

土木学会 2012 年制定 「コンクリート標準示方書 [設計編]」の改訂について

前川宏一*¹・佐藤 勉*²・渡邊忠朋*³・下村 匠*⁴・中村 光*⁵・
佐藤靖彦*⁶・丸屋 剛*⁷・三島徹也*⁸

概要 本稿は、2012年制定 土木学会コンクリート標準示方書「設計編」の改訂内容の骨子について解説するものである。2007年版の基本構成と過去数年の技術の進展を基に、性能の照査・確認方法のレベルアップを図った。具体的には塩害と鋼材腐食、コンクリートの体積変化（乾燥収縮、自己収縮、温度変化）、ひび割れ予測、せん断耐力式、構造物の長期変形、非線形解析、構造物の復旧性と部材の修復性等に関する技術事項の改訂を行うとともに、相互の整合性を高めた。

キーワード：設計、標準、照査、使用性、安全性、耐久性、復旧性

1. はじめに

土木学会コンクリート標準示方書は、昭和6年制定の「鉄筋コンクリート標準示方書」発刊以来、コンクリート技術の進歩に対応して改訂を重ね、コンクリート構造物の計画、設計、施工、維持管理において広く活用されてきた。

図-1は2012年制定示方書「設計編」の構成を、2007年制定示方書「設計編」と対比したものである。2007年制定示方書に導入された「本編」、「標準」という基本構成を踏襲しつつ、本編と標準の役割分担をより明確にし、それぞれの内容の整理を行った。「本編」はRC/PCの構造計画のもと、耐久性、安全性、使用性、復旧性、環境性の各要求性能を満足する構造物の設計方法の基本を示した内容とし、具体的な数値や算定式は掲載していない。原則に準拠したうえで、技術力に応じて構造物の性能を確認する方法を種々選択できる自由度を与えている。示方書が新しい技術の開発と活用に足かせとならないようにした。「標準」は、本編の原則に基づき照査を具体的に実行する方法を示したものであり、技術の現状、実績等を考え合わせて、標準的と考えられる方法を掲載した。

全体構成において、復旧性に関する照査を「本編」に新設し、鉄筋コンクリートの前提と構造細目、非線形有

限要素解析による照査などを「標準」に収録し、内容の充実を図った。また、「付属資料」は構造計画例と、改訂で新たに導入した事項の一部を詳細に解説したものである。

技術的内容に関する主な改訂を以下に示す。

2. せん断力に対する照査

土木学会コンクリート示方書における棒部材のせん断耐力設計法は、設計せん断耐力式（修正トラス理論に基づく評価式）、設計斜め圧縮破壊耐力式（腹部の圧縮破壊評価式）、設計せん断圧縮破壊式（ディープビームに対する評価式）からなる。これらの式は静的荷重に対する設計のみならず、耐震設計にも深く関与するものである。これらのせん断耐力算定式は、1986年の限界状態設計法への移行に合わせて以後、整備されてきたものである。今回の改訂において、これまでの体系を大きく変更することなく、以下の項目に対する対応を行った。

2.1 現行式の適用範囲の明確化と非線形有限要素解析の活用

材料強度や境界条件などに関して、棒部材のせん断耐力算定式の適用範囲を明確にし、適用範囲を超える場合には、実際の機構に基づくせん断耐力算定法の使用、もしくは非線形有限要素解析の活用を原則とした。非線形有限要素解析を用いる場合には、定量的な評価・検証に基づいた安全率を設定したうえで、性能照査に適用する。その具体的な方法を標準に記述した。

2.2 せん断補強筋が受け持つせん断耐力式の不連続性の改善

2007年版の改訂時に課題として残された、スレンダーなはりの耐力算定式とディームビームの算定式間での不連続性の改善を図った。具体的には、せん断補強筋が受け持つせん断力 V_s の上限値を設定するとともに、せん

*1 まえかわ・こういち／東京大学大学院 工学系研究科 教授（正会員）

*2 さとう・つとむ／(公財)鉄道総合技術研究所 研究開発推進室 部長（正会員）

*3 わたなべ・ただとも／北武コンサルタント(株) 副社長（正会員）

*4 しもむら・たくみ／長岡技術科学大学 准教授（正会員）

*5 なかむら・ひかる／名古屋大学大学院 工学研究科 教授（正会員）

*6 さとう・やすひこ／北海道大学大学院 工学研究院 准教授（正会員）

*7 まるや・つよし／大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所 部長（正会員）

*8 みしま・てつや／前田建設工業(株) 技術研究所 副所長（正会員）

2007年制定示方書〔設計編〕
本編 (267p)

