

「高強度鉄筋緊張 PRC 構造設計指針(案)・同解説」 の発刊について

鈴木 計夫*¹・大野 義照*²・竹田 清二*³

本設計指針案は、高強度鉄筋を緊張材（緊張鉄筋）としてプレストレストコンクリート（PC）構造に用いるものである。従来、PC 構造には PC 鋼材、鉄筋コンクリート（RC）構造には普通鉄筋と長らく使い分けられてきた。しかるに、鉄筋の緊張は、単体で PC 鋼材の代わりをつとめ、同時に普通鉄筋としてひび割れ制御と二つの機能を併せもつ鋼材の役割を果たし、本設計指針案によって、普通鉄筋～高強度鉄筋～PC 鋼材と鋼材利用の連続化が可能になった。本設計指針案は、高強度鉄筋の緊張という、強度が中間領域に位置する構造性能の過渡的な挙動などの諸問題を明らかにしている。その一つとして、PC 部材で重要なプレストレスト力有効率 η の値が、PC 鋼材を用いる PC 構造では、ポストテンション $\eta=0.85$ 、プレテンション $\eta=0.80$ 、と簡略化できるが、緊張鉄筋の場合は緊張時の鉄筋伸びが PC 鋼材に比べ相対的に低く広範囲であるためプレストレスト力有効率が新たな課題となりこれらを含め解説する。また、実務設計者が抵抗なく設計できるよう、豊富な設計例と計算図表を用意している。

キーワード：高強度鉄筋，緊張鉄筋，PRC 構造，プレストレスト力有効率

1. はじめに

時代は大きく遡る。1888 年 C.F.Doehring がプレストレストの原理を発表したが、導入したプレストレストがコンクリートの収縮とクリープのためまったく失われた失敗はプレストレストを学んだ人には周知のとおりである。当時の材料技術による $100\sim 120\text{ N/mm}^2$ の鋼材の緊張応力ではやむをえないことであった。今日では、降伏点強度（永久伸び 0.2% 点）で $1400\sim 1500\text{ N/mm}^2$ の PC 鋼より線、 $900\sim 1100\text{ N/mm}^2$ の PC 鋼棒の高張力鋼があり、前記の損失を見込んでも 8 割以上のプレストレストが有効で緊張材として機能を果たしている。以来高張力鋼は緊張材として、普通鉄筋は曲げ主筋材ならびにひび割れ制御筋として、それぞれ役割を分担して今日まで発展してきた。

一方、普通鉄筋も近年では 490 N/mm^2 級から 785 N/mm^2 級の高強度鉄筋が製品化され、建築分野では主にせん断補強筋として使用されてきている。この高強度鉄筋を小梁や床材の曲げ部材に用いるとき、ひび割れや、過大たわみのため十分その性能を活用できなかった。

その解決の方法として、30 数年前に高強度鉄筋（当時

では最大強度級の 600 N/mm^2 の鉄筋）を、緊張材とする曲げ部材の研究が始められている。この中間領域での最大の課題は、クリープ、乾燥収縮によるプレストレスト力の減退の評価で、この方面での解決策が望まれた。高強度鉄筋に緊張材と普通鉄筋の役割を併せもたせる考えは世界を見渡しても見あたらない。普通鉄筋～高強度鉄筋～PC 鋼材と鋼材利用の連続化は鋼材の有効活用による材料節減の経済効果も見込まれる。本設計指針案は、RC 造と PC 造の中間領域の PRC 造における高強度鉄筋の有効活用を目指している。技術的には、たとえば緊張材に適した鋼材形状、緊張方式など今後改良すべき点が多々残される。設計者が高強度鉄筋を緊張材に活用するとき、現状では使用鋼材が JIS 外製品のため自由な選択ができず大臣の認可が必要なことなど条件整備面で、ハードルが高いが、本設計指針案が少しでもその手助けになれば有難い。

2. 本設計指針案の概要

2.1 設計指針案構成

本設計指針案は、全 6 章と付録で構成される（図 - 1）。全体構成は、設計者が本設計指針案に従えば一連の設計

*¹ Kazuo SUZUKI

大阪大学
名誉教授

*² Yoshiteru OHNO

大阪大学
名誉教授

*³ Kiyoji TAKEDA

昭和コンクリート工業(株)
顧問

ができる内容としている。

以下、抜粋して解説する（ 内は指針本文の抜粋）。

<p>1章 総則</p> <p>1.1 適用範囲</p> <p>1.2 用語の定義 (以下、省略)</p> <p>2章 使用材料</p> <p>2.1 コンクリート</p> <p>2.2 鉄筋</p> <p>2.2.1 鉄筋</p> <p>2.2.2 強度</p> <p>2.2.3 ヤング係数</p> <p>2.2.4 リラクセーション値</p> <p>3章 設計</p> <p>3.1 設計に関する一般事項</p> <p>3.1.1 架構応力計算の方針</p> <p>3.1.2 部材設計の方針</p> <p>3.1.3 ひび割れ幅制御目標値</p> <p>3.1.4 変形制御目標値</p> <p>3.1.5 材料の許容応力度</p> <p>3.2 断面設計</p> <p>3.2.1 断面設計の仮定</p> <p>3.2.2 長期応力に基づく断面算定</p> <p>3.2.3 終局強度設計に基づく断面算定</p> <p>3.2.4 終局曲げモーメントの算定および考慮すべき応力の組合せ</p> <p>3.2.5 部材の長期設計荷重時におけるせん断ひび割れの検証</p> <p>3.2.6 部材の終局せん断強度の検証および考慮すべき応力の組合せ</p> <p>3.2.7 プレキャスト PC および PRC 合成部材の水平打継面のせん断設計</p> <p>3.2.8 定着長さおよび定着部の設計</p> <p>4章 構造細則</p> <p>4.1 緊張鉄筋のかぶり厚さ</p> <p>4.2 最小鉄筋比</p> <p>5章 プレキャスト PC 合成床板</p> <p>5.1 設計に関する一般事項</p> <p>5.2 現場打ちコンクリートの品質</p> <p>5.3 プレキャスト PC 合成床板に関する構造規定</p> <p>6章 設計例</p> <p>6.1 設計例 1 プレキャスト PC 合成小梁</p> <p>6.2 設計例 2 プレキャスト PC 合成床板</p> <p>6.3 設計例 3 プレキャスト PRC 合成床板</p> <p>付録</p> <p>付 1 矩形断面のプレストレス力有効率 η の算定図表</p> <p>付 2 PC 合成梁の断面応力の算定</p> <p>付 3 PRC 合成部材の鉄筋応力算定精算式および略算法</p> <p>付 4 実施例〈大成札幌ビル〉 (以下、省略)</p>

