

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^{1) 2)}。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】³⁾（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）⁴⁾（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）⁵⁾（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¹⁾。

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⁶⁾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^{※1}

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 ^{※3} SD490 まで ^{6)※3}	
	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 ^{※3}	
	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 ^{※4}	
	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 ^{※5})	
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} ^{※2}	$f_{ck}=50N/mm^2$ $f_{syd}=390N/mm^2$	$f_{ck}=80N/mm^2$ $f_{syd}=685N/mm^2$	
	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 $V_{yd}(RC)$ ^{※2}	棒部材の設計せん断耐力 $V_{yd}(RC)$ ^{※2}	$f_{cd}=47N/mm^2$ $f_{wyd}=800N/mm^2$ 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} ^{※2}	腹部コンクリートの設計斜め圧縮破壊耐力 V_{wcd} ^{※2}	$f_{ck}=50N/mm^2$	$f_{ck}=80N/mm^2$
	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} ^{※2}	両端固定支持された棒部材の設計せん断耐力 V_{asud} ^{※2}	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 $V_{yd}(PC)$ ^{※2}	棒部材の設計せん断耐力 $V_{yd}(PC)$ ^{※2}	(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} ^{※2}	面部材の押抜きせん断耐力 V_{pcd} ^{※2}	$f_{ck}=50N/mm^2$	$f_{ck}=50N/mm^2$
	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} ^{※2}	面内力を受ける面部材の設計断面耐力 T_{yd}, C_{ud} ^{※2}	$f_{ck}=50N/mm^2$ $f_{syd}=390N/mm^2$	$f_{ck}=50N/mm^2$ $f_{syd}=685N/mm^2$
	7.7.5 設計せん断伝達耐力	設計せん断伝達耐力 V_{cud} ^{※2}	設計せん断伝達耐力 V_{cud} ^{※2}	$f_{syd}=390N/mm^2$	$f_{syd}=490N/mm^2$
	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} ^{※2}	ねじり補強鉄筋のない場合の設計ねじり耐力 M_{cud}, M_{tud} ^{※2}	—	—
ねじり補強鉄筋のある場合の設計ねじり耐力 $M_{cud}, M_{tud}, M_{tud}$ ^{※2}		ねじり補強鉄筋のある場合の設計ねじり耐力 $M_{cud}, M_{tud}, M_{tud}$ ^{※2}	$f_{ck}=50N/mm^2$ $f_{wyd}, f_{lyd}=390N/mm^2$	$f_{ck}=80N/mm^2$ $f_{wyd}, f_{lyd}=490N/mm^2$	

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_{lyd} : 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⁷⁾。

(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⁷⁾。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⁸⁾、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⁹⁾。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²⁾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/m³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 Na_2O 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¹⁰⁾。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³⁾。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¹¹⁾。

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¹²⁾。

(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 2×10^6 回を超える場合については¹³⁾、(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¹¹⁾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ために、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¹⁴⁾。

(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¹⁵⁾。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¹⁵⁾。

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¹⁶⁾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)¹⁷⁾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¹⁸⁾。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 ε'_{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 ε'_{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 ε'_{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¹⁹⁾。

(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^{20) 21)}。こうした有効となら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²²⁾。

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 θ 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²³⁾ 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²⁴⁾。

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 ε'_{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。

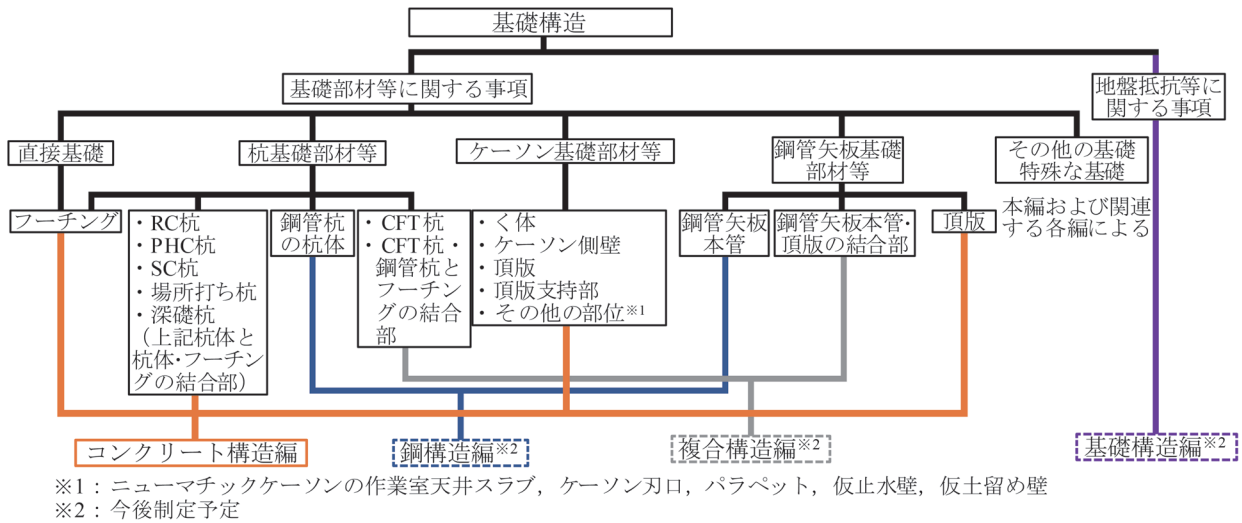


図1 基礎構造と設計標準の関係

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²⁵⁾、 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²⁶⁾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的評価, 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