

2012年制定土木学会コンクリート標準示方書 【設計編】の概要とPCに関する改訂事項

濱田 譲*1・井上 晋*2・下村 匠*3

2012年制定土木学会コンクリート標準示方書が刊行された。本稿では、示方書【設計編】の概要とプレストレストコンクリートに関連する改訂事項について解説する。全体構成は原理原則である【本編】と標準的な方法を示す【標準】とのすみわけの明確化が進められた。最近の技術の進歩を踏まえ【標準】に収録した照査法の更新が多岐にわたって行われた。プレストレストコンクリートに関する主な改訂点は、棒部材のせん断耐力に及ぼすプレストレスの影響を合理的に考慮する算定法を取り入れたこと、PC鋼材の積極的な防錆対策を推奨したこと、有効プレストレス算定におけるコンクリートの収縮およびクリープの扱いについて整理を行ったこと、橋梁の長期たわみ算定の精度向上を図ったことである。

キーワード：せん断耐力，有効プレストレス，防錆対策，長期たわみ

1. はじめに

土木学会コンクリート標準示方書は、技術や研究の進歩にあわせておよそ5年に1度改訂が行われている。このたび、2013年3月に最新版の「2012年制定コンクリート標準示方書」が出版された。今回は、新設された【基本原則編】と改訂された【設計編】と【施工編】が先行して出版された。10月には【維持管理編】と【ダムコンクリート編】が追って出版される予定である。

プレストレストコンクリート（以下PCと略することがある）に関する具体的な改訂点として、以下があげられる。

- 1) 安全性に関する照査においては、PC棒部材の設計せん断耐力 V_{yd} の算定式を、せん断耐力に及ぼすプレストレスの影響を合理的に評価できる式に変更した。
- 2) 耐久性に関する照査においては、PC鋼材の腐食に対し十分に配慮する必要があることから、さらに積極的に防錆対策を講じることを推奨した。
- 3) 応答値の算定においては、コンクリートの収縮およびクリープの予測式に関する規定の改訂に対応し、その算定条件を明示したうえで、有効プレストレスの算定に用いる収縮ひずみおよびクリープ係数をそれぞれ表示した。
- 4) PC橋の長期たわみが従来の解析法による予測結果を越えて過大となる事例が世界的に報告されていることを受け、断面の部位によるクリープ・収縮の違いを考慮した精度の高い解析法を新規に採用した。

本稿では、【設計編】の概要およびPCに関連が深い改訂事項を中心に解説する。

2. 設計編の構成

図-1は2012年制定示方書【設計編】の目次構成を、2007年制定示方書【設計編】と対比したものである。2007年版より導入された【本編】【標準】という基本構成は今回も踏襲した。

【本編】は原則的な内容とし、目安として10年以上変わることはないと考えられる事項を記載した。逆に、具体的な数値や算定式は掲載していない。原則に則りさえすれば、構造物の性能を確認する方法は、技術者の技術力に応じて種々選択できる自由度がある。

【標準】は、本編の原則に基づき照査を具体的に実行する一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。標準に示された内容は、技術の進展に応じて書き換えられるべきものである。従来行われてきた5年ごとの示方書改訂作業では、今後この標準の内容を主に改訂することになるとのイメージである。

PCに関する事項については、鉄筋コンクリートと共通事項はそれぞれの箇所鉄筋コンクリートと分け隔てなく記述し、PCに固有の事項は標準「8編 プレストレストコンクリート」にまとめた。

3. PC棒部材のせん断耐力算定式

現在の土木学会コンクリート示方書における棒部材の設計せん断耐力算定法は、1986年に行われた限界状態設計法への移行に合わせて整備されたものであり、その後何度か示方書改訂を経て、個々の算定式の改訂は行われたが枠組みはそのまま用いられている。今回も、最新の検討結果に基づきいくつかの算定式の改訂を行った。そのうち、PC

