

PC 構造物における材料技術の現状と将来展望

渡辺 博志*1・近藤 順*2

1. まえがき

近年、わが国におけるコンクリート構造物の設計思想は変革の時期にさしかかっている。変革の大きな流れをあげるとすると、

- ① 仕様規定型から性能照査型への移行
- ② 初期建設コストのみに着目したコストの低減から、初期建設コストに加えて維持管理も含めたライフサイクルコストの低減への移行
- ③ 環境負荷の低減に向けた配慮、とくに温室効果を有する CO₂ の削減

が意識されるようになってきたことが考えられる。とくに、維持管理面を含めたライフサイクルコストの低減にあたっては、これまで以上に耐久性能を重視した取り組みが必要になるものと思われる。コンクリート構造物の耐久性向上については、塩害やアルカリ骨材反応などによる早期劣化を防止することを目的として、昭和 50 年末頃から精力的な研究が進められ、一応の成果が得られた。しかし、昨今の耐久性に関わる問題は、早期劣化の防止も含まれているが、その主題は、これまで半永久的であったとするコンクリート構造物の耐久性について、より定量的に把握するとともに、耐久性能として正確に照査をすることも主眼として捉えられており、以前の取り組みと若干異なったものとなっている。

これらを総合すると、プレストレストコンクリート構造物の設計施工にあたっての自由度が増す一方、真に必要とされる性能をより多角的な面から評価および照査し実現させてゆくことが、将来的に求められてゆくものと考えられる。

ここでは、プレストレストコンクリートを構成する主な

材料であるコンクリートおよび PC 鋼材に焦点を当てて、その技術の現状と将来展望について触れることとする。多少主観的な意見も含まれているが、その点はご容赦いただきたい。

2. コンクリート材料

PC 構造物に関連したコンクリート材料に関する技術開発のこれまでの歩みを振り返ると、もっとも力を大きく注がれてきたのはコンクリートの高強度化であると思われる。高流動コンクリートの開発も、高強度コンクリートの実用化にはなくてはならないものである。それに加え、人工軽量骨材の使用によるコンクリートの軽量化、フライアッシュや高炉スラグといった副産物の混和材料としての有効な活用と、この使用による耐久性能の向上といったところが、主として検討されてきたと思われる。ここでは、これらのコンクリートについて記述することとする。

2.1 高強度コンクリート

コンクリートの高強度化がもたらすメリットについては、すでにいくつかの報告がなされており、とくに支間長が長い場合には、主桁本数の減少に伴うコストの削減が顕著に認められている¹⁾。高強度コンクリートの歴史はすでに文献²⁾において詳細に示されているのでここでは触れないが、比較的早くから開発は進められている。しかし、実用の面からすると、道路橋についていえば実用化にこぎつけたのは比較的新しく、平成 8 年度の道路橋示方書において初めて、現場打ちコンクリートについて 60 N/mm²、工場製品について 80 N/mm² までの設計基準強度について言及された。60 N/mm² 以上の高強度コンクリートを用いて近年建造された主な PC 道路橋は表 - 1³⁾ に示すとおりである。

高強度コンクリートの普及の鍵を握る点としては、次の検討項目があげられる。

- ① 力学的な性能
- ② 施工
- ③ 耐久性

力学的な性能に関する問題として、高強度コンクリートの特徴を十分にふまえた性能照査方法の確立があげられる。たとえば、コンクリートの圧縮強度を増加させた場合、これを十分に生かすためには引張鋼材量の増加が想定されるが、引張鋼材量が増加した場合は、鋼材の配置が困難となるとともに、PC 部材の変形性能の低下が懸念される。前者については、その解決にあたって高強度 PC 鋼材の開発が必要になる可能性がある。また、引張強度が圧縮強度ほど増加せず脆性的な性質になるため、せん断破壊強度についても十分な注意を払う必要がある。