- 1章 総則
- 2章 要求性能
- 3章 構造計画
- 4章 性能照査の原則
- 5章 材料の設計値
- 6章 荷重
- 7章 応答値の算定
- 8章 耐久性に関する照査
- 9章 安全性に関する照査
- 10章 使用性に関する照査
- 11章 耐震性に関する照査
- 12章 初期ひび割れに対する照査
- 13章 鉄筋に関する構造細目
- 14章 その他の構造細目
- 15章 プレストレストコンクリート構造
- 16章 鋼コンクリート合成構造

標準 (132p)

- 1編 部材の構造解析
- 2編 耐震設計
- 3編 耐久設計
- 4編 温度応力解析
- 5編 配筋詳細
- 6編 ストラット-タイモデル

参考資料 (224p)

- 1編 構造計画事例
- 2編 構造解析事例
- 3編 非線形解析による構造解析
- 4編 耐震設計事例

2012年制定示方書〔設計編〕
本編 (101p)

- 1章 総則
- 2章 要求性能
- 3章 構造計画
- 4章 性能照査の原則
- 5章 材料の設計値
- 6章 作用
- 7章 応答値の算定
- 8章 耐久性に関する照査
- 9章 安全性に関する照査
- 10章 使用性に関する照査
- 11章 復旧性に関する照査
- 12章 初期ひび割れに対する照査
- 13章 鉄筋コンクリートの前提

標準 (399p)

- 1編 部材の構造解析
- 2編 耐久性に関する照査
- 3編 安全性に関する照査
- 4編 使用性に関する照査
- 5編 耐震性に関する照査
- 6編 温度ひび割れに対する照査
- 7編 鉄筋コンクリートの前提および構造細目
- 8編 プレストレストコンクリート
- 9編 非線形有限要素解析による照査
- 10編 ストラット-タイモデルによる設計

付属資料 (107p)

- 1編 構造計画事例
- 2編 構造解析事例
- 3編 ファイバーモデルを用いたPC橋の長期たわみの解析事例
- 4編 安全係数とベンチマーク解析

図-1 2007年制定示方書〔設計編〕と2012年制定示方書〔設計編〕の構成の比較

断スパン比の小さい領域におけるせん断補強鋼材を用いた算定式 V_{da} において、荷板幅/有効高さ比を陽な形で示すとともに、基とした実験式から耐力算定式への簡略化の方法を見直すことで対応した。

2.3 斜め圧縮耐力式の適用範囲の拡大

最近の実験研究に基づき、コンクリート圧縮強度に対する上限値を、これまでの 50 N/mm^2 から示方書の適応範囲の上限値である 80 N/mm^2 に引き上げた。

2.4 プレストレストコンクリート棒部材のせん断耐力式の提示

デコンプレッションモーメントによる軸方向力の影響

の評価法に関しては、従来の示方書式は軸方向圧縮力の効果を一方向荷重下では過小評価する傾向があるとする報告もあったことから、詳細に検討の結果、修正圧縮理論に基づくせん断耐力式を新たに導入した。なお、軸力を受ける鉄筋コンクリートはりのせん断耐力に関しては、これまで同様、デコンプレッションモーメントを用いた方法により求めてよいこととした。

2.5 収縮がせん断耐力に及ぼす影響に対する注意喚起

初期に収縮が増大し、かつ弾性係数が急激に大きくなるコンクリートを用いると、自己収縮により発生する初期応力が鉄筋に残留するために、コンクリートが受け持つ

Revisions in "Design" Volume of Standard Specifications for Concrete Structures 2012

By K. Maekawa, T. Sato, T. Watanabe, T. Shimomura, H. Nakamura, Y. Sato, T. Maruya and T. Mishima

Concrete Journal, Vol.51, No.6, pp.488~492, Jun. 2013

Synopsis This document outlines the revisions made to the "Design" volume of the Standard Specifications for Concrete Structures 2012. The aim of these revisions was to raise the level of performance assessment and verification methods, building on the basic organization of the 2007 version and drawing from advances in technology in the past few years. Specifically, various technical items, including chloride attack and steel corrosion, volume change of concrete (drying shrinkage, autogenous shrinkage, temperature change), prediction of cracking, shear strength formula, long-term deformation of structures, nonlinear analysis, restorability of structures and repairability of members, have been revised and mutual consistency has been enhanced.

