<sup>1)</sup>、支承部の損傷に関する照査において、各装置がすべて設計限界値以下であることを確かめるのではなく、支承部として望ましい損傷形態となるように、各装置の照査値等により損傷順序を制御することを推奨した。例えば、支承本体とその桁座・桁端では、支承本体が補修の容易な構造であればその損傷を先行させる、桁座と桁端では、一般に桁遊間側の桁端の修復は困難な場合も多いので桁座前面側の損傷を先行させる等である。

### 3.7 構造計算に関する一般事項 (7章)

支承部共通の構造計算として、各装置の設計応答値と設計限界値の算定方法を定めた。例えば、設計応答値の算定において、H16 コンクリート標準からコンクリート桁の水平移動量の算定、鋼・合成標準から鋼桁等の可動支承の常時における設計移動量の算定方法等を示した。

### 3.8 ゴム支承とストッパーを用いた支承部の照査 (8章)

#### 3.8.1 対象と構成

図 1 に示すような、支承本体としてゴム支承を、移動制限装置として鋼棒ストッパーまたは鋼角ストッパーを、落橋防止装置としてストッパーまたは桁座寸法の確保を用いる場合を対象とする。図 3 にゴム支承の例を示すが、8章では、このうち図 3 (a) のパッド型ゴム支承 (主として桁を鉛直方向に支持し、桁座・桁端に直接固定されていない) を対象とする。短支間の鋼桁にゴム支承を用いる場合もここに含まれる。図 3 (b) の鉛プラグ入り積層ゴム支承は、後述するように、10章で対象とする水平力分散構造または免震構造に用いるゴム支承である。

8章は、上記の支承部の設計について、H16 コンクリート標準を基本に、一部鋼・合成標準から該当する内容を取り込み、適用の要件、材料、構造解析、各照査方法等を整理して示した。

なお、ゴム支承とダンパー式ストッパーを用いる支承部は、地震時は水平力分散構造となるため 10章に記載した。

#### 3.8.2 主な変更点

H16 コンクリート標準等からの主な変更点は以下の

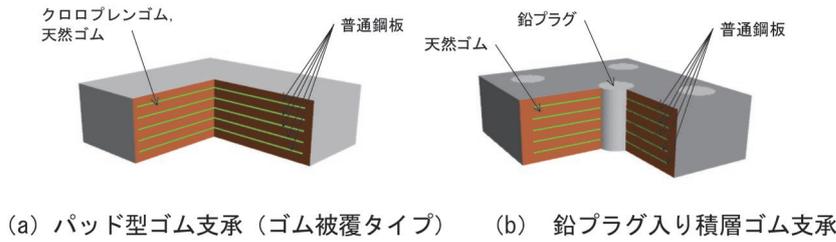


図3 ゴム支承の例



図5 鋼製支承の例  
(支承板支承)

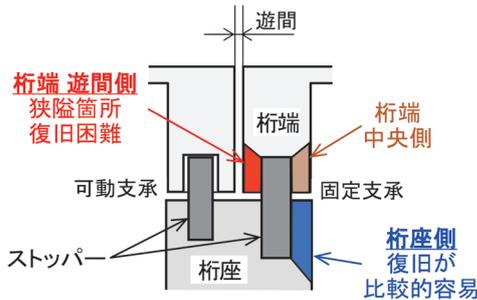


図4 地震後の支承部の修復の難易度

通りである。

- ・最近の実績を踏まえ、ゴム支承本体の細目（ゴム一層の厚さ、補強鋼板の板厚等）、支承から桁座縁端までの距離、桁座・桁端の補強鉄筋等の構造細目を見直した。
- ・桁座寸法の確保を落橋防止装置とする場合、橋軸方向の大規模地震に対するストッパー周辺の桁座・桁端は、地震後の復旧の容易さかつ確実さを踏まえ、検査用通路等の維持管理設備を有すること、桁座縁端から桁端縁端までの距離を確保すること等を前提に、損傷が生じた場合に修復することをもって、保守および修復性の照査に代えてよいとする方法も可能となるようにした。
- ・ストッパー埋込み部において、コンクリートの浮きを伴う損傷が桁端の遊間側に生じた場合には、桁座に生じた場合と比較して地上から損傷を発見しにくく、修復時には狭隘な箇所ではつり出し等を要し、修復作業が大変となる。そこで、桁座前面側を桁端の遊間側より先行して損傷させる等、修復しやすい箇所に損傷を制御することを示した（図4）。
- ・ストッパーの桁座・桁端埋込み部の水平耐力の算定式について、鉄筋量に加え、鉄筋の折り曲げ形状と配置（ストッパーとの位置関係）を考慮したより高精度の算定法を、載荷試験や非線形有限要素解析を基に構築した<sup>8)</sup>。これにより、ストッパー埋込み部の鉄筋量を増やすことなく、地震で支承部の損傷が発生する場合に、修復しやすい箇所に損傷を制御することが可能である。また、鋼角ストッパーの埋込み長、ストッパー周辺の補強鉄筋の配筋、ストッパー埋込み部のあき等の構造細目を最近の実績等も踏まえて見直した。鋼棒ス

