

P C 構造の設計上の諸問題

(Problems in the Design of Prestressed Concrete Structures)

京都大学教授 藤 井 学

1. まえがき

土木学会のコンクリート標準示方書は、限界状態設計法を採用するなど基本的な改訂を加えた昭和61年制定から5ケ年の経過を得て今回改訂版が出版された。改訂作業において、現行示方書(61年版)には、研究や実績が少ないために実際の設計を行ううえで不都合のあるもの、示方書の改訂の流れの中で明確な根拠を失ったもの、また記述が不十分なものがいくつかあることなどが指摘された。P C 調査研究部会では、P C 構造の設計条項の将来の改訂に備えて、長期的な検討を要する重要な問題点を整理し、これらに関する現行の代表的な4つの海外規定を系統的にとりまとめ、さらにわが国における技術の現状を把握するうえで参考となる研究文献を調査している。ここでは、当P C 部会による調査結果の要点を示すとともに主要項目について概説する。

2. 調査結果の要点

現行示方書の設計編 第11章(プレストレストコンクリート)の条項を逐一詳細に検討した結果、今後長期にわたり研究すべき重要課題として表1の5つの項目が指摘された。すなわち、1. アンボンドP C (外ケーブル工法も含む)、2. P R C (Ⅲ種P C)、3. せん断耐力へのプレストレス力の影響、4. 緊張材の設計疲労強度の算定方法および5. P C 鋼材の定着域と屈曲部(外ケーブルの変向部)の補強方法である。3. 4. 5. は 1. 2. にも関連する問題である。

表1には、各項目に関する現行示方書の問題点の要点と記述箇所(章・項)ならびに、海外規定のうち、代表的な4つの規定、CEB-FIP Model Code(1990)、BS 5400・8110、DIN 4227 および ACI 318 (89)における関係条項の有無が示されている。表2は海外規定の関係条項の要点をとりまとめたものである。これをみると、海外規定においても十分な内容となっていないことがわかる。

3. アンボンドP C の特徴

ポストテンションP C ではP C 鋼材と本体コンクリート間の付着の賦与およびP C 鋼材の防せいを目的として、緊張後にシース内にグラウト注入を行うのが普通であるが、防せい材の発達によってP C 鋼材表面にあらかじめ防せい材を塗布またはこれにポリプロピレン等のシースをつけたアンボンドP C (UPCと略記する)鋼材が容易に得られるようになり、これをそのままコンクリート中に打ち込み、緊張後はグラウト注入を必要としないUPCがかなり以前から米国を中心に使用されてきた。わが国においても、施工上や耐久性の点で有利なため、最近土木、建築分野において利用増加の傾向がみられる。利点・欠点を要約すると次のようである。

3.1 利点

- 1) 現場でのP C 鋼材の配置が容易である。
- 2) プレストレス導入後のグラウト注入が不要である。
- 3) P C 鋼材に対する防せいの信頼性が高い。
- 4) ひびわれ発生前の力学的特性は通常のボンドP C と変わらない。

3.2 欠点

- 1) 付着がないためにひび割れ間隔とひび割れ幅が大きくなる。
- 2) 曲げ破壊耐力がポンドPCより小さくなる。
- 3) 繰返し荷重を受ける場合、PC鋼材の疲労破壊に対する検討が必要である。

上記のうち、2)について若干説明を加える。

多くの実験によると、UPC部材の曲げ破壊強度は付着のある場合の80~95%に低下している¹³⁾。その原因は曲げ破壊時における破壊断面のPC鋼材引張力が付着のある場合よりも小さくなるためである¹⁴⁾。これを図1に示す単純梁について説明すると、付着のある場合には平面保持の仮定が適用できるので、同図中央に示す曲げモーメント分布の大きさに応じてPC鋼材が部材の各断面においてそれぞれ引張られ、曲げ破壊時には同図下段の点線で示すような曲げ破壊時PC鋼材伸びひずみ材軸方向分布となる。これに対してUPC部材では付着がないために各断面で平面保持とはならず、部材全長にわたってPC鋼材伸びひずみは実線で示すようにどの断面でも一様となる。簡単にいえば、点線で示した付着のある場合のPC鋼材伸びひずみ分布の平均値が、部材のどの断面でもおこるとみなすことができる。