Keywords : design, standard, review, serviceability, safety, durability, restorability

せん断耐力が低下する場合があることが報告されている。そこで、自己収縮が問題となるような材料を用いる場合には、せん断耐力の低下を考慮するよう注意喚起を行い、簡易的にこれを考慮する方法について言及している。

3. 収縮、クリープ、ひび割れ幅

3.1 コンクリートの収縮

コンクリートの過大な収縮が一因と見られる橋梁のひび割れによる不具合事例を受け、2007年制定示方書では、収縮に対して安全側の設計を行わなければならないことを明確に示すため、収縮ひずみを予測式による算定値の1.5倍とする規定が導入された。今回の改訂では、コンクリートの収縮特性を正しく評価し、それに基づき構造物の応答値を算定して性能の照査を行うべく、収縮に関連する設計・照査の枠組みを整えることを目指した。

2007年以降、全国の生コン工場などでJIS試験によりコンクリートの収縮特性を確認する技術基盤が整備されたことを踏まえ、収縮ひずみの特性値を設計から施工に受け渡す流れを踏襲した。設計段階で設定した収縮ひずみの特性値は、設計基準強度など他の特性値と同様、施工に伝達され、それを満足することが確認されたコンクリートが施工現場に投入されることとなる。

今回の改訂において、まず収縮の予測式を新規に作成した。従来予測式との違いは、最新データに基づいたことに加え、材料、配合と特性値（標準試験値）を関係付ける式と、材料特性、環境条件、部材寸法を入力値として、構造物中の収縮の経時変化を予測する式の二つを用意したことである。前者の予測式では、近年の骨材事情を考慮し、骨材の吸水率をパラメータとして導入したこと、後者の予測式では室内試験結果から材料特性を同定できるようにした点が新しい。いずれも算定精度向上のために施された改善である。

3.2 コンクリートのクリープ

クリープについては、2002年制定示方書、2007年制定示方書において併記されていた普通コンクリート用クリープ予測式と高強度コンクリートにも適用可能な予測式を、後者に一本化した。この式は、元々、高強度域のみならず普通強度域も適用範囲としていたものである。近年、プレストレストコンクリート橋梁において過大な長期たわみが生じる事例が報告されており、今回の改訂ではその予測精度を向上させることが課題の一つになった。新クリープ予測式は、経時変化を表す関数に対数関数を用いていることにより、これを用いて算定した橋梁の長期たわみは、実測値への適合性がよいことを、実構レベルの測定からも確認している。

3.3 ひび割れ幅照査

2007年制定示方書においては、曲げひび割れ幅算定式中のコンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値を、使用性の照査と

耐久性の照査とで使い分けていた。そのため、ひび割れ幅の応答値が使用性照査と耐久性照査とで異なっていた。このような状況は実務上、混乱を招く恐れがあることから、いずれの場合も、構造物で実測されたひび割れ幅の値に適合するようにした。このため、鋼材腐食に対する抵抗性の照査で算定するひび割れ幅の応答値は、従来の示方書に基づくよりも大きくなる。ただし、鋼材腐食に対するひび割れ幅の限界値も精度を高めるべく見直した結果、応答値／限界値のバランスは従来の設計法と比較して、著しくは変わらないものとなった。

4. 長期たわみの算定

PC長大橋のたわみが、設計時に予測した値を上回って長期にわたり、増大を続ける事例が内外で報告されている。実橋梁のコンクリートの収縮ひずみは、同じ配合のコンクリートであっても、断面の寸法や形状、外気温度や相対湿度、鉄筋およびPC鋼材による拘束度の違い等によって異なる。その収縮量や進行速度、水分量によって異なるクリープ特性などが上下フランジ間で異なる結果、付加的な曲率を生み、ひいてはたわみの増大に繋がることが分かってきた。したがって、例えばPC長大橋に見られる箱形断面においても、上床板と下床板で収縮量に差が生じることで、変形を促進する断面曲率が生じることがある。

現在の橋梁設計時に広く用いられている変位・変形の算定方法は、実務の簡便性から構造部材を一つの線材でモデル化し、線形クリープ則を用いたクリープひずみのみに基づいて変位を算定するものである。したがって、コンクリートの収縮差によって生じる成分が考慮されておらず、長期の変位・変形のメカニズムを過小に評価してしまう。したがって、PC長大橋の長期たわみの問題が顕在化しつつある昨今、設計時に長期時間依存たわみを精度よく算定できる手法を提示することとした。

そこで、最新の研究成果を基に、長期たわみ算定法として、以下の2つの方法を規定した。前者は、構造形式やコンクリートの配合条件などに対する制約が少ない汎用性の高い方法であり、後者は、これまで実績のある構造系やコンクリートの配合条件などに対して適用可能な簡便法と位置付けている。