トッパーのスパイラル筋の外径の記載を追加した。

### 3.9 鋼製支承を用いた支承部の照査（9章）

#### 3.9.1 対象と構成

図2に示すような、支承本体として鋼製支承を、移動制限装置および落橋防止装置として支承本体と一体の構造または別の構造を用いる場合を対象とする。鋼製支承は、平板支承、鋳鋼の線支承、支承板支承（図5）および球面支承を対象とした。

9章は、上記の支承部の設計について、鋼・合成標準を基本に、一部をH16コンクリート標準から該当する内容を取り込み再整理して示した。

#### 3.9.2 主な変更点

鋼・合成標準等からの主な変更点は以下の通りである。

- ・支承板支承として、鋼合金支承板支承（BP-A 支承）に、密閉ゴム支承板支承（BP-B 支承）についても記載を追加した。これは、既設鋼橋の支承取替えにおいて適用事例<sup>9)</sup>が増えており、適用のニーズが高いためである。BP-B 支承の照査は基本的にBP-A 支承と同じであり、特有な事項としてPTFE板や密閉ゴムの特性値、鋼とPTFE板の摩擦係数、構造細目等を記載した。
- ・水平地震動や鉛直地震動により、桁の転倒や浮き上がりによって支承部に上向きの鉛直力（上揚力）が働く。最近地震動レベルが増大しているが、上揚力の算定法が不明確なため上揚力に対する照査が厳しくなっており、これを満足するために鋼製支承を大型化せざるを得ない場合もある。そこで、解析による検討<sup>10)</sup>に基づき、地震時の支承部の上揚力の算定法や照査法について見直した。

### 3.10 水平力分散構造および免震構造の支承部の照査（10章）

#### 3.10.1 対象と構成

表5に、10章で対象とする支承形式の例を示す。本章では、パッド型ゴム支承とダンパー式ストッパーを用いる支承部（表5の支承形式I）、積層ゴム支承、鉛プラグ入り積層ゴム支承（図3（b））、高減衰積層ゴム支承等による水平力分散構造の支承部（表5の支承形式II）、および鉛プラグ入り積層ゴム支承等のエネルギー

表5 10章で対象とする支承形式の例

構造	支承形式	支承本体	移動制限装置	落橋防止装置
水平力分散構造	I	・パッド型ゴム支承	・ダンパー式ストッパー	・ダンパー式ストッパー
	II	・積層ゴム支承 ・鉛プラグ入り積層ゴム支承、高減衰積層ゴム支承* 等	・鋼棒ストッパー ・鋼角ストッパー ・水平沓、サイドブロック等	・(橋軸方向) ゴム支承本体 ・(橋軸直角方向) ゴム支承本体、移動制限装置
免震構造	III	・鉛プラグ入り積層ゴム支承 高減衰積層ゴム支承 等	・鋼棒ストッパー ・鋼角ストッパー ・水平沓、サイドブロック等	・(橋軸方向) ゴム支承本体 ・(橋軸直角方向) ゴム支承本体、移動制限装置

注) \*エネルギー吸収による減衰等の効果は考慮しないで設計する。

吸収性能を有するゴム支承を支承本体に用いた免震構造の支承部(表5の支承形式III)を対象とする。鉛プラグ入り積層ゴム支承等を用いた場合でも、エネルギー吸収による減衰等の動的な効果を考慮せずに水平力分散構造として設計する場合は、水平力分散構造(表5の支承形式II)として取り扱う。対象となる支承部にはこの他にも多様な構成が考えられるが、10章では表5に例示する、支承本体、移動制限装置および落橋防止装置で構成される3つの支承形式を対象とした。