*1 Hiroshi WATANABE

独立行政法人土木研究所
技術推進本部 構造物マネジ
メント技術チーム



*2 Sunao KONDO

鈴木金属工業(株) 営業本部

表 - 1 最近の高強度コンクリートを活用した PC 道路橋³⁾

橋 梁 名	スパン (m)	形 式	設計基準強度 (N/mm ²)	完成年	打込み方法
青森ベイブリッジ	240	PC 斜張橋 (主塔)	60	1992	ポンプ
大芝大橋	210	PC 斜張橋	60**	1997	バケット
岡部川橋	34.4	2 径間 PC コンボ橋	60*	1998	バケット
菅野側道橋	13.9	PC 床版橋	80*	1998	バケット
天建寺橋	219	PC 斜張橋	60**	1999	ポンプ
宮川橋	19.5	PC 床版橋	80*	1999	バケット
甲塚こ道橋	22.92	PCT 桁橋	80*	1999	バケット
木曽川橋	275	PC・鋼複合橋	60**	2001	ポンプ
揖斐川橋	271.5	PC・鋼複合橋	60**	2001	ポンプ
榛名南麓 10 号橋	48	PC 連続箱桁橋	60	2001	ポンプ

注) *印はプレキャストプレテン桁 **印はプレキャストセグメント

施工に関する問題として、運搬打ち込みに適したワーカビリティを安定して確保する手法と、ポンプ圧送性の適切な評価方法を明らかにしておくことは、円滑な施工を行う上で重要になると考えられる。一般的に、高強度コンクリートではフレッシュコンクリートの粘性が大きく、図 - 1³⁾ に示すように圧送負荷が高くなる傾向にある。このため、高強度コンクリートのポンプ圧送時には、予想される圧力損失に対して、ポンプ車の吐出圧力に余裕をもたせる必要がある。ただし、ベント管やテーパ管の水平換算長さや圧送後のコンクリートのフレッシュ性状や連行空気量の変化 (図 - 2³⁾) など、十分には明らかにされていない項目もあり、今後の試験データの蓄積が待たれるところである。

また、富配合に起因する温度応力の影響、および水和熱による高温履歴がコンクリートの品質に及ぼす影響の見極めも今後の検討課題であると考えられる。高強度コンクリートでは初期材齢時のコンクリートのヤング係数変化が急激に生じるとともに、発熱による温度膨張と自己収縮ひずみが同時に発生する。このような初期材齢時のコンクリートの挙動を正確に把握し、温度ひび割れ判定精度を向上させることが、必要になるものと考えられる。

耐久性に関する問題として、高強度コンクリートの凍害と塩分浸透性について触れることとする。高強度コンクリートでは、通常の強度のコンクリートに比べて耐凍害性は優れていて、空気非連行であっても 300 サイクルの凍結融解作用に対して十分な動弾性係数を確保できる場合がある (図 - 3⁴⁾)。これは、低水セメント比にすることにより練混ぜ水のほとんどが水和反応に用いられ、凍結膨張を起こす水分がコンクリート中にあまり残らないためであると考えられる。ただし、コンクリートの水セメント比や供試体の養生条件によっても空気を連行しないコンクリートの耐凍害性は微妙に異なってくる。耐凍害性を確保するためには所定の空気量