*1 Yuzuru HAMADA：ジェイアール西日本コンサルタンツ(株) 構造物設計部 次長

*2 Susumu INOUE：大阪工業大学 教授

*3 Takumi SHIMOMURA：長岡技術科学大学 准教授

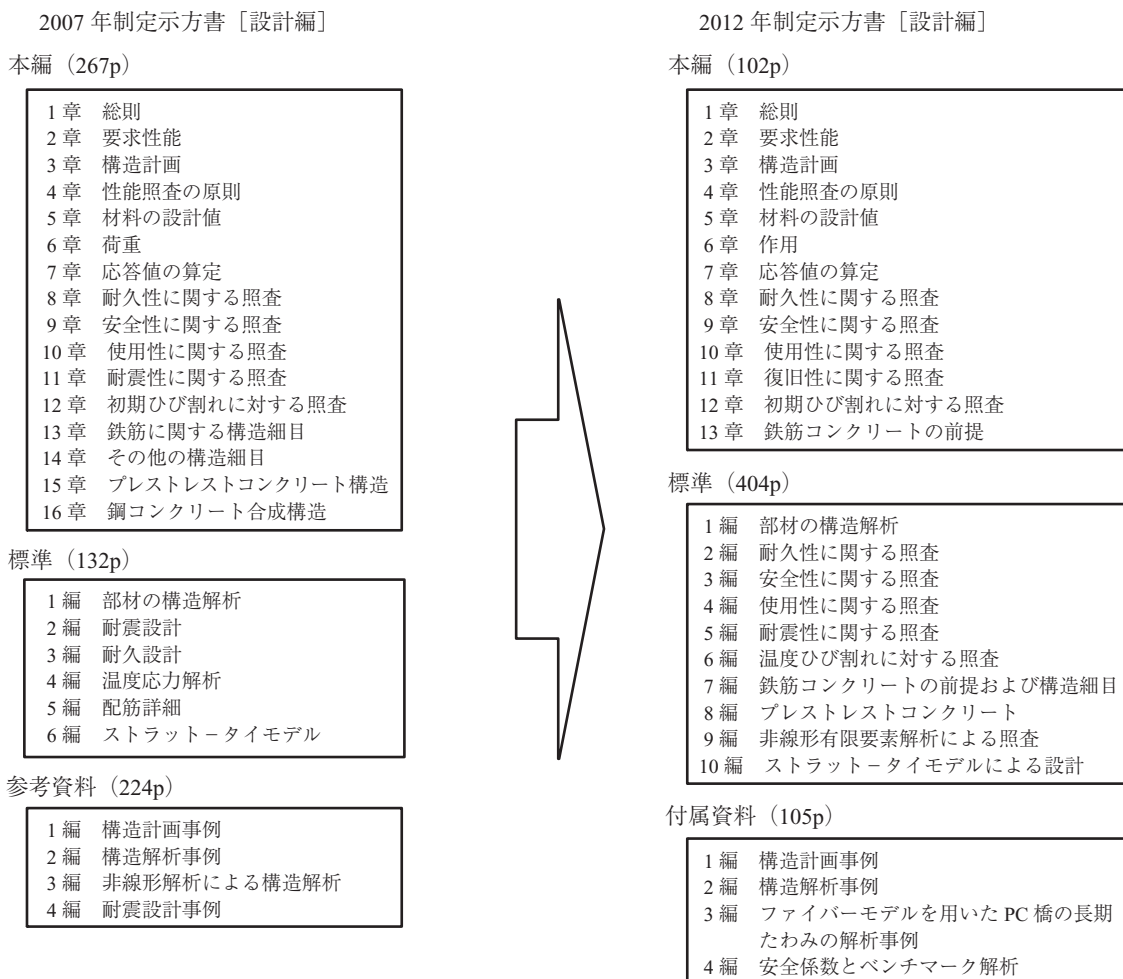


図 - 1 2007年制定示方書〔設計編〕と2012年制定示方書〔設計編〕の構成の比較

に関連する改訂事項として、修正圧縮場理論に基づくPCはりのせん断耐力式を新たに提示したことがあげられる。

3.1 改訂の経緯

2007年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕では、せん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力 V_{cd} として次式を与えている。

$$V_{cd} = \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot f_{cd} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b \quad (1)$$

この式は、軸方向力の作用しないせん断補強鋼材のないRC部材に対して行われた二羽らの研究¹⁾を基礎としたものであり、プレストレス力に代表される軸方向力の影響を表す係数 β_n については、デコンプレッションモーメント M_0 を用いて表現され、次式で与えられている。

$$\beta_n = 1 + 2M_0 / M_{ud} \quad (N'_d \geq 0, \text{ただし } \beta_n > 2 \text{ の場合, } \beta_n = 2) \quad (2)$$

$$\beta_n = 1 + 4M_0 / M_{ud} \quad (N'_d < 0, \text{ただし } \beta_n < 0 \text{ の場合, } \beta_n = 0) \quad (3)$$

しかしながら、デコンプレッションモーメントによって評価する場合、その影響は軸方向力による断面引張縁の応力度の大きさのみによって評価される(たとえば、軸方向圧縮力の有利な影響は作用曲げモーメントが M_0 を越えた段階でなくなる)ことになり、断面内の応力分布形状の影響は考慮されないことになる。このデコンプレッションモーメントによる評価法はCEB-FIP MC-1978²⁾に記述されていたものであるが、CEB-FIP MC-1990³⁾ではこの記述

はなくなり、また、最新のfib MC-2010 (draft)⁴⁾では修正圧縮場理論⁵⁾に基づく考え方が示されている。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に関しては、これまでから限界があると考えられてきており^{6,7)}、さらに、示方書式は軸方向圧縮力の効果を一方荷重下では過小評価する傾向があるとする結果⁸⁾も報告されていることから、軸方向圧縮力の影響を合理的に評価できる算定式の導入が望まれていた。

このような背景から、今回の改訂に際し、主としてせん断補強鋼材を配置しないPCはり部材に関する国内実験結果を収集・整理することにより新たな指標⁹⁾を用いた耐力算定式を提案し、その適用性についてデコンプレッションモーメントによる方法と比較することにより検討を行った。

3.2 検討の概要

修正圧縮場理論⁵⁾では、せん断補強鋼材を配置した棒部材のせん断耐力 V_y を次式で与えている。

$$V_y = f_i b_w j d \cot \theta + (A_w f_{wy} / s) j d \cot \theta \quad (4)$$

式(4)の右辺第一項がせん断補強鋼材以外で受け持たれるせん断力、すなわち、せん断補強鋼材を配置しない棒部材のせん断耐力に相当する。式(4)中の f_i はコンクリートの主引張応力、 θ は斜めひび割れ(圧縮ストラット)の角

○ 解説 ○

度である。プレストレス等の軸方向力の影響は圧縮ストラットの角度 θ を仮定し、軸力の釣合関係から収束計算によって得られる $\cot \theta$ により評価している。

三方らは、収束計算によって求める必要のある $\cot \theta$ を簡便に求める式として次式を提案している⁹⁾。

$$\cot \theta = \sqrt{1 + \frac{\sigma_{cg}}{f_i}} \quad (5)$$

ここに、 σ_{cg} ：断面高さの 1/2 の高さにおける平均プレストレス、または軸方向力による平均応力度、 f_i ：コンクリートの引張強度である。

また、式(4)に示されるように、圧縮ストラットの角度を軸方向力により変化させるなら、せん断補強鋼材が受け持つせん断力も、圧縮ストラットの角度を 45° に固定せず、可変角トラス理論を用いて計算した方が合理的であると考えられる。したがって、ここでは、デコンプレッションモーメント M_0 に代わるものとして、 $\beta_n = \cot \theta$ として軸方向力の影響を評価し、あわせて可変角トラス理論を用いることの妥当性を検討した。

検討に用いたデータは、国内で報告されている PC はり部材のせん断に関する実験のうち、 a/d が 2.2 以上で、その破壊形式がせん断破壊（斜め引張破壊、せん断圧縮破壊）と明記され、かつ、計算に必要な諸元が記載されている文献から抽出したものである。ただし、式(5)中の f_i の値として、 $f_i = f_{vd} = 0.23f'_{cd}{}^{2/3}$ を用いた。なお、文献の詳細や実験データの取り扱い方法については改訂資料¹⁰⁾をご参照いただきたい。