図 - 1 本設計指針案の目次 (抜粋) (注: は解説有り)

2.2 1章 総則

2.2.1 1.2節 用語の定義

最初に本設計指針案で定義した特徴的な用語を示す。

高強度鉄筋：JIS G 3112 以外の鉄筋で降伏点強度が 490 N/mm² を超える鉄筋

緊張鉄筋：プレストレスを導入するために緊張材として使用する鉄筋

初プレストレス力, 初プレストレス：プレストレス導入によって、定着完了直後（弾性縮み後）にコンクリートに作用している力 (N)，およびその力によって生ずるコンクリート断面部分（鉄筋負担分を除く）の応力 (N/mm²)

有効プレストレス力, 有効プレストレス：プレストレスを与えたのち、緊張材のリラクセーション、コンクリートのクリープおよび乾燥収縮が終わったあともなおコンクリートに作用している力 (N)，およびその力によって生ずるコンクリート断面部分（鉄筋負担分を除く）の応力 (N/mm²)

プレストレス力有効率：初プレストレス力に対する有効プレストレス力の比

プレストレス有効率：初プレストレスに対する有効プレストレスの比

2.2.2 1.1節 適用範囲

- 1) 曲げひび割れ幅やたわみを制御する目的で、高強度鉄筋などによってプレストレスの導入された小梁やスラブなどの地震力を負担しないプレストレス鉄筋コンクリート部材の設計に適用する。
- 2) プレテンション部材および合成部材を対象とする。

先述したように、高強度鉄筋の緊張は、緒に就いたばかりで、実績は十分とはいえず技術的に開発途上にある。したがって、用途は地震力を負担しない小梁ならびにスラブ部材に限定し、かつプレテンション部材を対象としている。

(1) 高強度鉄筋緊張概説

高強度鉄筋緊張は、図 - 2 に示すように普通強度鉄筋を超える高強度部分を許容引張応力までプレストレスとして活用する。これは長期応力部材では過大なたわみ・ひび割れ幅制御のため普通鉄筋でも設計応力を 155~215 N/mm² と制限している。結果として、鉄筋緊張によって一つの鋼材でひび割れ制御とプレストレス導入が同時に可能となる。

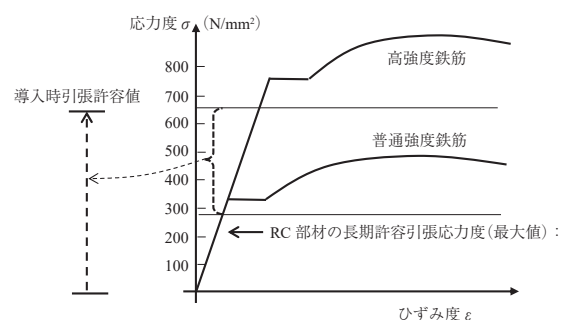


図 - 2 高強度鉄筋の PRC 部材への利用

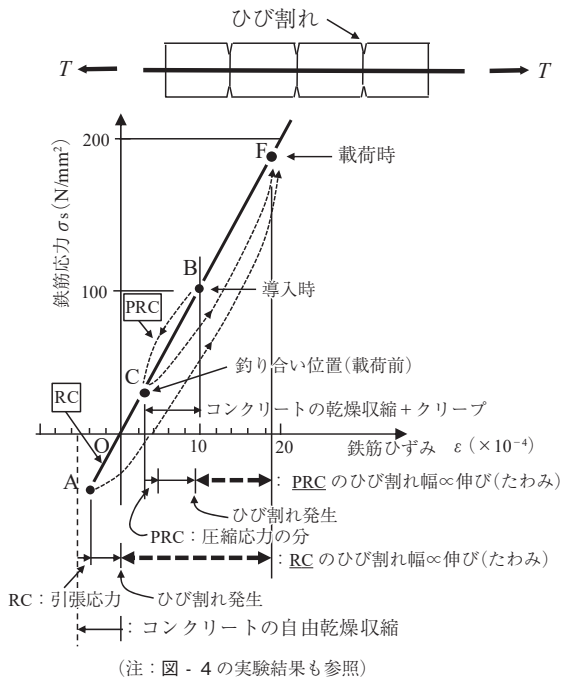


図 - 3 普通鉄筋緊張の場合とひび割れ幅比較

図 - 3 は、鉄筋を緊張した場合 (PRC) と緊張しない場合 (RC) のひび割れ幅の比較を示している。RC は、 \overline{OAF} と動き、PRC は \overline{BCF} と動く。すなわち PRC の場合、普通強度鉄筋の許容引張応力度以下の緊張力で締め付けた (B 点) のち、クリープ、乾燥収縮によりコンクリートに導入されたプレストレスがかなり少なくなっても (C 点)、ひび割れ幅は RC 部材のひび割れ幅と比べると、大きな改善効果が得られる。

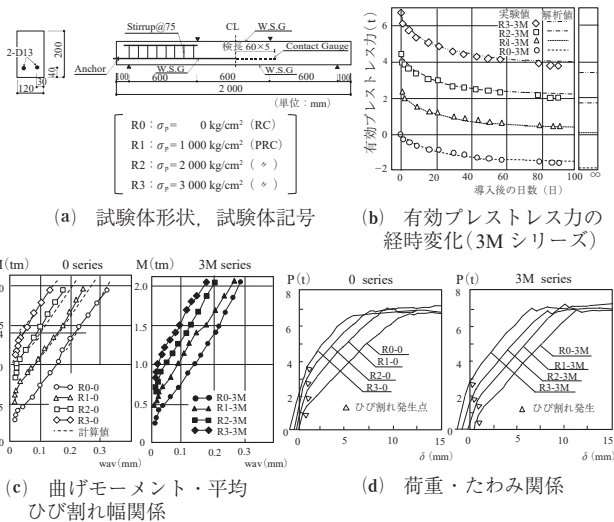


図 - 4 緊張鉄筋 PRC 梁と RC 梁の力学性状の比較

図 - 4 に筆者¹⁾らが 1987 年に行った実験結果を示す。実降伏点強度が 600 N/mm^2 の高強度鉄筋を用いて、高強度鉄筋の緊張力を $0, 100, 200$ および 300 N/mm^2 とした場合の応力減少状況 (b 図)、曲げモーメント・ひび割れ関係 (c 図) および荷重・たわみ関係 (d 図) を RC 部材と比較したものであるがその効果は明瞭に示されている。