①材料-構造連成応答解析システムによる方法：微細空隙中の熱力学的状態から巨視的な構造応答まで、寸法の異なる事象相互の連成を考慮できる材料-構造連成応答解析システムを用いる方法で、PC長大橋の長期たわみの実測から検証されたものである。最も汎用性が高い反面、現時点では計算の負荷が高い。

②ファイバーモデル解析による方法：部材厚さと環境条件に応じたコンクリートの等価な収縮とクリープの影響を断面内の各部位ごととに与え、断面保持の仮

定のもとで変位・変形を算定する方法である。クリープの影響には、従来と同様に線形クリープ則を用いる。収縮ひずみは、長期たわみの算定に用いることに特化した収縮ひずみ評価式を、前述の材料-構造連成応答システムから求めた値とほぼ適合するように、取りまとめたものである。

5. 復旧性、耐震性に関する照査

耐震設計においては、従来から、部材がせん断破壊に対して十分安全であることを照査することに加え、構造細目や構造計画などの様々な観点から、構造物のリダンダンシーを考慮してきた。今回の改訂では、リダンダンシーやロバスト性に対する耐震設計の考え方を陽な形で示すために、構造計画において、構造物は十分な靱性を有する破壊形態となるように設計し、照査に用いる地震動を超える大きな地震作用の後でも、構造物が直ちに致命的な崩壊に至らない構造とすることを規定した。その他の主要な改訂箇所は以下の項目である。

5.1 復旧性と耐震性について

復旧性はこれまでも要求性能として定義されていたが、その具体的な照査の方法は記述されていなかった。そこで、偶発作用により生じると推定される構造物の機能低下から回復するための難易度である修復性を用いて、復旧性を照査する方法を採用した。また、従来定義されていた3つの耐震性能とコンクリート構造物の要求性能との関係を表-1のように明示し、照査における耐震性能の位置づけを明確にした。なお、復旧性は地震の影響のみならず、火災と衝突も対象とした。

5.2 破壊モードの判定

棒部材の終局部材角を求める算定式は、曲げ破壊や曲げ降伏後のせん断破壊の区別なく、終局部材角を妥当に評価できるものであった。今回の改訂では、算定された終局部材角が、曲げ破壊、曲げ降伏後のせん断破壊、のいずれに対応するかを判定できるようにした。また、曲げ降伏後のせん断破壊モードが生じないことが確認されている場合には、従来、考慮していたせん断耐力に対する部材係数の割り増しを行わなくてもよいものとした。

5.3 過大なかぶりが構造性能に与える影響

塩害環境の厳しい構造物では他の構造物に比べてかぶりが大きくなる傾向にあるため、既往の研究や実績例に基づき、コンクリート構造物の耐震性に及ぼす過大なかぶりの影響についての留意事項を示した。

表-1 耐震性能と要求性能の関係

耐震性能	要求性能	耐震性能の定義
耐震性能1	使用性	地震時に機能を保持し、地震後にも機能が健全で補修しないで使用が可能である。
耐震性能2	復旧性(修復性)	地震後に機能が短時間で回復でき、補強を必要としない。
耐震性能3	安全性	地震によって構造物全体が崩壊しない。

6. 塩害に対する照査

平成11年版のコンクリート標準示方書〔施工編 耐久性照査型〕で塩化物イオンの侵入に伴う鋼材の腐食に対する照査法が示されて以来、腐食発生塩化物イオン濃度 C_{lim} は 1.2 kg/m^3 と定められてきた。今回の改訂では、以下の方針に基づき C_{lim} を見直した。