3.3 検討結果

検討に用いたデータは 86 体 (a/d の範囲：2.46 ~ 4.44、断面下縁プレストレスの範囲：1.8 ~ 22.7 N/mm²) である。なお、せん断補強鋼材が配置されていない場合は $V_{yd} = V_{cd}$ とし、 β_n の計算に M_0 を用いたものを $V_{cd} = V_{cd1}$ 、 $\cot \theta$ を用いたものを $V_{cd} = V_{cd2}$ とした（なお、 β_n の上限値はいずれの場合も 2.0 とする）。また、せん断補強鋼材が配置されている場合は $V_{yd} = V_{cd} + V_{sd}$ とし、 V_{sd} は、圧縮ストラットの角度を 45° とした 2007 年制定コンクリート標準示方書式(6)を用いた値 (V_{sd1})、および圧縮ストラットの角度 θ の値を $\cot \theta$ から求めて計算する式(7)を用いた値 (V_{sd2}) の両者を求めた。ただし、 θ の下限値は、 f_{ib}

MC-2010 (draft)⁴⁾ 等を参考に、安全側の値として 36° としている。

$$V_{sd1} = [A_{vf} f_{vyd} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / s_s] z / \gamma_b \quad (6)$$

$$V_{sd2} = [A_{vf} f_{vyd} (\sin \alpha_s \cot \theta + \cos \alpha_s) / s_s] z / \gamma_b \quad (7)$$

以上により計算される $V_{yd1} = V_{cd1} + V_{sd1}$ (2007 年制定示方書式) と $V_{yd2} = V_{cd2} + V_{sd2}$ (提案式) の比較を行った。その検討結果を図 - 2 に示す。

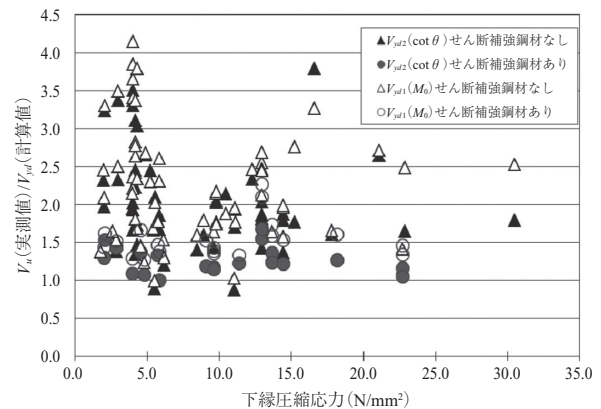


図 - 2 V_{yd} の実測値と計算値の比

図に示すように、実測値と算定値の比 ($V_{u,exp}/V_{u,cal}$) の平均と標準偏差は、 M_0 を用いた場合で平均 2.07、標準偏差 0.70、 $\cot \theta$ を用いた場合で平均 1.81、標準偏差 0.67 となり、PC はり部材のせん断耐力 V_{yd} の精度は提案式 ($\cot \theta$ 法) の方が 2007 年制定示方書式 (M_0 法) よりも向上している。とくに、せん断補強鋼材が無く、高プレストレス領域では M_0 法がかなりの過小評価となっていることがわかる。また、全般的な傾向として、せん断補強鋼材が無く、プレストレスが比較的小さい場合は、いずれの方法を用いても過小評価となる傾向がうかがえる。一方で、せん断補強鋼材がある場合は、提案式は比較的精度が良くなっており、可変角トラス理論を用いている効果が認められる。

3.4 試算例

既設 PC 構造物（鉄道 PC 橋）について、設計せん断耐力を提案式により計算し、2007 年制定コンクリート標準示方書設計編による結果と比較した。

対象とした橋梁を表 - 1 に示す。なお、改訂式では次

表 - 1 対象とした橋梁

Case No.	橋種	支間 (m)	桁高 (m)	桁高支間比	σ_{cg} (N/mm ²)	σ_{cg}/f_i
1	単線 2主T桁	22.565	1.80	1/12.5	4.19	1.85
2		41.362	2.80	1/14.8	5.91	2.62
3	複線 4主T桁	19.842	1.50	1/13.2	4.09	1.81
4		28.200	1.90	1/14.8	3.58	1.58
5		32.187	2.60	1/12.4	3.74	1.65
6	単線 下路桁	28.936	2.45	1/11.8	2.90	1.28
7		30.550	2.30	1/13.3	3.01	1.33
8		51.245	3.90	1/13.1	3.89	1.72
9	複線箱桁	51.600	3.30	1/15.6	4.08	1.81

の点が2007年制定示方書式と異なっている。

$$\beta_n = \sqrt{1 + \frac{\sigma_{cg}}{f_{vd}}} \quad (8)$$

ただし、 $\beta_n > 2$ となる場合は2とする。

$$f_{vd} = 0.23f_{cd}^{2/3} \quad (9)$$

$$V_{sd} = [A_{wfyd}(\sin \alpha_s \cot \theta + \cos \alpha_s)/s_s]z/\gamma_b + [A_{pw} \sigma_{pw}(\sin \alpha_{ps} \cot \theta + \cos \alpha_{ps})/s_p]z/\gamma_b \quad (10)$$

θ : コンクリートの圧縮ストラットの角度で、 $\beta_n = \cot \theta$ として計算する。ただし、 $36^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ とする。

(1) β_n について

β_n について、各橋梁のせん断検討断面（支点から H/2 点）を比較した結果を図 - 3 に示す。なお、縦軸は、式(2)と式(8)を用いて β_n をそれぞれ算定し、その比を示したものである。