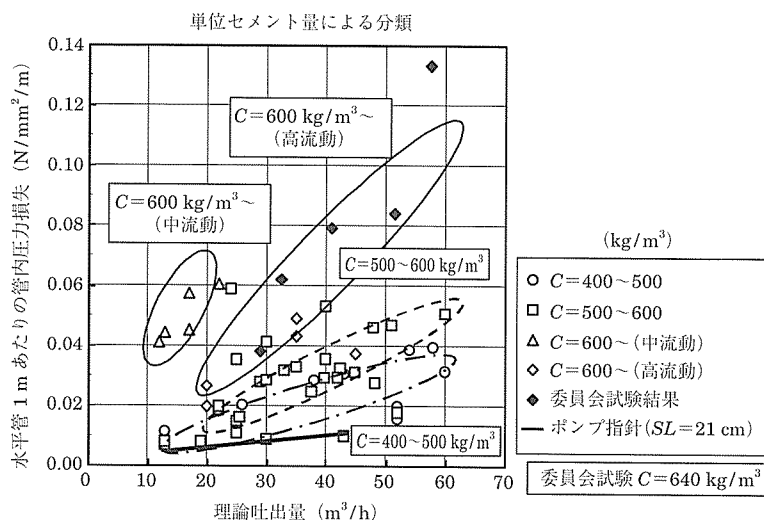


図 - 1 理論吐出量と水平圧力損失との関係³⁾

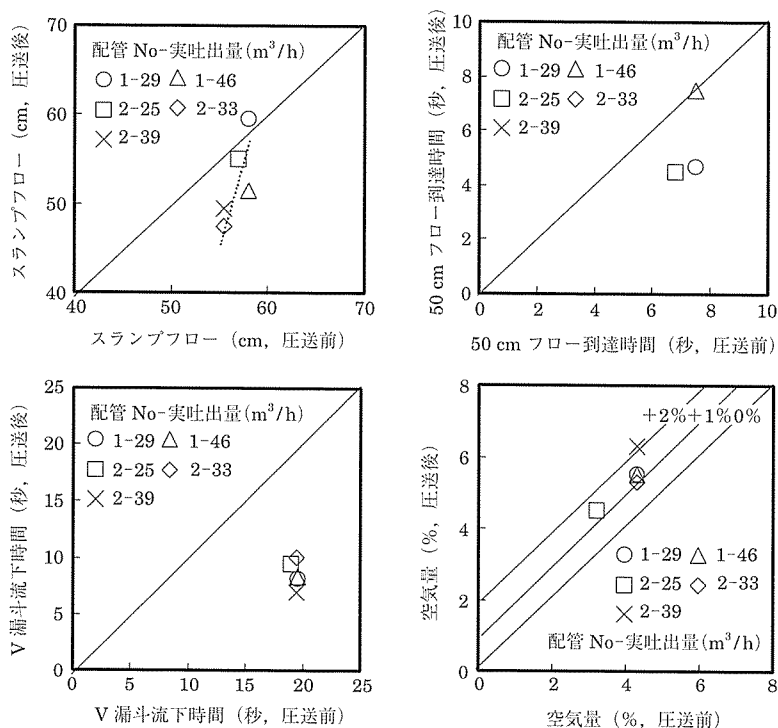


図 - 2 ポンプ圧送前後のフレッシュ性状の変化³⁾ 2

を連行することが望ましいが、必要となる圧縮強度を確保するうえでは、むしろ空気を非連行とした方が配合設計上有利となる。今後は、凍結融解試験結果と実環境での耐凍害性能の関連性についても明らかにする必要があると考えられる。

最後に、塩害に対する耐久性と深く関わりがあるコンクリートの塩分浸透性について以下に述べる。コンクリートの塩分浸透性は、一般に水セメント比が小さくなるほど、小さい値を示すようになる。また、高炉スラグ微粉末などの混和材を用いることによっても、塩分浸透性を小さくすることができる。今後の課題としては、一層のデータの蓄積により塩分浸透性の定量的な評価の精度の向上を図ることがあげられよう。また、塩分浸透性の定量化には長期間を要することから、これを短時間で求められる促進試験法の確立も必要になるものと考えられる。

2.2 軽量コンクリート

人工軽量骨材を用いたコンクリートの軽量化は、比較的古くから検討がなされていて、本誌においても過去に軽量コンクリートが取り上げられたことがある。しかし、軽量骨材は一般的に吸水量が大きいので、確実なポンプ圧送のためには、プレウエッティングが必要となり、耐久性とくに凍結融解性能を阻害する要因にもなっていた。このため、軽量コンクリートの利用はその後あまり進展しない結果となっていた。しかし、近年、軽量でかつ吸水率の小さい軽量骨材が新たに開発⁵⁾され、再び脚光を浴びることとなった。また、フライアッシュを焼成して製造するタイプの人工骨材⁶⁾も実用化の目途が立ち、副産物の有効な活用の観点から利用の拡大が期待されている。