(2) 導入プレストレス力減少の基本

導入力を減少させる要因として、① コンクリートの乾燥収縮、② プレストレスによるコンクリートのクリープ、③ 緊張材の応力緩和 (リラクゼーション)、反対に減少量を食い止める要因として、緊張しない普通鉄筋 (圧縮を拘束する作用) がある。

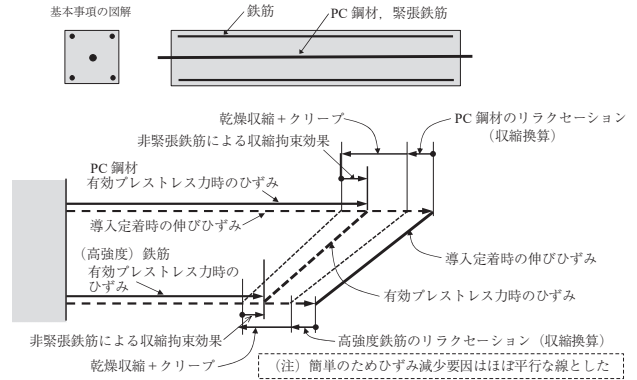


図 - 5 (純引張材) 導入プレストレス力減少の基本

図 - 5 は、純引張材の場合で、縦方向に鉄筋・鋼材の強度による軸を、横方向に鉄筋・鋼材それぞれの伸びひずみを示している。図の右端の太実線が導入定着時の伸びひずみ状態とすると、これがコンクリートの乾燥収縮とクリープによって左に移動し (プレストレス力の低減)、断面に緊張しない鉄筋がなければ一番左の細い点線まで低減し、ある場合右側の太点線で止まることを示している。

2.3 2章 使用材料

2.3.1 2.2 節 鉄筋

(1) 2.2.1 項 鉄筋

- 1) 本設計指針案においては、JIS G 3112-2010 に定める鉄筋を「普通鉄筋」、降伏点強度が 490 N/mm^2 を超える鉄筋を「高強度鉄筋」と称している。
- 2) 緊張材として用いる鉄筋は、原則として降伏点強度が 490 N/mm^2 を超える鉄筋を用いる。

緊張材として用いる鉄筋は、 490 N/mm^2 の近傍からプレストレス力有効率が急速に低下するため、鉄筋を効率良く活用するために一応の制限を設けている。

(2) 2.2.2 項 強度

- 1) 鉄筋の材料強度は、JIS G 3112 (鉄筋コンクリート用棒鋼) に規定される規格値および、建築基準法第 37 条二号の国土交通大臣認定 (以下、「大臣認定」と略記) 建設省告示第 1446 号 (最終改正平成 29 年 6 月 5 日国土交通省告示第 611 (以下、「平成 12 建告第 1446 号」と略記)) の第 1 第四号 鉄筋での大臣認定取得時に指定された数値を用いる。
- 2) 緊張材として用いる鉄筋の材料強度およびリラクゼーション値は平成 12 建告第 1446 号の第 1 第二十一号 緊張材の大臣認定取得時に指定された数値を用いる。

緊張材として用いる高強度鉄筋は、平成 12 建告第 1446 号 第二十一で緊張材としての大員認定を取得した鉄筋とし、認定された数値に準じる。緊張材に要求される機械的性質は、耐力、引張強さ、伸び、リラクゼーション値であり、

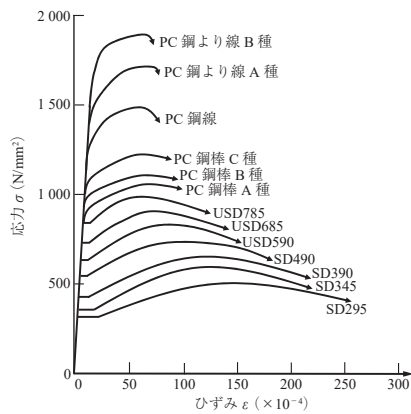


図 - 6 JIS G 3112 に準拠する鉄筋、高強度鉄筋およびPC鋼材の応力 - ひずみ曲線

鉄筋との相違はリラクゼーション値の規定の有無である。

図 - 6 に鉄筋、高強度鉄筋およびPC鋼材の応力ひずみ曲線を示す。伸びに関しては、高強度化により小さくなる懸念されるため、緊張材として使用する高強度鉄筋の伸びはPC鋼棒規格の5%以上より大きい材料が望ましい。現在、鉄筋として大臣認定を取得している高強度鉄筋の伸びは、おおむねね主筋用鉄筋ではUSD590が12%以上、USD685が10%以上、せん断補強筋用ではUSD685が10%以上、USD785が8%以上である。

(3) 2.2.4 項 リラクゼーション値

リラクゼーション値は、JIS Z 2276（金属材料の引張りリラクゼーション試験方法）ならびにJIS G 3109（PC鋼棒）またはJIS G 3137（細径異形PC鋼棒）に準拠し、実験して得られた大臣認定時の数値とする。

緊張材のリラクゼーション特性は、材料特性のなかでもとくに重要である。リラクゼーションの特性は、初期荷重、温度などに大きく影響され、初期荷重が大きくなるほど、あるいは温度が高くなるほどリラクゼーション値は増加する。図 - 7 は清水²⁾らがUSD685について試験期間24時間で行ったリラクゼーション実験結果である。横軸は実降伏強度に対する初期応力比で、縦軸はリラクゼーション値である。初期応力比が0.60から0.80の範囲ではほぼ一定の値を示し、0.85を超えるとリラクゼーション値は急激に増加している。