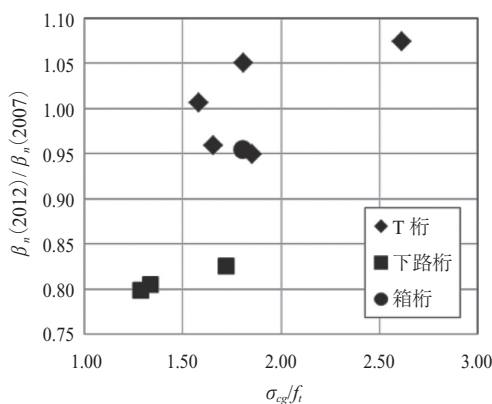


図 - 3 β_n の比較結果

T桁および箱桁では、 β_n の比はおおむね 0.95 ~ 1.05 の範囲にあり、改定案を適用しても V_{cd} の値が大きく変化することはない。

一方、下路桁における β_n の比は 0.80 程度となり、改定案を適用することにより V_{cd} の値が小さくなる。これは、T桁あるいは箱桁に比べて下路桁の σ_{cg}/f_{vd} が小さくなるためであると考えられ、せん断補強鉄筋量を大きくする方向に誘導する結果となる。

(2) θ について

式(8)より $\beta_n = \cot \theta$ として θ を算出した結果、その算定値は、 σ_{cg}/f_{vd} が小さい下路桁で大きくなる傾向にあるが、すべての場合において 36° 以下となった。ただし、改訂案では θ の範囲を $36^\circ \leq \theta \leq 45^\circ$ と規定しているため、適用値はすべて 36° となる。

(3) せん断補強鋼材の減少量

一般に、PC桁のせん断補強鋼材は鉛直に配置されるため、せん断補強鋼材と部材軸のなす角度 α_s は 90° となる。これを式(10)に代入すると、せん断補強鋼材の必要量について次式が成り立つ。

$$A_{w(2012)} = \frac{1}{\cot \theta} \cdot A_{w(2007)} \quad (11)$$

ここに、 $A_{w(2012)}$: 改定案を適用して算出したせん断補強鋼材の必要量、 $A_{w(2007)}$: 2007年版を適用して算出したせん断補強鋼材の必要量

式(11)によると、 $\theta = 36^\circ$ とした場合、改定案を適用した場合のせん断補強鋼材の必要量が2007年版を適用した場合の $1/\cot 36^\circ = 0.73$ 倍になり、せん断補強鋼材量を27%低減できることになる。

前述したように、T桁および箱桁では V_{cd} がほとんど変化しないため、せん断補強鋼材量は20%以上低減できる。一方、下路桁の V_{cd} は2007年版の80%程度になるが、 $\theta = 36^\circ$ となることからせん断補強鋼材量を減じることができ、結果としてせん断補強鉄筋量は2007年版を適用した場合とほとんど変化しないことが明らかとなった。

(4) θ の下限値について

本検討の範囲において、式(8)より計算した θ は、すべて下限値の 36° 以下になった。そこで、改めて平均プレストレス σ_{cg} と θ の関係を整理すると図 - 4 のようになる。なお、ここでは、 $f_{vd} = 2.26 \text{ N/mm}^2$ ($f_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$) としている。

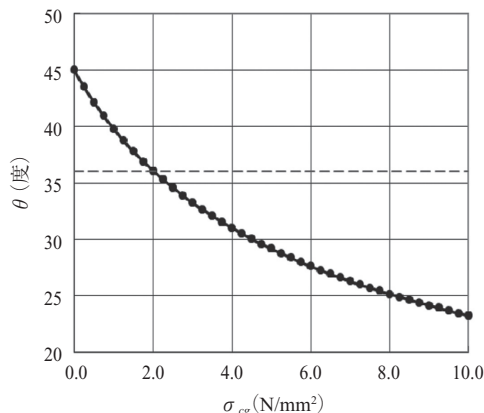


図 - 4 θ と σ_{cg} の関係

図より、平均プレストレス σ_{cg} が 2.0 N/mm^2 程度以下の場合、 $\theta > 36^\circ$ となることがわかる。これに対し、今回検討の対象とした橋梁では、下路桁においても $\sigma_{cg} > 2.0 \text{ N/mm}^2$ であり、一般のPC桁において σ_{cg} が 2.0 N/mm^2 以下になることは少ないように思われる。したがって、 θ の下限値を 36° に設定することにより、せん断補強鋼材が受け持つせん断力を十分安全側に評価できると考えられる。

4. PC鋼材の防錆対策

PC鋼材を腐食から防ぐために、PCグラウトの確実な充填が求められている。既設PC構造物においては、実際にPC鋼材の腐食や破断が確認された事例もあり、今後、補修・補強に多くの費用を必要とすることが懸念されている。

十分に充填されている場合、PCグラウトはPC鋼材を腐食させない品質とコンクリート部材とPC鋼材を一体化させることができる強度を有していると考えられることから、従来より示方書設計編では、これらが満足されている

ことを前提として性能照査を行うこととしている。一方、これまでの PC グラウトの実物大充填実験では、ダクトの勾配と PC グラウトの粘性に応じて先流れや空気だまりが生じ確実な充填ができないことなどが確認され、改善が重ねられてきた。

新設される PC 構造物に対しては、より積極的に PC 鋼材に対し防食対策を講じる必要があると考えられるため、今回の改訂では PC グラウトの充填に加えて、PC 鋼材に防錆対策を講じることをより強く推奨した。防錆対策の一つとして、プラスチック製シースの使用があげられる。プラスチック製シースを用いた場合、仮にシース内に空隙が存在しても、水、酸素および塩化物イオンなどの腐食促進物質の侵入を防ぐことにより内部の PC 鋼材の腐食を防止することができる。また、施工誤差等により PC 鋼材がシースに接触しているような場合においても、プラスチック製シースは腐食しないため、PC 鋼材の腐食が誘発されることはないと考えられる。

今回の改訂作業の段階で、プラスチック製シースを標準的に使用することを設計編において規定することを視野において検討を行った。しかし、検討の結果、以下に示すように、プラスチック製シースを標準的に使用することを設計編において規定しなければならない積極的な理由が認められなかったため、従来と同様に、プラスチック製シースの使用を防錆対策の一つとしてあげるとどめた。