10章は、上記の支承部の設計について、H16コンクリート標準、鋼・合成標準および耐震標準から、該当する内容を取り込み再整理して示した。

### 3. 10.2 主な変更点

主な変更点は以下の通りである。

- ・ゴム支承の照査項目について、8章のパッド型ゴム支承と整合するように鋼・合成標準から見直した。また、保守の照査に用いる損傷レベル1のゴム支承のせん断ひずみおよび局部せん断ひずみの限界値、保守および修復性の照査におけるゴム支承の引張応力度の限界値を追加した。
- ・ゴム支承の非線形モデルについて、鋼・合成標準および耐震標準をもとに、ハードニングの影響や低温時の剛性の変動等を考慮して設定することを追加した。また、付属資料にモデル化の例を示した。
- ・水平力分散構造や免震構造に用いるゴム支承の適用上の留意点や設計フローを付属資料に整理して示した。

## 4. おわりに

支承構造編の作成のポイントや主な変更点は以下の通りである。

- ・これまで多数の設計標準に記載されていた支承部の設計に関わる事項をもとに、新たな知見を取り入れ、部位・部材編の位置付けとして作成した。
- ・橋りょう編に基づき、支承部の設計の基本を含め支承形式共通の一連の設計法を構築するとともに、3つの一般的な支承形式についてより具体的な設計法を示した。
- ・ストッパー周辺の桁座・桁端の修復性の照査や鋼角ス

トッパー埋込み部の耐力算定式を見直した。

- ・鋼製の支承板支承の追加、地震時の上揚力に対する照査法を見直した。
- ・水平力分散構造および免震構造に用いるゴム支承の限界値の見直しやモデル化の留意点の追記等を図った。支承構造編は、鉄道橋の新設の支承部全てに適用されるものであり、支承構造編の制定により、今後利便性がより高まるものと考えている。

## 文 献

- 1) 渡辺健, 田所敏弥, 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)の改訂概要, 鉄道総研報告, Vol.37, No.11, pp.1-5, 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) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編: 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
- 4) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(鋼・合成構造物), 丸善, 2009
- 5) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計), 丸善, 2012
- 6) 国土交通省監修・鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(変位制限), 丸善, 2006
- 7) 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
- 8) 轟俊太郎, 森勇樹, 田所敏弥, 渡辺健: 鋼角ストッパー埋込み部の設計耐力算定式, 鉄道総研報告, Vol.37, No.1, pp.1-9, 2023
- 9) 丹羽雄一郎, 木村元哉, 矢島秀治: 既設鉄道合成桁へのBP-B支承の適用, 土木学会第68回年次学術講演会, VI-463, 2013
- 10) Masamichi SAITO, Tatsuya NIHEI, Yugo DOUCHI: Characteristics of Uplifting Force Acting on Bridge Bearings during Earthquakes, 12th World Congress on Railway Research, 2019.

# 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）」<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）ラーメン高架橋の試設計を行い、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 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。