このように平面保持の仮定が適用できないUPC部材断面の曲げ破壊モーメントを精算することは可能ではあるが¹⁴⁾、計算が面倒で実用向きでなく、実験式や略算式³⁴⁾が提案されている。

これらの式を実際構造物の設計に適用するにあたっては、PC鋼材配置形や载荷条件など影響する諸因子も多いので、今後の検討課題といえよう。とくに、多スパンラーメンの梁に通し配筋を行ったような場合、地震時水平力の作用でPC鋼材応力がどのように変化するかといった重要な問題も残されている。

4. 外ケーブルPCの特徴

外ケーブルPC構造は、PCケーブルをコンクリート断面中に入れずに外に配置し、支点上や中間横桁部等で保持し、その方向と偏心距離を確保し、外力に抵抗さす構造である。従来の内ケーブルの場合のケーブル配置は一般にパラボラであるが、外ケーブルでは多角形となる。

4.1 利点

橋梁を例にとりて、外ケーブルの利点を内ケーブルと比較すると以下のようである。

- (1) ウェブやスラブ等の部材厚の減少
- (2) 施工性の向上
- (3) ケーブルの取替え等維持管理が容易
- (4) グラウトの信頼性の向上

4.2 欠点、今後の課題

- (1) 耐力の適正な評価式の確立
- (2) ケーブル防護管の信頼性の向上
- (3) 変向ブロックの設計方法の確立
- (4) ケーブルの防震対策

5. あとがき

土木学会のコンクリート委員会に設けられた示方書改訂委員会、PC部会での調査研究成果の要点を述べた。また、指摘された主要な研究課題のうち、アンボンドPCと外ケーブルPCの問題点を概説した。PC部会で指摘の重要検討課題は、海外においても十分な研究や規定が整備されておらず、今後各方面で一層の調査研究が望まれる。