- 1) 鋼製シースを用いて、一般環境下に建設された既設 PC 構造物の多くが健全に供用されている。
- 2) 設計編においては、2007 年版設計編からシースのかぶりを用いて PC 鋼材の腐食に対する照査を行うことを明記しており、鋼製シースの腐食を防止することができる規定になっている。
- 3) 被覆 PC 鋼材の使用など、その他にもプラスチック製シースと同等の効果を有する防錆対策をあげることができる。

今後は、プラスチック製シースの腐食促進物質の遮へい性能に関する知見を充実させる必要がある。また、PC 鋼材を効果的かつ確実に防錆することを念頭に置き、各種の防錆対策に対して詳細な検討を行い、マルチレイヤープロテクション（多重防食システム）の適用に関する研究が望まれるところである¹¹⁾。加えて、簡易で安価な PC グラウトの充填検査技術を開発し、PC グラウトの充填技術の信頼性を総合的に向上させることが重要である。

5. PC 鋼材の腐食に対するひび割れ幅の限界値

鉄筋コンクリート構造における内部鋼材の腐食に対する抵抗性は、従来、ひび割れ幅を限界値（許容ひび割れ幅）以下に抑えることと、コンクリート中に侵入する塩化物イオンが鋼材腐食発生限界以下となるようにすることで確保されてきた。鋼材腐食のより直接の指標となるコンクリート中の塩化物イオン濃度の予測精度が向上したことに伴い、今回の改訂では、鋼材腐食に対するひび割れ幅の限界値を見直した。

検討の結果、塩化物イオンが飛来する環境と飛来しない一般の環境を区分せず、共通の限界値を設定してひび割れ幅を制御することとし、その値として、鉄筋に対しては、従来一般的な環境のひび割れ幅の限界値として用いられてきた $0.005c$ (c : かぶり) を用いることとした。PC 鋼材の腐食に対するひび割れ幅の限界値は、PC 鋼材の腐食特性等に十分に配慮する必要があることから、従来から鉄筋に対する限界値の 80% 程度に低減されてきた¹²⁾。今回の改訂でも、これを踏襲し、PC 鋼材に対する限界値は $0.004c$ とした。

一般的なポストテンション方式 PC 桁においては、図 - 5 に示すように、PC 鋼材よりコンクリート表面に近い位置に鉄筋が配置されている。図示した例では、PC 鋼材および鉄筋のかぶりはそれぞれ 86 mm および 40 mm であり、PC 鋼材かぶりは鉄筋かぶりの 1.25 倍以上となっている。この場合、PC 鋼材および鉄筋の腐食に対するひび割れ幅の限界値はそれぞれ 0.34 mm および 0.20 mm となり、鉄筋の腐食に対する照査を行えば、一般には PC 鋼材の腐食に対しても安全であると考えられる。

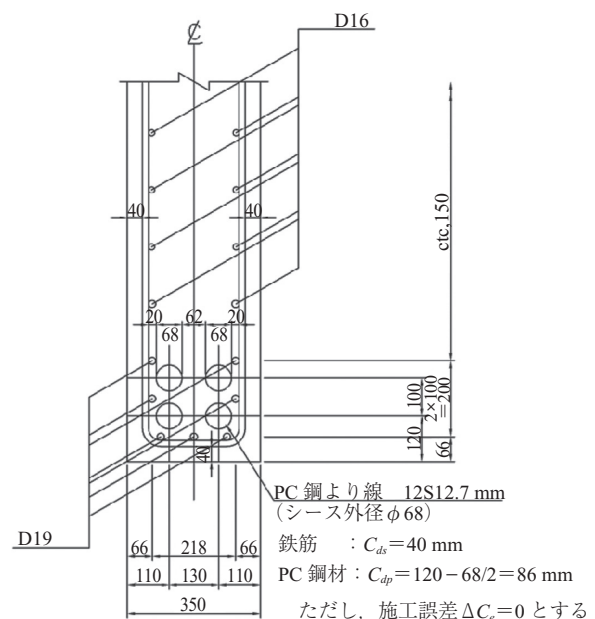


図 - 5 鉄筋および PC 鋼材の配置状況

6. 有効プレストレスの算定

6.1 概要

今回の改訂では、構造体の種類 (PC or PRC) に関わらず、鉄筋拘束の影響を考慮して有効プレストレスを算定することを原則とし、これまで PRC 構造に適用されていた PC 鋼材の引張応力度減少量の算定式を PC 構造にも適用することが規定された。減少量の算定には、コンクリートの収縮ひずみおよびクリープ係数が必要となる。それらの予測式も今回改訂されたので、PC 橋の標準的な配合および環境条件を想定し、新しい予測式を適用して収縮ひずみおよびクリープ係数の設計用値を算定した。

なお、算定条件が同等とみなす場合には、表 - 2 に示す設計用値を用いて、PC 鋼材の引張応力度の減少量を求めてよいこととした。

表 - 2 コンクリートの収縮ひずみおよびクリープ係数

	プレストレスを与えたときまたは荷重を載荷するときのコンクリートの材齢				
	4～7日	14日	28日	3ヵ月	1年
収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)	360	340	330	270	150
クリープ係数	3.1	2.5	2.2	1.8	1.4

6.2 収縮ひずみおよびクリープ係数の予測式

新しい収縮予測式は、最新のデータに基づいたことに加え、材料・配合と収縮ひずみの特性値（標準試験値）を関係付ける式(12)と、材料特性、環境条件および部材寸法を入力して構造物中の収縮ひずみの経時変化を予測する式(13)により構成されている。式(12)では、近年の骨材事情を考慮し、骨材の吸水率がパラメータとして導入されている。式(13)では、室内試験結果から材料特性を同定できるオプションが用意されている。

$$\epsilon'_{sh} = 2.4 \left(W + \frac{45}{-20 + 30 \cdot C/W} \cdot a \cdot \Delta\omega \right) \quad (12)$$