- (1) 鋼材の腐食発生の定義の仕方によって、腐食発生塩化物イオン濃度 C_{lim} は異なる。たとえば、腐食生成物が観察される時点を示方書における鋼材の腐食の発生限界状態とすると、酸素の供給速度が腐食発生に支配的な影響を与えることになり、構造物の性能照査に対する腐食発生時点の定義としては曖昧である。2007年の改訂では、不動態被膜の破壊時点を腐食発生開始とした。この場合、酸素が供給されなければ腐食も進行しない状態を腐食開始とすることになるが、安全側の判断を与えるので、これを基準とした。
- (2) 腐食発生塩化物イオン濃度 C_{lim} を水セメント比の関数とした。水セメント比の小さいコンクリートでは C_{lim} を大きく設定できるなどの既往の研究成果を取り入れ、より合理的な設計を可能とした。
- (3) 腐食発生塩化物イオン濃度 C_{lim} をセメントの種類で変化させることとした。これにより、使用するセメントの種類に応じた C_{lim} の設定が可能となる。一方、データや適用経験の不足により C_{lim} の設定が難しいセメントに対しては C_{lim} を、当面の措置として安全側で設定した。今後の調査研究に期待したい。
- (4) コンクリート中の塩化物イオン濃度の表記として、①細孔溶液中の塩化物イオン濃度 $[\text{Cl}^-]$ (mol/l) (以下、イオン濃度表記)、②全塩素質量のセメント質量に対する比率 (mass% of cement) (以下、セメント従量表記)、③単位体積のコンクリートに対する全塩素の質量 (kg/m^3) (以下、コンクリート総量表記)、の3種類の表記が可能であり、②および③の全塩素を可溶性塩素とすることもできる。今回の改訂では、従来の表記を踏襲してコンクリート総量表記とした。コンクリート総量表記は、イオン濃度表記やセメント従量表記ほどには鋼材腐食のメカニズムに立脚したものではないが、セメント従量表記で一定の塩化物イオン濃度でも、単位セメント量の増加に伴い増加するコンクリート総量表記での塩化物イオン濃度に上限を設けることとなり、安全側の限界値とすることができる点を考慮した。また、生コンの塩分量規制や維持管理における調査で用いる表記方法とも整合する点も配慮した。

塩化物イオン拡散係数も見直しを行ったこと、 C_{lim} が大きくなることによりかぶりは小さく設定できるが、 C_{lim} に対するかぶりの影響はまだ不明な点もあること、

普通ポルトランドセメントの値から混合セメントの数値を推定していること等を考慮した結果である。今後、普通ポルトランドセメント以外のセメントでも C_{lim} の実計測を行うことによって、 C_{lim} をさらに合理的に設定することに含みを持たせてある。

7. 温度ひび割れに対する照査

温度ひび割れに対する照査については、ひび割れ指数による定量的な評価が定着して久しい。さらに実務面で、IT 技術の進歩を取り入れた試みも見られるようになった。施工履歴データベースの活用や3次元有限要素法の普及などがこれに相当する。今回の改訂では、これらの動向を反映した内容に改訂することで、汎用性と予測精度の向上を図った。

7.1 温度ひび割れに対する照査フロー

温度ひび割れのように施工や環境の影響を敏感に受けて予測が難しい事象では、高度な解析による評価よりも実績による評価の方の信頼性が高い場合もある。また、近年ではデータベース技術が発達し、一般に普及し始めていることから、今後もデータベースを活用した各種予測技術が発展することが期待される。そこで、照査フローを見直し、温度応力解析によるひび割れ照査と施工実績による照査を同列に位置付けることとした。

7.2 3次元有限要素法への対応に伴う変更

温度応力解析による照査においては、近年の実務の実態を踏まえうえて CP 法を基本とした内容から、3次元有限要素法を基本とした内容に変更した。これに伴い、3次元温度応力解析を前提とした「安全係数とひび

割れ発生確率の関係」を提示することにした。この関係図としては、これまでに多くの実績がある、日本コンクリート工学協会（現日本コンクリート工学会）マスコンクリートのひび割れ制御指針改訂委員会が提案した関係図を採用した。同時に、解析に必要な物性値の予測式なども、上記改訂委員会の成果を参考にして変更した。

8. おわりに

コンクリート標準示方書設計編の〔本編〕は、構造設計の基本を規定する性格上、中期的にみて将来、改訂するとしても小規模に留まるものと位置付けた。一方、〔標準〕は改訂時点において推奨する、標準的な照査法を提示するものである。したがって、改訂によって実現した構造物の事後評価と技術の進展の両者にに基づき、弾力的に改訂が今後も図られるべきもの、より良い技術が弾力的に活用されるべきものと考えている。

最後に、紙面を借りて、この「設計編」の刊行にあたって、審議頂いたコンクリート常任委員会と示方書改訂小委員会の委員各位、設計編改訂部会の委員各位、ならびに作業グループに協力いただいた多くの方々に、衷心より感謝申し上げる次第である。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕，2013.3
- 2) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書〔設計編〕改訂資料，コンクリートライブラリー第138号，2013.3
- 3) 渡邊忠朋・土屋智史・坂口淳一・笠井尚樹：断面の部位別に時間依存挙動を考慮した線材モデルによる PC 橋梁の長期たわみ解析，土木学会論文集 E2，Vol.69，No.2，pp.207～226，2013