鋼材のリラクゼーション値は、上記のほか製造工程の変更でも変化する。JIS Z 2276（金属材料の引張りリラクゼーション試験方法）に、1994年のJIS改定で1000時間の常

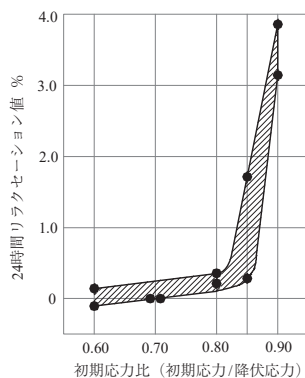


図 - 7 USD685の初期応力比に対するリラクゼーション値

温リラクゼーション値が規定されている。

2.4 3章 設計

2.4.1 3.1.5 項 材料の許容応力度

(1) 緊張鉄筋

プレストレス導入時の許容引張応力度
 $0.85 \times \sigma_y$ または $0.75 \times \sigma_u$ のうち小さいほうの値
 定着完了時および長期の許容引張応力度
 $0.80 \times \sigma_y$ または $0.70 \times \sigma_u$ のうち小さいほうの値
 (注) σ_y : 規格降伏点強度, σ_u : 規格引張強度

本設計指針案において緊張鉄筋は、プレストレス導入時とともにひび割れの発生を許容するPRC構造でひび割れ発生後に生じる緊張鉄筋の引張応力の大きさに制限値が必要となることから長期許容応力度を定めている。

建築基準法施行令第90条では、鋼材に関して基準強度Fの1.5分の1を長期許容応力度と定めている。図 - 8 に鋼材の降伏点強度 σ_y が 295 N/mm² と 685 N/mm² の場合について示す（ただし、ここでは基準強度 $F = \sigma_y$ としている）。施行令によれば許容値は $0.67 \sigma_y (= \sigma_y / 1.5)$ であるが緊張材として用いる鉄筋すなわち緊張鉄筋が建築基準法第37条の規定（平成12建告第1446号）に基づく第一号の緊張材で、第二号（法第37条第一号の日本工業規格又は日本農林規格の別表第1および別表第2）に該当すると国土交通大臣の認定を受けた場合、PC鋼材と同等の許容応力度としている。したがって、本設計指針案も「PC規準」53条（PC鋼材の許容引張応力度）に準じるものとしている。

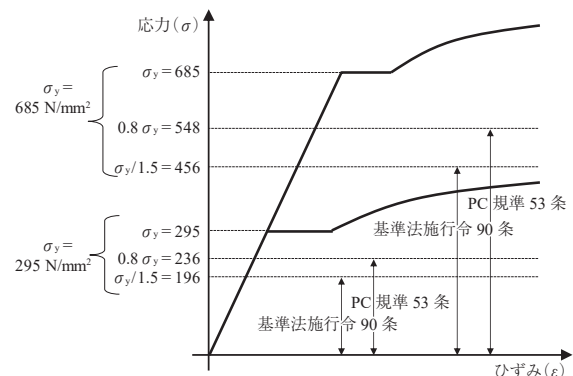


図 - 8 施行令による鋼材の長期許容応力度と「PC規準」による緊張材の許容引張応力度

2.4.2 3.2.1 項 断面設計の仮定

(1) プレストレス力有効率 η

緊張材として高強度鉄筋を使用する場合のプレストレス力有効率 η は、諸条件を考慮し解析によって求めるか、実験によって求めることを原則とする。

1章総則の解説で述べているが、緊張材に高強度鉄筋を使用する場合には一般に使用されているPC鋼材に比べ緊張応力が小さいのでプレストレス力有効率 η が小さくなる。これを確認するため、解説でプレストレス力有効率 η について3つの計算例によって考察している。

(計算例1) プレストレス力有効率 η と諸条件との関係

有効率 η に及ぼす影響を図 - 9 に示すモデルにより、8要因、(a) 緊張鉄筋量、(b) 鉄筋比、(c) 鉄筋緊張応力、(d) コ

ンクリート強度, (e) コンクリートの乾燥収縮ひずみ, (f) コンクリートのクリープ, (g) 緊張材のリラクゼーション値, (h) 偏心距離, の各要因の水準を変動させ検討しているが, 本稿では (e)~(h) について示す。

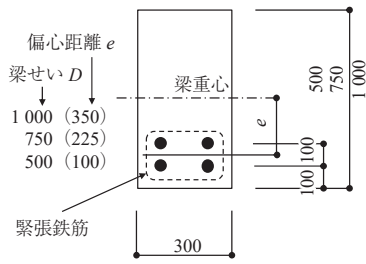


図 - 9 小梁の検討モデル

図 - 10 において, (e)~(g) の各要因で想定している範囲では, (f) のクリープの影響が最も大きく, 次いで (e) の乾燥収縮ひずみの影響が大きい。(h) の偏心距離 e は, e が大きくなると回転ひずみが増大し, 偏心のない場合に比べ緊張力が低下し, 有効率 η は小さくなる。

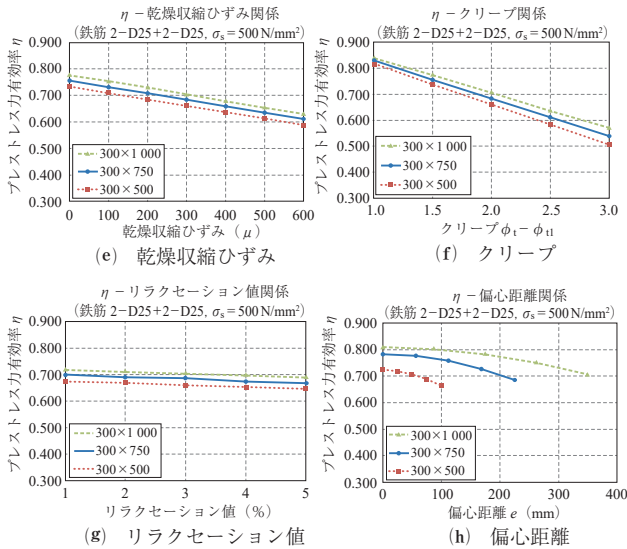


図 - 10 プレストレス力有効率 η と諸条件の関係

(計算例 2) プレストレス力有効率 η と緊張材ひずみの経時変化

梁断面 $300 \text{ mm} \times 750 \text{ mm}$ の重心に鋼材 (鉄筋, PC 鋼材) を梁断面積に対して 0.9% 配置し, すべての鋼材の緊張応