ここに、 ϵ'_{sh} ：収縮ひずみの特性値 ($\times 10^{-6}$)
(JIS 試験値の推定値)

W ：コンクリートの単位水量 (kg/m^3)
($W \leq 175 \text{ kg/m}^3$)

C/W ：セメント水比

a ：骨材の品質の影響を表す係数 $a = 4$ (標準的な骨材の場合)

$\Delta\omega$ ：骨材中に含まれる水分量

$$\Delta\omega = \frac{\omega_s}{100 + \omega_s} S + \frac{\omega_G}{100 + \omega_G} G$$

ω_s ：細骨材の吸水率 (%)

ω_G ：粗骨材の吸水率 (%)

S ：単位細骨材量 (kg/m^3)

G ：単位粗骨材量 (kg/m^3)

$$\epsilon'_{ds}(t, t_0) = \frac{\frac{1 - RH/100}{1 - 60/100} \cdot \epsilon'_{sh,inf} \cdot (t - t_0)}{\left(\frac{d}{100}\right)^2 \cdot \beta + (t - t_0)} \quad (13)$$

ここに、 $\epsilon'_{ds}(t, t_0)$ ：部材の乾燥収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)

t, t_0 ：コンクリートの材齢および乾燥開始時材齢 (日) ($t_0 \geq 3$ 日)

RH ：構造物の置かれる環境の平均相対湿度 (%) ($45\% \leq RH \leq 80\%$)

d ：有効部材厚 (mm)。断面の平均部材厚を用いてよい。ただし、乾燥面が一面のみで、隣合う面が乾燥状態

にない場合は、平均部材厚の2倍とする。

$\epsilon'_{sh,inf}$ ：乾燥収縮ひずみの最終値

β ：乾燥収縮ひずみの経時変化を表す係数

$$\epsilon'_{sh,inf} = \left(1 + \frac{\beta}{192} \right) \cdot \epsilon'_{sh} \quad (14)$$

$$\beta = \frac{30}{\rho} \left(\frac{120}{-14 + 21C/W} - 0.70 \right) \quad (15)$$

ここに、 ρ ：コンクリートの単位容積質量 (g/cm^3)

一方、クリープ係数は、式(16)～式(18)により算定した。この予測式は、これまで高強度領域に適用されていたものであるが、普通強度域にも適用可能であることが確認されている。クリープの経時変化を対数関数で表しているため、指数関数を用いた従来の普通強度用の予測式よりも、長期的には大きなクリープ係数を与えるものである。

$$\phi(t, t') = \frac{4W(1 - RH/100) + 350}{12 + f'_c(t')} \cdot \log_e(t - t' + 1) \cdot E_{ct} \quad (16)$$

ここに、 $\phi(t, t')$ ：材齢 t' (日) に初載荷を行ったコンクリートの材齢 t (日) におけるクリープ係数

W ：コンクリートの単位水量 (kg/m^3)
($W \leq 175 \text{ kg/m}^3$)

RH ：相対湿度 (%) ($45\% \leq RH$)

t' および t ：載荷時および載荷中のコンクリートの有効材齢 (日) であり、式(17)により補正した値を用いる。($t' \geq 7$ 日)

$$t \text{ および } t' = \sum_{i=1}^n \Delta t_i \cdot \exp \left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0} \right] \quad (17)$$

Δt_i ：温度が T ($^{\circ}\text{C}$) である期間の日数

T_0 ： 1°C

$f'_c(t)$ ：載荷時の有効材齢 t' (日) におけるコンクリートの圧縮強度 (N/mm^2) で、式(18)を用いて算定する。

$$f'_c(t) = \frac{1.11 t'}{4.5 + 0.95 t'} (-20 + 30 C/W) \quad (18)$$

E_{ct} ：載荷時の有効材齢 t' (日) におけるコンクリートのヤング係数

6.3 収縮ひずみおよびクリープ係数の算定条件

(1) コンクリートの配合

コンクリートの配合は、実際の施工に用いられたコンクリートの配合データ¹³⁾に基づいて設定した。配合データは、ポストテンション方式のPC橋の主桁・床版・横桁に適用されたコンクリートを対象に収集されたものであり、骨材の吸水率が記録されている556配合を抽出した。その結果、呼び強度 40 N/mm^2 の配合数がかつとも多いことな

○ 解説 ○

などを勘案し、標準的なコンクリートの圧縮強度の特性値は、 $f'_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$ 程度とした。

表 - 3 に、標準的な配合条件を示す。標準的な配合および骨材の吸水率は、配合データの各項目の平均値を目安にして設定した。ただし、コンクリートの単位水量は、収縮ひずみに及ぼす影響を重視し、配合設計における上限値の $W = 175 \text{ kg/m}^3$ とした。

(2) 環境条件

PC 鋼材の引張応力度の減少量は、従来部材断面の収縮およびクリープが同様であると仮定し、平面保持の仮定に従って算定している¹⁴⁾。そこで、収縮ひずみおよびクリープ係数は、降雨を含む実際の環境条件の影響を考慮して部材の上端および下端での値を求め、それらを平均して断面の平均値とした。

屋外に建設される PC 橋等を考えると、図 - 6 に示すように、上端は降雨の影響を直接受け、乾燥しにくい状態にある。これに対し、下端は降雨の影響を受けにくく、一般には乾燥状態にあると考えられる。そこで、断面の上端および下端の平均相対湿度をそれぞれ $RH = 95\%$ および $RH = 65\%$ として、収縮ひずみおよびクリープ係数をそれぞれ算定した。

なお、構造物の置かれている環境の温度は 20°C とした。

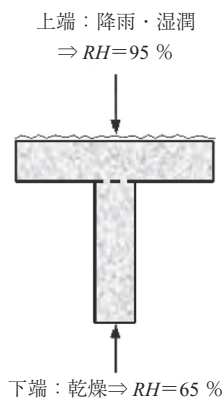


図 - 6 環境条件

6.4 収縮ひずみおよびクリープ係数の算定結果

図 - 7 および図 - 8 に、収縮ひずみおよびクリープ係数の予測値の経時変化を示す。コンクリートの収縮開始材齢あるいは載荷材齢をそれぞれ固定し、コンクリートの材齢を逐次変化させて算定した予測値を図示している。