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

ここに、 ${}_tI_{Rd}$ ：時間  $t$  における設計応答値

${}_tI_{Ld}$ ：時間  $t$  における設計限界値

$\gamma_i$ ：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

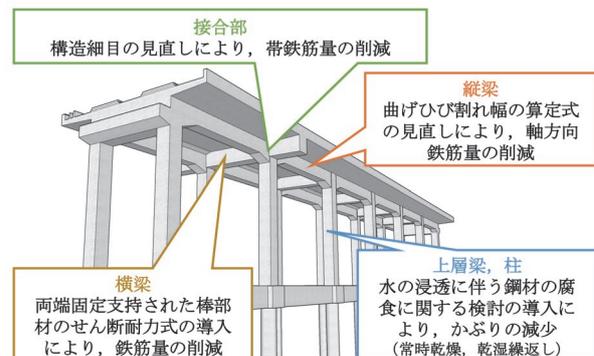


図1 ラーメン高架橋の設計において想定される設計標準改訂に伴う主な影響

\* 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

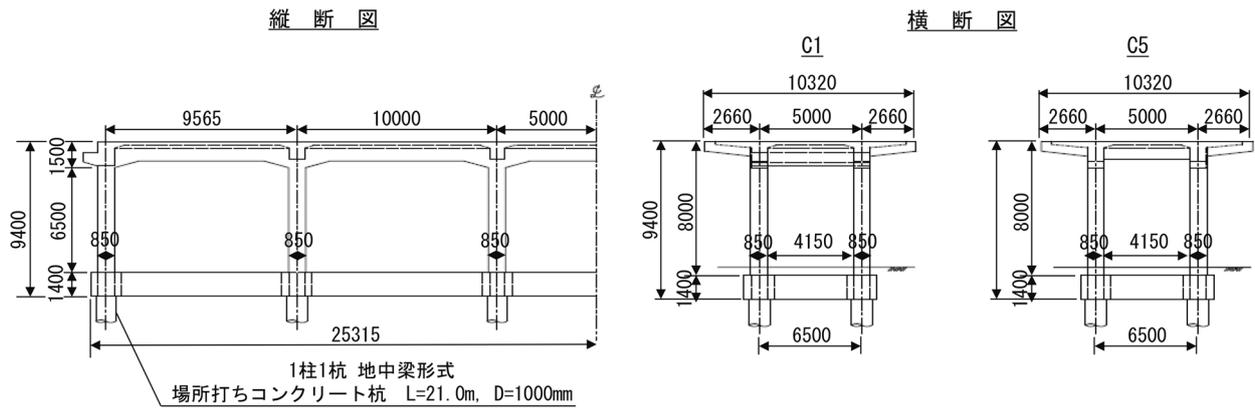


図2 対象高架橋の構造一般図(単位: mm)

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			
			$\beta$	$\gamma$	かぶり (mm)	気象条件等の区分	$\eta_w$	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,  $\beta$ : 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

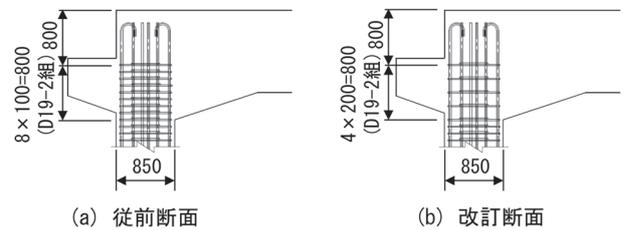


図3 柱梁接合部内の帯鉄筋量(単位: mm)

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<sup>4)</sup>。

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<sup>4)</sup>。

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 $\epsilon'_{csd}$ 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<sup>4)</sup>。

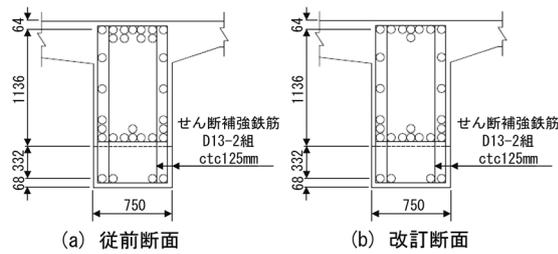


図4 上層縦梁 (単位: mm)

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 <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	27	27	
鉄筋の引張降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	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	$\epsilon'_{csd}$ ( $\mu$ )	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	

※ $\epsilon'_{csd}$ : 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、 $\epsilon'_{csd}$ の値は450 $\mu$ から250 $\mu$ 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され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<sup>4)</sup>。

なお、本試設計では、ラーメン高架橋の接続形式とし

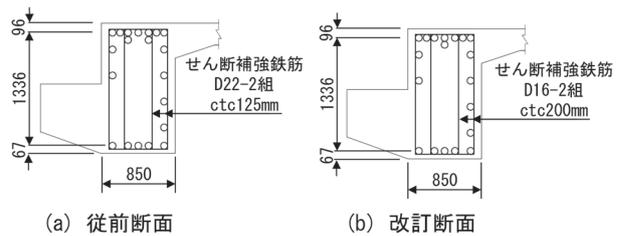


図5 端部ラーメンの上層横梁 (単位: mm)

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 <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	27	27
鉄筋の引張降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	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 $M_{ed}$ (kN・m)	3944.3	-	-
	構造物係数 $\gamma$	1.0	-	-
$\gamma \cdot M_{dmax} / M_{ed}$	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、