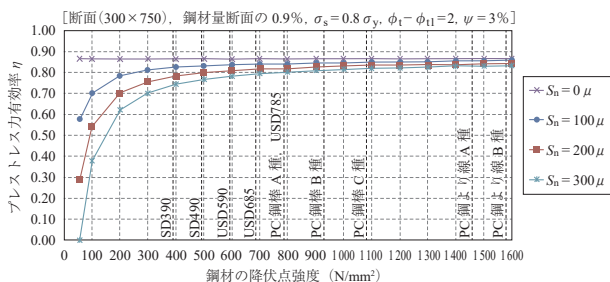


図 - 11 鋼材の降伏点強度と $S_n = 0, 100, 200, 300 \mu$ におけるプレレストス力有効率 η の関係

力 $\sigma_s = 0.8 \sigma_y$ とした場合, 横軸に鋼材の降伏点強度, 縦軸にプレレストス力有効率 η をとり, 乾燥収縮ひずみ $S_n = 0, 100, 200, 300 \mu$ に対する各関係を図 - 11 に示す。

乾燥収縮ひずみは緊張応力の影響を受けないため, 緊張応力が小さい場合には緊張材のひずみが小さく乾燥収縮の影響が大きくなり, プレストス力有効率 η は小さくなる。しかし, 緊張応力が大きい場合には緊張材のひずみが大きくその影響は小さくなり, プレストス力有効率 η は一定値に収束する傾向にある。

(計算例 3) プレストス力有効率 η とプレレストス有効率 η'

緊張材が PC 鋼材の場合と鉄筋の場合に関して, 緊張力の有効率 (プレレストス力有効率 η) とコンクリートに作用する力の有効率 (プレレストス有効率 η') の比較検討をしている。

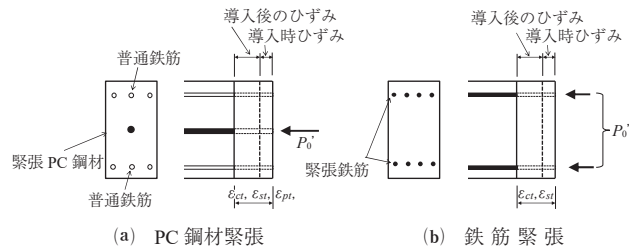


図 - 12 PRC 梁による検討モデル

(仮定条件) プレテンション方式のプレキャスト PRC 梁を対象とし, 図 - 12 の (a) の PC 鋼材断面積と普通鉄筋断面積の和と (b) の緊張鉄筋断面積が同じで, かつ両鋼材のヤング係数も同じとする。

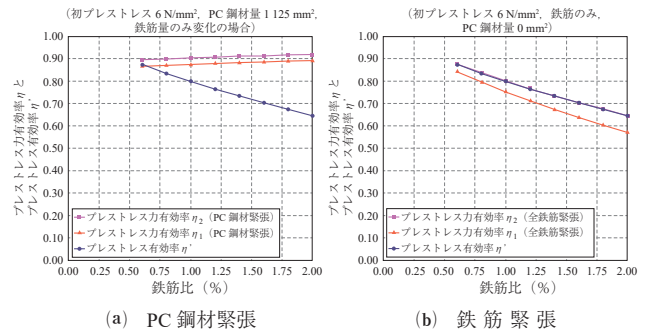


図 - 13 η, η' と鉄筋比の関係

図 - 13 に初プレレストス 6 N/mm^2 について, 鉄筋比を変えた場合のプレレストス力有効率 η (η_1, η_2) とプレレストス有効率 η' について比較している。ここに, η_1 : プレレストス導入直前の鋼材緊張力 P_0' を分母とした場合, η_2 : P_0' から導入時の弾性変形による緊張力の減退量を導入直後の値を分母とした場合。以下, 結果だけを示す。

- ・ PC 鋼材を緊張した場合と鉄筋を緊張した場合のプレレストス力有効率 η は大きく異なり, 前者の場合, 鉄筋比が大きくなると η はわずかながら大きくなる。一方, 後者の場合は鉄筋比が大きくなるにしたがって鉄筋の緊張応力が小さくなるため, η は小さくなる。
- ・ プレレストス有効率 η' は, 鋼材量が等しい条件下では, PC 鋼材緊張の場合と鉄筋緊張の場合とで同じである。
- ・ 鉄筋緊張の場合は, コンクリート断面に作用するプレ

トレス力の減退量と緊張材の緊張力の減退量は等しく $\eta_2 = \eta'$ である。

(2) 付1. 矩形断面のプレストレス力有効率 η の算定図表

付録1に有効率 η の算定図表を掲載している。図表は、乾燥収縮ひずみ $S_n=300, 500 \mu$ の2ケースについて、コンクリート強度 $F_c=30, 40, 50, 60 \text{ N/mm}^2$ に対し、緊張鉄筋降伏点強度 $\sigma_y=590, 685, 785 \text{ N/mm}^2$ における有効率 η が算定できるようになっている。なお、初引張応力 σ_s は降伏点強度の0.8倍とし、クリープ係数最終値 $\phi_n=2.5$ 、リラクゼーション値は $\Psi=5\%$ としている。図表でのプレストレス力有効率 η は、

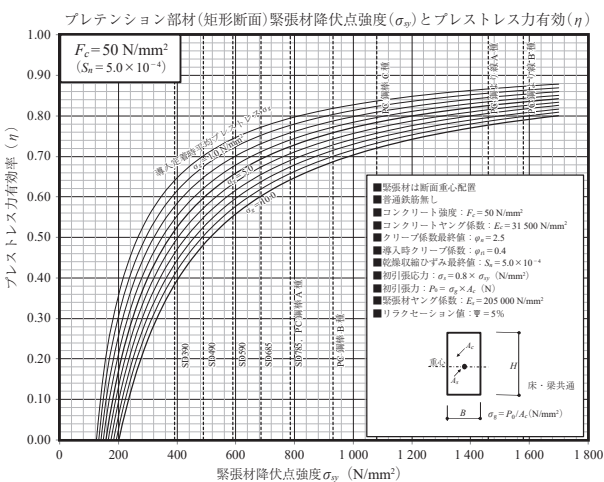
プレストレス力有効率 $\eta = \text{基本有効率 } \eta_0 \times \text{偏心乗数 } m$ で表される。