設計耐用期間（コンクリートの材齢）は 100 年とした。また、有効部材厚は $d = 300 \text{ mm}$ とした。上端および下端

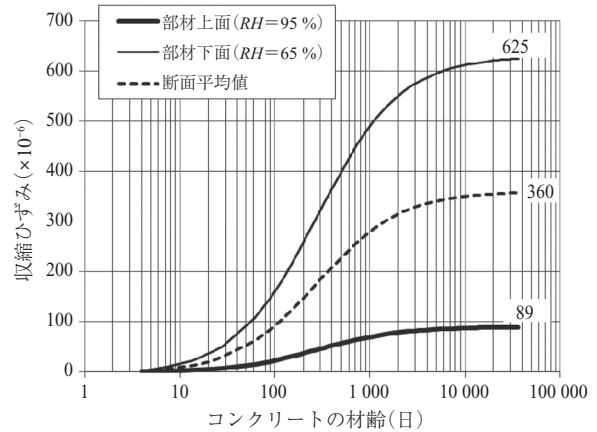


図 - 7 収縮ひずみの経時変化

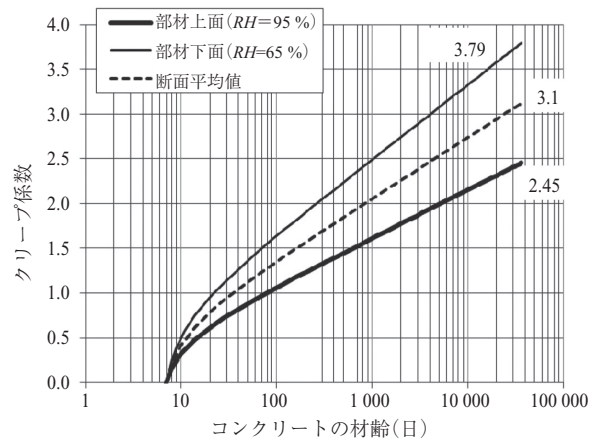


図 - 8 クリープ係数の経時変化

の予測値をそれぞれ算定し、その平均値を丸めた数値が、表 - 2 に示す載荷材齢 4～7 日の設計用値となっている。載荷材齢 14 日以降の設計用値は、コンクリート材齢 100 年の断面平均値から、乾燥開始材齢あるいはプレストレス導入材齢の断面平均値を差し引いて算定した。

従来の設計用値と比較すると、材齢 4～7 日の収縮ひずみは 360×10^{-6} となり、従来の値 (350×10^{-6}) より若干大きくなった。同様に、クリープ係数は 3.1 となり、従来の値 (2.7) より若干大きくなった。

なお、当該構造物の条件が上述した条件と異なる場合には、別途、収縮ひずみおよびクリープ係数を算定しなければならない。

収縮およびクリープ係数の予測式は、室内試験における

表 - 3 標準的なコンクリートの配合

	W/C (%)	C (kg/m ³)	W (kg/m ³)	細骨材		粗骨材		ρ (g/cm ³)	
				S (kg/m ³)	w _s (%)	G (kg/m ³)	w _G (%)		
配合データ	最大値	54.5	627	191	858	3.70	1 201	3.17	2.50
	平均値	41.0	400	162	712	1.76	1 047	0.98	2.32
	最小値	27.4	290	138	459	0.57	387	0.18	1.80
標準的な配合	40	—	175	750	2.0	1 000	1.0	2.3	

無筋コンクリート供試体の一軸実験結果に基づいたものである。実構造物中では横方向鉄筋や多軸拘束の影響等により、収縮ひずみおよびクリープ係数は各予測式で算定された値より小さくなると考えられるが、それらの影響を定量的に考慮するまでには至っていない。そこで、それらの影響を考慮しない場合、安全側の措置として、表 - 2 に示す値を用いてよいこととした。

7. PC 橋の長期たわみ

7.1 概 要

PC 長大橋のたわみが、設計時に予測した値を上回って増大を続ける事例が報告されている。この原因のひとつは、構造物中のコンクリートの収縮ひずみが、構造物の断面形状、外気温度や相対湿度、鋼材の拘束により、構造物中の位置によってその大きさや時間に対する進行特性に差が生じ、これが構造応答に影響を及ぼすためであることが近年の研究により明らかになっている。

一方、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考慮することが困難である。

そこで、今回の改訂では PC 橋の長期のたわみ解析に関する最近の研究成果と改訂作業部会における検討に基づき、材料・構造連成応答解析システムによる方法と、ファイバーモデル解析による方法の2つを掲載した。

7.2 材料・構造連成解析法

東京大学の前川らによる一連の研究により、コンクリート中の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が開発されている。このシステムによると、PC 長大橋の長期たわみを精度良く算定可能であることが報告されている^{15,16)}。

本解析システムによると、温度と湿度といった環境状態量が各時間・各部位に応じて、質量・エネルギー・運動量保存則を満たす解を算出し、これを構造体全域にわたり積分することで、構造物の長期変形が評価される。本解析法は、構造物の長期変形のみならず、あらゆる構造応答を汎用的に精度良く予測する可能性をもった方法であり、今後、設計実務においてもこのような方法が取り入れられてゆくものと思われる。そこで、今回の改訂では、試金石として本解析法を PC 橋の長期たわみの算定法として掲載した。

7.3 ファイバーモデルによる解析法

7.2 で述べた材料・構造連成解析法は汎用性の高い解析手法であるが、現時点におけるハードおよびソフトウェア環境においては、設計実務において標準手法とすることは難しいと考えられる。