参 考 文 献

- 1) 石橋忠良他：PRC桁のひびわれに関する一考察，コンクリート工学年次論文報告集，12-2，1990.
- 2) 石橋忠良他：RC梁の曲げひびわれ性状に及ぼすひびわれ発生材令の影響，土木学会構造工学論文集，Vol.37A，1990.3.
- 3) 津吉 毅他：PRC桁のひびわれ幅算定方法について，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，1990.10.
- 4) 佐藤 勉：プレストレストコンクリートはりのせん断強度，鉄道総研報告，Vol.2，No.8，1988.8.
- 5) 小林祐規他：7本よりプレストレッシングストランドの空气中疲労強度および3%NaCl中腐食疲労強度，プレストレストコンクリート，Vol.31，No.2，Mar.1989.
- 6) 増田 隆他：ひびわれを有するPC桁中のPC鋼棒の疲労特性，日本道路公団試験所報告，Vol.26，pp89~99，1989.
- 7) 豊福俊泰他：PC鋼より線の疲労強度，コンクリート工学，Vol.25，No.7，1987.
- 8) 宮本征夫他：アンボンドPC桁の疲労試験，プレストレストコンクリート，Vol.17，No.4，Aug.1975.
- 9) 宮本征夫他：アンボンドPC部材の静的曲げ強度，鉄道技術研究所報告，No.826，pp1~24，1973.
- 10) 出光 隆他：鉄筋のPC緊張材としての利用に関する研究，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，1990.10.
- 11) 猪股俊司：パースシャルプレストレストコンクリート部材断面の設計法，土木学会論文集，No.348，1984.8.
- 12) 角田与史雄：断面の応力算定とひびわれの制御，コンクリート工学，Vol.25，No.7，1987.
- 13) 坂 静雄他：付着のないPC梁の亀裂および曲げ破壊耐力，日本建築学会論文報告集，No.60，1958.10.
- 14) 坂 静雄他：付着のないPC梁の曲げ破壊耐力，日本建築学会論文報告集，No.60，1958.10.
- 15) 戸塚 学：光弾性実験法によるP.Sコンクリートの研究，日本建築学会論文報告集，No.60，1958.10.
- 16) 石村威津雄他：プレストレスト量を変えたアンボンドPCスラブの載荷試験，土木学会関西支部研究発表会，1990.3.
- 17) 柳沼善明他：アウトケーブルを用いたPRC梁の曲げ性状，コンクリート工学年次論文報告集，11-2，1989.
- 18) 上田正生：アンカースリップの影響を考慮したPC梁部材の緊張解析，コンクリート工学年次論文報告集，11-2，1989.
- 19) 黒川章二他：アンボンド緊張材で補強したRCはりの疲労強度，コンクリート工学年次論文報告集，10-3，1988.
- 20) 小梁川 雅他：舗装用コンクリートの曲げ疲労特性に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，10-3，1988.
- 21) 柳沼善明他：アウトケーブルを用いたPRCはりの曲げ載荷実験，土木学会第42回年次学術講演会，1987.9.
- 22) 柳沼善明他：アウトケーブルを用いたPRCはりの力学的挙動，コンクリート工学年次論文報告集，9-2，1987.
- 23) 山本邦夫他：CFRPロッド使用アンボンドPCブロック梁及びプレテンション梁の曲げ実験，コンクリート工学年次論文報告集，9-2，1987.
- 24) 岡田克也他：高強度グラウトを利用したPC鋼より線埋込み定着部の力学的性能試験，コンクリート工学年次論文報告集，9-2，1987.
- 25) 柳沼善明他：アウトケーブルを用いたPRCはりのひびわれ性状について，土木学会第41回年次学術講演会，1986.11.
- 26) 六車 照他：アンボンドPC不静定梁の力学的性質に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，1986.
- 27) 石橋忠良：外ケーブル構造の利点と問題点，プレストレストコンクリート，Vol.32，No.5，1990. Sept-Oct.1990.
- 28) 六車 照他：アンボンドPC不静定梁の力学的性質に関する研究，プレストレストコンクリート，Vol.17，No.2，Mar.1975.
- 29) 最上達雄他：アンボンドPC部材の曲げ耐力に関する研究，大成建設技術研究所報，第17号.
- 30) 大石辰雄：アンボンドPC模型桁の載荷実験，プレストレストコンクリート，Vol.27，No.1，Jan.1985.
- 31) 竹本 靖：アンボンドPRC部材の曲げひびわれ性状について，大林組技術研究所報，No.31，1985.
- 32) 井上 晋：アンボンドPCはりの耐荷性状と塑性変形特性，土木学会第38回年次学術講演会，1983.9.
- 33) 岡田 清：アンボンドPC梁の基礎的諸特性に関する研究，プレストレストコンクリート，Vol.24，No.3，Mar.1982.
- 34) 六車 照：アンボンドプレストレストコンクリート構造とプレストレスト鉄筋コンクリート構造，プレストレストコンクリート，Vol.22，No.6，Dec.1980.
- 35) 六車 照：横拘束コンクリートによるアンボンドプレストレストコンクリート梁の靱性改善，日本建築学会大会学術講演梗概集，1981.9.
- 36) 猪股俊司：構造コンクリート曲げ部材使用限界状態の統一設計計算法，コンクリート工学，Vol.26，No.12，1988.
- 37) 角田与史雄：曲げを受けるコンクリート部材のひびわれとたわみに関する研究の現状，土木学会論文集，No.384，1987.8.
- 38) 猪股俊司：パースシャルプレストレストコンクリート部材断面の設計法，土木学会論文集，No.384，1987.8.
- 39) Amin Ghali, 渡辺 実訳：PCとRC構造物の使用時における実用計算法，橋梁，1987.10.
- 40) T. Y. Lin, Keith Thornton: Secondary Moment and Moment Redistribution in Continuous Prestressed Concrete Beams, PCI Journal, 1972. Jan-Feb.
- 41) R. J. Beaupre, 他: Deviator Behavior and Design for Externally Post-Tensioned Bridges, ACI Symposium 1989 SP-120-12, 1989.