図-14に、乾燥収縮ひずみ $S_n=500 \mu$ の場合のコンクリート強度 $F_c=50 \text{ N/mm}^2$ 、緊張鉄筋降伏点強度 $\sigma_y=590, 685, 785 \text{ N/mm}^2$ の算定図表を示す。

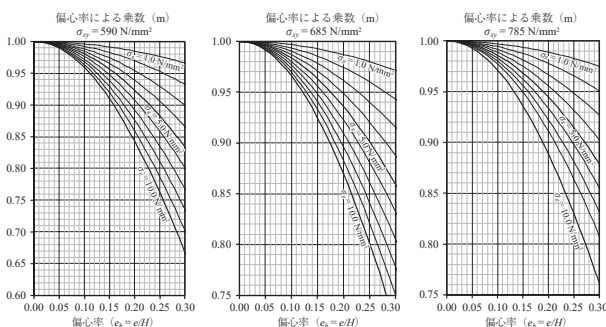
算定例として、緊張鉄筋降伏点強度 $\sigma_y=785 \text{ N/mm}^2$ 、平均プレストレス $\sigma_g=5 \text{ N/mm}^2$ 、偏心率 e_h (=偏心距離 e / 部材せい H) 0.2の場合について求める。

(a) 図表の横軸から緊張鉄筋の降伏点強度 $\sigma_y = 785, \sigma_g = 5$ を選択し、基本有効率 $\eta_0 = 0.725$ を得る。(b)の右端図表 $\sigma_y = 785$ から、横軸の $e_h = 0.2$ と $\sigma_g = 5$ を選択し偏心乗数 $m = 0.945$ を得る。したがって、

プレストレス力有効率 $\eta = 0.725 \times 0.945 = 0.685$ が得られる。



(a) 偏心率 0 の場合の基本有効率 η_0 の算定図表



(b) 偏心率による乗数 m

図-14 プレストレス力有効率 η 算定図表

2.4.3 3.2.7 項 プレキャスト PC および PRC 合成部材の水平打継面のせん断設計

1) 水平打継面に接合筋がなく人為的粗面の場合
打継面の終局せん断応力 τ_j は次式による。

$$\tau_j = (Q_{un} \times S) / (b \times I_T) \leq f_j = 0.5 \quad \text{式(1)}$$

ここに、 Q_{un} : 終局せん断強度の検討に対するの組合せによる最大せん断力、 S : コンクリートの合成部材断面重心軸に対する打継面より下方の断面1次モーメント、 b : 打継面の幅、 I_T : コンクリートの等価断面重心軸に対するコンクリートの断面2次モーメント、 f_j : 打継面の終局せん断強度、である。

2) 水平打継面に接合筋を有する場合

打継面の終局せん断強度 τ_{ju} は次式による。

$$\tau_{ju} = \mu \times (p_w \times w_f y + \sigma_0) \quad \text{ただし、} \tau_{ju} \leq 0.3 F_c \quad \text{式(2)}$$

$$\tau_j = Q_{un} / (b \times j) \quad \text{式(3)}$$

$$\tau_{ju} \geq \tau_j$$

ここに、 μ : 打継面の摩擦係数、 p_w : 打継面の単位面積あたりの打継面を横断する鉄筋の断面積の比、 σ_0 : 応力の法線方向成分、 $w_f y$: 接合筋の規格降伏点強度 ($\leq 800 \text{ N/mm}^2$)、 j : 応力中心距離、である。

(1) 水平打継面に接合筋がない場合

粗面は3~4mm程度とし、接合面積の広い場合で、式(1)は全断面が有効に働くことを前提とした弾性式である。打継面のせん断応力の各種実験値は一般的に1.5~2.5 N/mm² でばらつきを考慮し、3倍の余裕度をみて打継面の終局せん断強度 $f_j = 0.5 \text{ N/mm}^2$ とした。 $f_j > 0.5$ の場合には接合筋を設けるものとする。

(2) 水平打継面に接合筋を有する場合

水平打継面に接合筋を有する場合、打継面の終局せん断強度 τ_{ju} はせん断摩擦理論の式(2)より求め、応力の組合せで求めた式(3)の終局せん断応力 τ_j 以上であることを検証する。

2.4.4 3.2.8 項 定着長ささと定着部の設計

1) 緊張材の定着長さを推定し、部材長がその定着長さの4倍以上になるようにしなければならない。また、定着長さ域はRC部材としてせん断力に対する検討を行うものとする。

2) 異形鉄筋緊張材の定着部の付着応力と付着割裂強度を算出し、付着応力が付着割裂強度を超えないようにする。

(1) 定着長さ

プレテンション部材では、緊張材がその緊張力を定着領域で、コンクリートとの付着を介して確実に伝達できる十分な定着長さを有していることが重要である。菅田³⁾ はかぶり厚さ70mmとした場合の定着長さ L_b の略算式を提案している。

$$L_b / \phi = a_1 \times \sigma_B + b_1$$

$$a_1 = -0.003 \phi - 0.0005 \sigma_s$$

$$b_1 = 0.6 \phi + 0.08 \sigma_s - 7$$

ここに、 σ_B : コンクリート圧縮強度で F_c (N/mm^2)、 L_b :

定着長さ (mm), φ : 緊張鉄筋の公称径 (mm), σ_s : 導入緊張応力 (N/mm²), である。

(2) 定着部の付着割裂対策

部材端における緊張材の定着領域で, 部材性能を大きく劣化させる付着割裂破壊を生じさせないようにすることが非常に重要である。菅田⁴⁾は緊張材周辺のコンクリートが割裂破壊を生じないという前提で最大付着応力の略算推定式を提案している。

$$\begin{aligned} \tau_{\max} &= 1.25 (a_2 \times \sigma_B + b_2) \\ a_2 &= -0.001 \varphi + 0.00007 \sigma_s + 0.06 \\ b_2 &= -0.04 \varphi + 0.0006 \sigma_s + 3 \end{aligned}$$