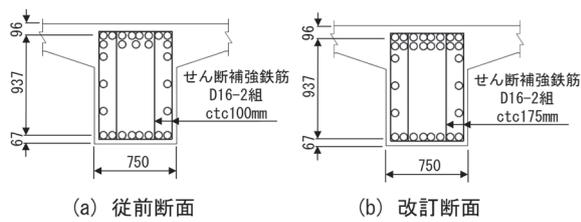


図6 中間部ラーメンの上層横梁（単位：mm）

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 <sup>2</sup> )		①従前断面 <sup>*1</sup>	②改訂計算 <sup>*2</sup>	③改訂断面 <sup>*3</sup>
鉄筋の引張降伏強度 (N/mm <sup>2</sup> )	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 c/c100mm	D16-2 組 c/c100mm	D16-2 組 c/c175mm
$p_w \cdot f_{wyd} / f'_{cd}$		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 $\gamma$	-	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 $\epsilon'_{csd}$ 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

# 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

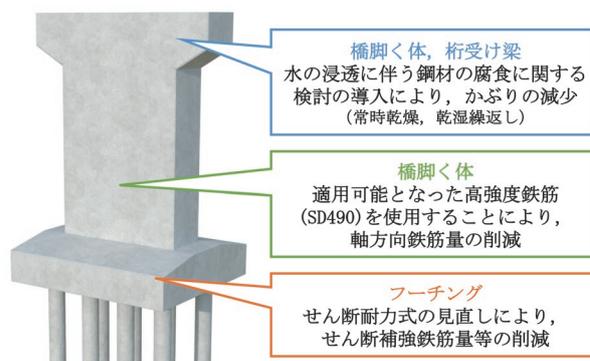


図1 橋脚の設計において想定される設計標準改訂に伴う主な影響

\* 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

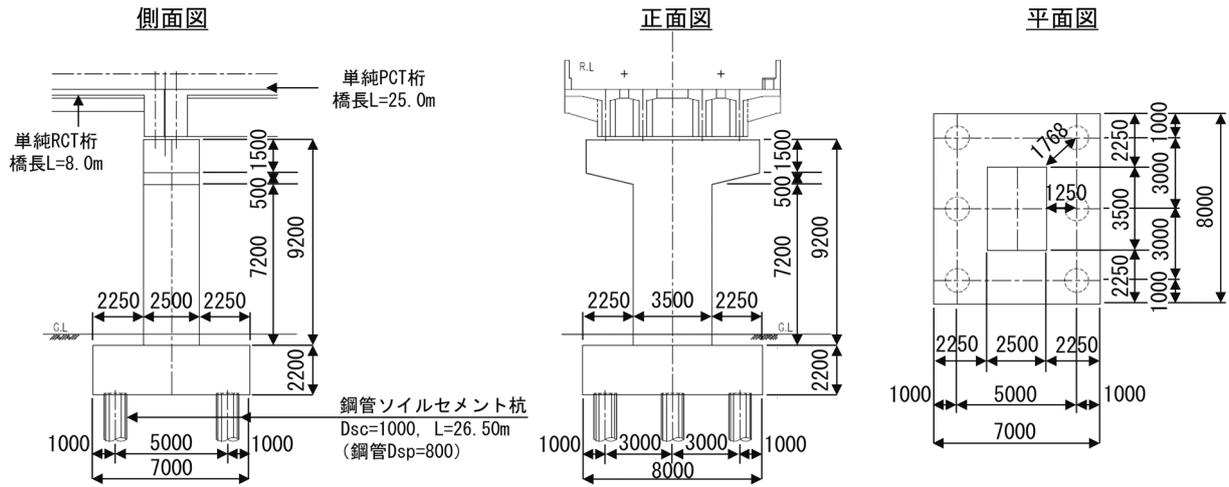


図2 対象構造物の構造一般図 (単位: mm)

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	1.0	40	常時湿潤	1.0	45
	下面 <sup>*4</sup>	55	10	1.0	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: フーチング下面是、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。

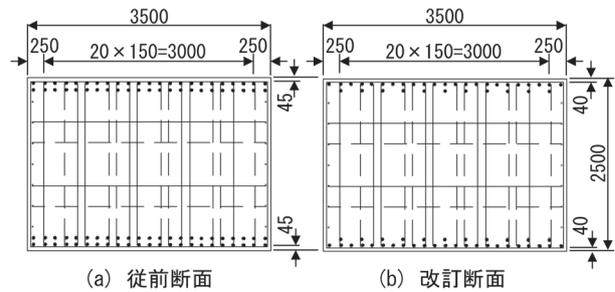


図3 橋脚く体断面図 (単位: mm)