表1 問題点と海外規定

番号	項目	問題点の記述		現行示方書 中の章・項	海外規定における記述の有無			
					CEB-FIP 90	BS	DIN 4227	ACI 318
1	アンボンドPC	①ひびわれ幅の算定方法	* 現示方書にはこの規定がない。	11.3.1	—	—	△	△
		②引張鋼材算出の変動荷重の係数1.35	現示方書には明確な根拠, 説明がない。	11.3.1(3)	—	—	○	△
		③曲げ耐力の低減率30%	現示方書には根拠, 説明がない。	11.4	—	—	△	—
		④曲げ耐力の計算方法	現示方書には具体的な方法は示されていない。	11.4	—	○	○	○
		⑤定着部及び屈曲部のPC鋼材の疲労検討方法	現示方書には具体的な説明がない。	11.5	△	—	—	—
2	PRC	①ひびわれ幅の算定方法	PRC部材のひび割れ幅の算定方法について新しい研究も進んでいる。	7.3.4	○	△	△	△
		②有効係数の算定	現示方書には, ひび割れの影響を考慮して別途検討するとあるが, 具体的な計算方法が示されていない。	11.2	—	△	—	—
		③せん断ひび割れ	現示方書には, せん断ひび割れに対するPCの効果が記述されていない。	11.3.2(3)	—	—	—	—
3	せん断	①せん断耐力へのPC効果	現示方書ではせん断耐力に対するPCの効果が明確でない。	7.3.5	△	△	—	△
4	緊張材	①緊張材設計疲労強度の算定方法	現示方書には明確な規定がない。	11.5 3.3.3	○	—	△	—
5	局部応力の補強	①定着部の補強方法	現示方書では記述が充実していない。	11.8.1(5)	○	○	○	○
		②屈曲部の補強方法	現示方書にはアウトケープル屈曲部の補強方法の記述がない。	11.8.1(5)	—	△	—	—

* 昭和61年制定 ○: 規定あり, △: 関係文あり, —: なし

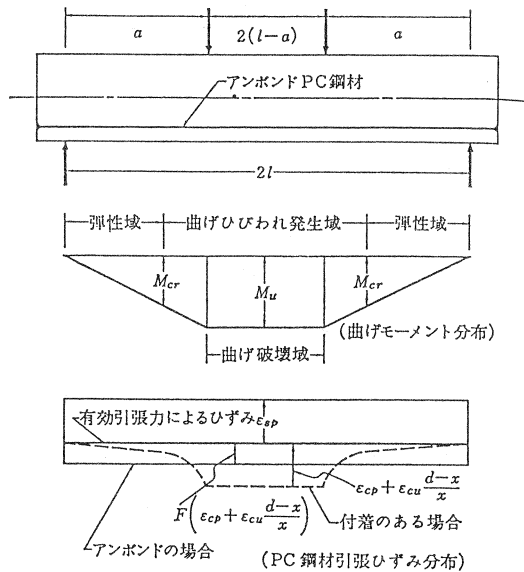


図1 アンボンドPC部材の曲げ破壊時PC鋼材引張応力分布

表2 海外規定の比較 (その1)