付着破壊が生じるかどうかの判定は「RC 規準」⁵⁾の付着割裂強度推定式により判定する。

$$\begin{aligned} \tau_{bu} &= \{0.094 [(c' + W) / \varphi] + 0.131\} \sqrt{\sigma_B} \\ W &= 80 A_{st} / (s \times N) \end{aligned}$$

ここに, τ_{bu} : 付着割裂破壊強度 (N/mm²), N : 横補強筋本数, s : 横補強筋間隔 (mm), A_{st} : 一組の横補強筋全断面面積 (mm²), c' : 緊張材最小かぶり厚さの3倍と緊張材あき寸法の小さいほうの値 (mm), である。

2.5 4章 構造細則

2.5.1 4.1節 緊張鉄筋のかぶり厚さ

緊張材として用いる高強度鉄筋のかぶり厚さは, 梁部材は 50 mm 以上, 床部材では 35 mm 以上とし, 耐久性および耐火性, 構造性能を考慮して設計者が定めることとする。

緊張鉄筋のかぶり厚さは, 小梁とスラブのため「PRC 指針」ではなく告示⁶⁾に準じた。

2.5.2 4.2節 最小鉄筋比

1) 小梁の場合, 長期設計荷重時に正負最大曲げモーメントを受ける部分の緊張鉄筋および普通鉄筋の引張鉄筋比 p_t は, 式(4)の値を満たすものとする。

$$\begin{aligned} p_t &\geq [0.4 - 2.0 (\sigma_g / F_c)] \times (1/100) \\ p_t &= p_s + p_p = (a_s + a_p) / (b \times d) \quad \text{式(4)} \\ \sigma_g &= P_c / (b \times D) \end{aligned}$$

(記号説明省略)

2) スラブに関しても長期設計荷重時に正負最大曲げモーメントを受ける部分の緊張鉄筋および普通鉄筋の引張鉄筋比は式(4)を満たすものとする。

3) スラブ各方向の全幅について普通鉄筋と緊張鉄筋の断面積合計のコンクリートに対する割合 p_g は, 式(5)を満たすものとする。

$$\begin{aligned} p_g &\geq [0.2 - 0.3 (\sigma_g / F_c)] \times (1/100) \quad \text{式(5)} \\ p_g &= (a_t + a_p) / (t \times l) \end{aligned}$$

(記号説明省略)

最小鉄筋比は「PRC 指針」に準じている。

(1) 式(4): 曲げモーメントを受ける小梁・スラブの規定

コンクリート断面の最小鉄筋量は, 断面にひび割れが発生した時, 緊張鉄筋あるいは無緊張鉄筋のいずれかの応力が降伏点応力度よりも小さく保たれるための規定である。したがって, 緊張鉄筋の場合の最小鉄筋比は, 曲げひび割

れモーメント M_{cr} が鉄筋降伏曲げモーメント M_y に対して $M_{cr} < M_y$ の条件を満たすように, 有効プレストレス σ_g の大小や, 緊張しない鉄筋と緊張鉄筋の本数降伏点強度等の割合などを考慮して設定している。

(2) 式(5): スラブ全幅の規定

「RC 規準」の 0.2% にプレストレスの効果を加えている。

2.6 5章 プレキャスト PC 合成床板

5章は, プレキャスト PC 合成床板への適用頻度が多いと考え, 便宜を図る目的で, 床板特有の項目を追加しながら前章までの項目を再整理したものである。

2.6.1 5.1節 設計に関する一般事項

- 1) プレキャスト PC 合成床板は, プレキャストプレストレスコンクリート板 (以下, 「プレキャスト PC 板」と略記) と現場打ちコンクリートが一体になって働く構造とし, 平面保持の仮定のもと, 長期荷重に対しては許容応力度に基づいた弾性設計を行い, 終局強度設計用荷重に対しては 3章 3.2.4 項, 3.2.6 項の応力の組合せにより安全性を確認する。
- 2) プレキャスト PC 板は, 原則として一方向板として設計する。
- 3) 設計応力の算定に関しては運搬, 施工中の合成過程および合成後に作用する荷重, そのほか, 必要に応じて温度応力ならびに使用用途による特殊荷重を考慮する。
- 4) プレキャスト PC 合成床板は, 支持部材との拘束条件を考慮して, 原則として一方向板として設計し, かつ異方性スラブとして検討を加える。
- 5) プレキャスト PC 合成床板は, 必要に応じて長スパンスラブや片持ちスラブ等における地震時の上下振動ならびに面内せん断力に対して安全性を確認する。
- 6) プレストレス力有効率 (3章 3.2.1 項による)。
- 7) 打継面のせん断応力度 (3章 3.2.7 項による)。
- 8) プレキャスト PC 合成床板の変形制御目標値 (3章 3.1.4 項による)。

(解説省略)

2.7 6章 設計例

2.7.1 6.1節 設計例 1: プレキャスト PC 合成小梁

用途: 事務所 積載荷重 LL = 3.0 kN/m², 仕上荷重 FL = 1.0 kN/m²

スパン長: $L = 12.0$ m, 小梁支配幅: 3.0 m

小梁: (梁下端) プレテンション部材

(断面) 幅 400 mm × せい 800 mm (PCa650 + 現場打ち RC150)

使用材料: コンクリート: (PCa) 60 N/mm², (現場打ち RC) 30 N/mm²

緊張鉄筋 4 - 本 D35 (USD590)