## 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 D38-23本	D38-23本 D38-11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

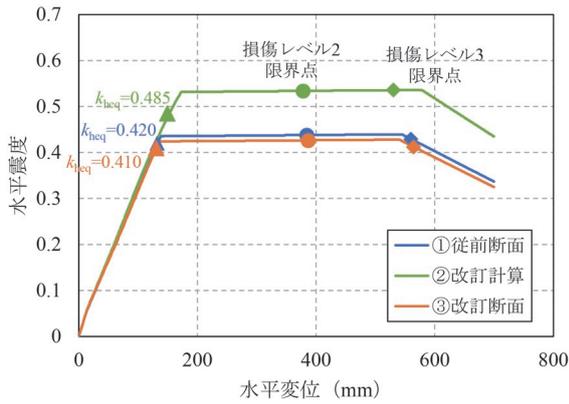


図4 橋脚く体の荷重変位関係

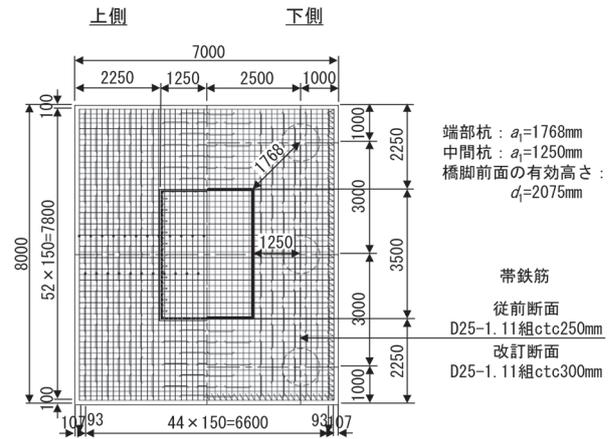


図5 フーチング平面図 (単位: mm)

### 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

鉄道総研報告 監修スタッフ

■監修責任者

芦谷公稔

■編集責任者

谷村幸裕

■企画・監修

川崎邦弘	長倉 清	日比野有	高橋紀之
仁平達也	石毛 真	神田政幸	重枝秀紀
桃谷尚嗣	布川 修	新井英樹	福田光芳
松井元英	上半文昭	斉藤実俊	水上直樹
富田 優	小島謙一		

鉄道総研報告 第37巻 第11号

2023年11月1日 発行

監修・発行所：公益財団法人 鉄道総合技術研究所

〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38

©2023 Railway Technical Research Institute

本誌に関するお問い合わせ先  
総務部広報 電話 042-573-7219

# RTRI REPORT

Vol. 37 No. 11

Nov. 2023

## REVIEWS

- Outline of Revised Design Standard and Commentary for Railway Structures (Concrete Structures)  
..... · K.WATANABE, T.TADOKORO, M.IKEDA, M.OKAMOTO (1)
- Design Standard and Commentary for Railway Structures (Concrete Structures) Outline of “Part I:  
General Principles”  
..... · T.TADOKORO, K.WATANABE, M.IKEDA, M.OKAMOTO (7)
- Design Standard and Commentary for Railway Structures (Concrete Structures) Outline of “Part II:  
Bridge Structures”  
..... · K.WATANABE, M.IKEDA, M.OKAMOTO (15)
- Design Standard and Commentary for Railway Structures (Concrete Structures) Outline of “Part III:  
Concrete Structure”  
..... · K.WATANABE, Y.NAKATA, S.TODOROKI (25)
- Design Standard and Commentary for Railway Structures (Concrete Structures) Outline of “Part IV:  
Bearing Structures”  
..... · M.IKEDA, T.TADOKORO, S.TODOROKI, A.TOYOOKA (35)

## RESEARCH REPORTS

- Trial Design of the RC Rigid Frame Viaduct Applying the Revised Standard for Railway Concrete  
Structures  
..... · R.SUZUKI, K.KARAKI, Y.NAKATA, S.TODOROKI, K.WATANABE (41)
- Trial Design of the RC Pier Applying the Revised Standard for Railway Concrete Structures  
..... · R.SUZUKI, K.KARAKI, Y.NAKATA, S.TODOROKI, K.WATANABE (45)