検討項目	CEB-FIP 90	BS 5400, 8110	DIN 4227	ACI 318-89
1. アンボンドPC				
① ひびわれ幅の算定方法	—	—	鉄筋径で規定している。	鉄筋応力度で規定している。
② 引張鋼材算出の変動荷重の係数	—	—	DIN 4227 (1953) に $1.35 \times$ 設計荷重で照査する旨の規定があり、PC設計施工指針 (昭和30年) ではこれを引用していたが、PC表示 (昭和53年) においては永久荷重 $+1.35 \times$ 変動荷重と変更された。しかし、現在のDIN 4227 Part 6 (アンボンドPC) においては荷重係数に変動荷重に対して 1.00 を用いており、根拠としては明確ではない。	アンボンドに区別なく 1.0 としている。
③ 曲げ耐力の低減率30%	—	—	—	—
④ 曲げ耐力の計算方法	—	アンボンドPC鋼材の設計引張応力度 f_{pb} および中立軸までの距離 x を、定着体間のPC鋼材の長さ l と有効高さ d の比 l/d の関数で規定している。これらを抵抗曲げモーメントの式に代入することで、耐力を求めることができる。ただし、 f_{pb} の最大値は鋼材の引張強度の70%に制限している。	付着形成前の部材に対して、付着形成後の断面力の70%をこえる断面力が作用する場合には限り、構造種別に応じた緊張材応力度増加量を考慮して耐力を算定することとしている。	緊張材応力度の増加量を $l/d \geq 35$ で限定している。
⑤ 定着部および屈曲部の疲労検討方法	—	—	—	—
2. PRC	—	—	—	—
① ひびわれ幅の算定方法	—	—	鉄筋径で規定している。	鉄筋応力度で規定している。
② 有効係数の算定	—	—	—	—

表2 海外規定の比較(その2)

検討項目	CEB-FIP 90	BS 5400, 8110	DIN 4227	ACI 318-89
③ せん断ひびわれ	Model Code '90 では、せん断によるひびわれに関する記述はない。Model Code '78 において、作用せん断力関数としてせん断によるひびわれ幅の検討を省略できる鉛直スタラーアップの最大間隔を規定している。また、はりの腹部や中空箱断面のせん断ひびわれ幅の算定式が示されている。	—	—	—
3. せん断	—	—	—	—
① せん断耐力へのPC効果	Model Code '90 には、せん断耐力の算定方法の明確な記述はなく、傾斜したPC鋼材の記述もない。 Model Code '78 に、せん断耐力の算定方法として標準的な方法と精密な方法の2種類の方法の記述がある。 傾斜したPC鋼材がある場合は、終局せん断力に初期プレストレスで補正したせん断力を使用する。	—	—	—
4. 緊張材	—	—	—	—
① 設計疲労強度の算出方法	疲労の検討としては、鋼材の変動応力の照査による簡易法と鋼材のS-N曲線を用いて、耐用期間中に予想される変動荷重の大きささと回数を考慮した照査が提案されている。 S-N曲線の諸定数については、PC鋼材の種類および状態に分けて規定している。	—	提案式はなし。ただし、設計荷重による鋼材応力係を、各種定着工法の認可証で示された変動幅の70%以下に抑えるべく規定している。	—
5. 局部応力の補強	—	—	—	—
① 定着部の補強	ポストテンション鋼材とプレテンション部材の定着域に生じる横方向引張応力すなわち、割裂(Bursting)、はく離(Spalling)、われ(Splitting)のそれぞれに対する補強方法を規定している。 割裂に対しては、補強範囲と鉄筋量を、はく離に対しては鉄筋量を、われに対しては緊張材純間隔を関数とした最小かぶり規定している。	ポストテンション方式のPC部材について個々の定着体まわりの割裂、定着部全体の力のつり合い、定着体の載荷面からのコンクリートのはく離に対して考慮することを規定している。割裂に対してのみ、スハイアル筋等による補強の範囲や補強量が計算できるようになっている。付着のあるPC部材については使用限界状態のみ照査すればよいが、アンボンドPC鋼材については終局限界状態として降伏強度の0.87倍が作用した場合に対しても照査が必要としている。	版状構造物内への定着にあたって、プレストレス力の25%以上を、同方向に配置した鉄筋により負担すべく補強することと規定している。	割裂、はく離、われの力に対して補強することを規定している。
② 屈曲部の補強	—	カーブしたPC鋼材がコンクリート表面近くに配置されている場合のかぶりを規定している。	—	AASHTO : 緊張材張力の分力ならびにアンバランス力に対して補強。また、近傍の曲げに対する照査を行うことを規定している。