導入前緊張力: $P_0' = 0.85 \times 590 \times 957 \times 4 \times 10^{-3} = 1920$ kN

設計クライテリア: パーシャルプレストレス

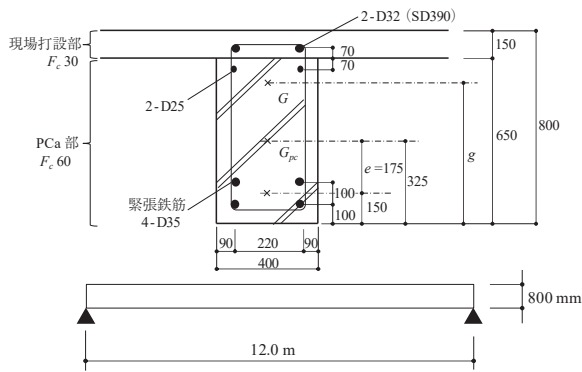


図 - 15 プレキャスト PC 小梁

2.7.2 6.2 節 設計例 2: プレキャスト PC 合成床板
用途: 住宅 積載荷重 LL = 1.8 kN/m², 仕上荷重 FL = 1.0 kN/m²
スパン長: 7.0 m, 支保工 3 か所 (中央 + 端部近傍 2 か所)

合成床: (PCa) プレテンション部材
(断面): 幅 1 200 mm × 厚さ 240 mm (PCa90 mm + 現場打ち RC150 mm)
使用材料: コンクリート: (PCa) 50 N/mm², (現場打ち RC) 24 N/mm²
緊張鉄筋 5 本 D16 (USD685)
初引張力: $P_0 = 0.80 \times 685 \times 199 \times 5 \times 10^{-3} = 545.3 \text{ kN}$

設計クライテリア: パーシャルプレストレス

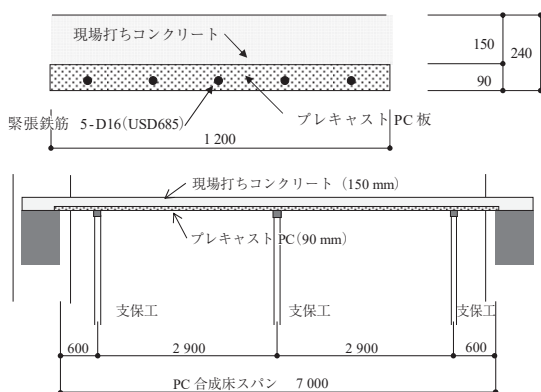


図 - 16 プレキャスト PC 合成床

2.7.3 6.3 節 設計例 3: プレキャスト PRC 合成床板
用途: 倉庫 積載荷重 LL = 10.0 kN/m², 仕上荷重 FL = 1.0 kN/m²

スパン長: 5.97 m
合成床: (PCa) プレテンション部材
(断面): 幅 1 000 mm × 厚さ 300 mm (PCa200 mm + 現場打ち RC100 mm)
使用材料: コンクリート: (PCa) 50 N/mm², (現場打ち RC) 24 N/mm²
緊張鉄筋 4 本 D16 (USD685)
初引張力: $P_0 = 0.80 \times 685 \times 199 \times 4 \times 10^{-3} = 436.2 \text{ kN}$

PCa: プレテンション部材
設計クライテリア: PRC (Ⅲ_{0.2})

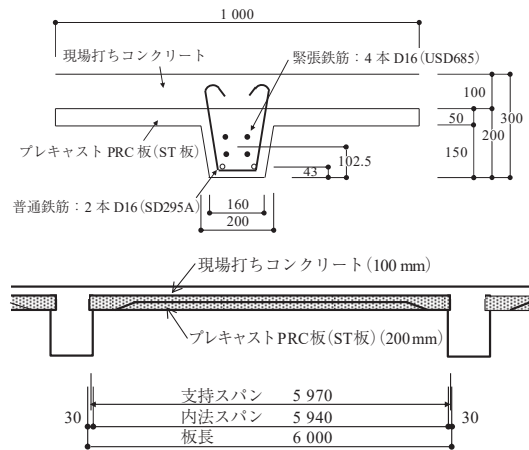


図 - 17 プレキャスト PRC 合成床

3. おわりに

本設計指針案は緊張鉄筋としての高強度鉄筋は、本指針案では、地震荷重を負担しないプレテンション部材の小梁や床材に限定している。実績が少ないことに加え地震対応の製品開発、製造技術、施工技術が未成熟なこともある。しかしながら、本書には取り上げていないが鉄筋緊張による新しい製品も出始めている。この新しい分野での発展に本設計指針案が第一歩になればと期待する。

謝 辞

本設計指針案は、本工学会の公募研究委員会に採択され、委員長 (鈴木計夫大阪大学名誉教授) 以下、下記の委員構成で 2014 年 4 月から 2019 年 2 月にかけて作成された。

高強度鉄筋緊張 PRC の研究と設計指針の作成委員会

委員長 鈴木計夫 (大阪大学名誉教授)
副委員長 大野義照 (大阪大学名誉教授)
幹事長 竹田清二 (昭和コンクリート工業)
委員 (50 音順)

池田永司 (池田技術研究所), 越路正人 (東京鉄鋼土木), 小室努 (大成建設), 坂田博史 (建研), 徐光 (ジェーエスディー), 菅田昌宏 (竹中工務店), 中本篤 (ジェーエスディー), 林田則光 (富士ビー・エス), 久野俊文 (ヤマックス), 松谷輝雄 (向山工場)

参考文献

- 鈴木計夫, 大野義照, 白井敏彦: 高強度鉄筋を用いてプレストレスを導入した PRC 梁の曲げ性状, コンクリート工学年次論文報告集, 9-2, 1987, pp.489-494
- 清水秀夫, 鈴木計夫, 大野義照, 大野鐵: 高強度鉄筋 SD490 のリラクセーション値; 日本建築学会大会学術講演梗概集 (東北) 1991.9, pp.1049-1050
- 菅田昌宏: 高強度異形鉄筋を緊張材として用いるプレテンション部材の定着および付着性能評価に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.2, 2015
- 菅田昌宏: 高強度異形鉄筋を緊張材として用いるプレテンション部材の定着長さおよび最大付着応力度の推定, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 IV, 2015.9
- 日本建築学会: 鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説 (2010.2), 16 条, p.198
- 昭和 58 年 7 月 25 日建設省告示第 1320 号 (最終改正平成 27 年 1 月 29 日国土交通省告示第 184 号), プレストレストコンクリート造の建築物又は建築物の構造部分の構造方法に関する安全上必要な技術的基準

【2019 年 4 月 24 日受付】