そこで、従来から橋梁技術者らに広く用いられてきた一般的な構造解析法の延長で、7.2 で述べた材料・構造連成

解析法による方法と同等の長期たわみの算定結果を得ることができる方法を掲載した¹⁷⁾。本法は、ファイバーモデルに基づいている。部材断面を複数の部位に分割し、部位ごとの環境条件(温度・湿度)、鉄筋、PC 鋼材による拘束に応じたコンクリートの収縮やクリープを考慮することにより、断面内の収縮差が部材の変形に及ぼす影響を表現する方法である。たとえば、従来は一断面に対して1つのモデルで構造解析を行うことが一般的であった箱型断面構造では、図 - 9 に示すように、上床版、側壁、下床版の3つの部位に区分して、それぞれのはり要素を用いた構造解析モデルに、部位ごとの環境条件に応じたコンクリートの収縮やクリープの影響を与えて構造解析を行う。

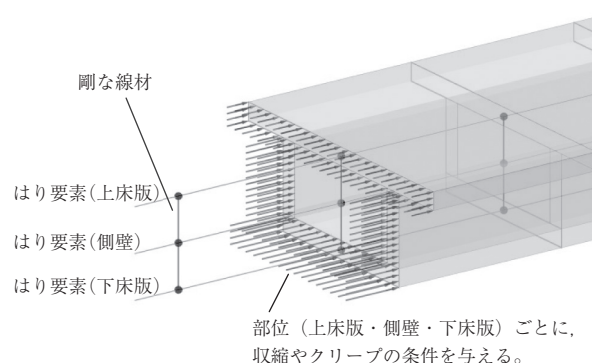


図 - 9 はり要素を用いた構造解析モデルの概念図

8. おわりに

本稿では、2012年制定土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕における、プレストレストコンクリートに関連する改訂事項を中心に解説した。今回の改訂は、全体構成が原理原則である〔本編〕と標準的な方法を示す〔標準〕とのすみわけの明確化を進めたこと、最近の技術の進歩を踏まえ〔標準〕の内容の更新を多岐にわたって行ったことが特徴である。本稿で紹介した以外にも、非線形有限要素解析による照査を〔標準〕に取り入れたこと、塩害による耐久性照査の精度を向上させたことなどが改訂点としてあげられる。

コンクリート標準示方書が、信頼性の高いコンクリート構造物の実現に貢献することを願っている。

参考文献

- 1) 二羽, 山田, 横沢, 岡村: せん断補強筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, 第 372 号 /V-5, pp.167 ~ 176, 1986
- 2) CEB: CEB-FIP Model Code 1978, 1978
- 3) CEB: CEB-FIP Model Code 1990, 1990
- 4) fib: Model Code 2010 (First complete draft), 2010
- 5) M.P.Collins and D.Mitchell: Prestressed Concrete Structures, PRENTICE HALL INC., 1991
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書(平成3年版)改訂資料およびコンクリート技術の今後の動向, コンクリートライブラリー 70, 1991
- 7) 土木学会: RC・PC 構造物の設計に関する現状と今後と展望 - RC・PC 部会報告 -, コンクリート技術シリーズ, No.22,

- 1997
- 8) 三方, 示, 井上, 小林, 仁枝: せん断補強筋のない PC はり部材の曲げ・せん断耐荷挙動, 平成 9 年度土木学会関西支部年次学術講演概要, pp.V-11-1 ~ V-11-2, 1997
 - 9) 三方, 井上, 小林, 仁枝: 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.149-59, 2001
 - 10) 土木学会: 2012 年制定コンクリート標準示方書改訂資料, コンクリートライブラリー第 138 号, pp.122-127, 2013
 - 11) 土木学会: 2007 年版コンクリート標準示方書改訂資料, コンクリートライブラリー第 129 号, pp.55-61, 2008
 - 12) 土木学会: コンクリート標準示方書 (昭和 61 年制定) 改訂資料, コンクリートライブラリー第 61 号, pp.196-200, 1986
 - 13) プレストレスト・コンクリート建設業協会: スランプ検討小委員会報告 施工性を考慮したコンクリートの性状に関する報告書, 2005
 - 14) 土木学会: 2002 年版コンクリート標準示方書改訂資料, コンクリートライブラリー第 108 号, pp.52-60, 2002
 - 15) 千々和伸浩, 杉田恵, 石田哲也, 前川宏一: セメント硬化体中の微視的機構モデルに基づく実 PC 橋の長期時間依存変形シミュレーション, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, pp.407-412, 2010
 - 16) Maekawa, K., Chijiwa, N. and Ishida, T.: Long-term deformational simulation of PC bridges based on the thermo-hygro model of micro-pores in cementitious composites, Cement and Concrete Research, Vol.41 (2), pp.1310-1319, 2011
 - 17) 渡辺忠朋, 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 (材料・コンクリート構造), Vol.69, pp.207-226, 2013

【2013 年 5 月 1 日受付】

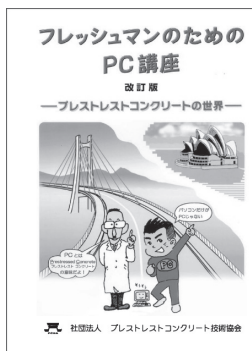


図書案内

フレッシュマンのための PC 講座・改訂版 — プレストレストコンクリートの世界 —

大変ご好評をいただいております「フレッシュマンのための PC 講座」も平成 9 年に第一版が発刊されてから約 10 年が経過いたしました。

その間に、基準値・規格値をはじめとした技術基準が従来単位系から SI 単位系に移行しました。また、プレストレストコンクリート構造物においても、複合構造等の新しい構造物が誕生しています。そこで、これらの項目を新しく見直して、改訂版を発刊することにいたしました。これからの技術者を育てるためには、大変有意義な図書であると確信しておりますので、是非有効利用されることをお勧めいたします。



主な改訂項目

- ・従来単位系から SI 単位系に変更しました。
- ・PC を利用した構造物の紹介に、最近の新しい構造物を盛り込みました。

発 刊 日: 2007 年 3 月

定 価: 3,600 円 / 送料 400 円 / 冊

会 員 特 価: 3,000 円 / 送料 400 円 / 冊

体 裁: A 4 判, 140 頁

申 込 先: 公益社団法人プレストレストコンクリート工学会