今後、これらのコンクリートの普及を促進するためには、ポンプ圧送時のような圧力下における吸水性状や、2.1の高強度コンクリートの項でも取り上げた各種の性能についてのより正確な評価を通じて、安心して利用できる環境を整えてゆくことがあげられよう。

3. PC 鋼材

PC 鋼材については、強く錆びないことが発明当初から前提として求められており、現在も将来もこの要求に対しより改善を行なっていくことに変わりはない。

PC 鋼線は日本に PC が導入された当初 $\phi 5 \text{ mm}$ 、 $\phi 7 \text{ mm}$ の単線が主体であったが、より施工性の良い鋼より線の開発とともに、現在、ほとんどの PC 構造物に鋼より線が使用されるようになった。また鋼より線についていえば、7 本より PC 鋼より線に加え 19 本よりが開発され、太径の $\phi 28.6 \text{ mm}$ が日常的に使用されている。また、近年 PC 構造物の耐久性を高めるため、PC 鋼より線の防食技術が確立され、今後コンクリート構造物の耐久性がより求められていく中、PC 鋼材の防食技術は向上していくものと思われる。一方 PC 鋼材の強度は当初の A 種 (1720 N/mm^2) が B 種 (1860 N/mm^2) にレベルアップし、今後、コンクリートの高強度化に伴い、さらに高強度の PC 鋼材が要求されてくるものと思われる。このことから、PC 鋼材の今後の展望は PC 鋼材の防食技術の向上と太径化、高強度化がメインテー

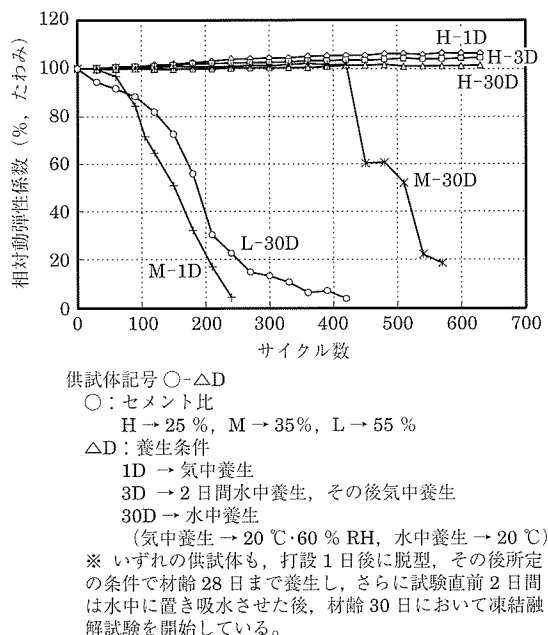


図-3 NonAE コンクリートの相対動弾性係数の経時変化⁴⁾

マとなる。

3.1 PC 鋼材の防食

PC 鋼材の防食として当初アンボンド PC 鋼材が建築を中心に使われていたが、斜張橋の設計施工が行われるようになり、ステイケーブルの防食技術が必要になってきた。一方、1980 年代になり塩害による PC 構造物の損傷問題が表面化し、鉄筋を含め PC 鋼材の防食に対する関心がさらに高まった。それに平行して、1980 年代後半に塩害対策として錆びない連続繊維補強材 (FRP 緊張材) の開発が進められた。1990 年代半ばより、日本道路公団の第二東名を中心に外ケーブルの使用が盛んとなり、エポキシ樹脂被覆 PC 鋼材が多量に用いられている。その間、グラウトの信頼性向上のため、セメントグラウト作業が不要のプレグラウトタイプの防食 PC 鋼材が開発され、今後も広く使用されるものと思われる。

以下に PC 鋼材の防食に関する現状を記す。

(1) 被覆 PC 鋼材

現在一般に用いられている被覆 PC 鋼材はエポキシ樹脂被覆、ポリエチレン系樹脂被覆、プレグラウトタイプ、アンボンド等で、さらに防食性能を高めた二重防錆被覆 PC 鋼材も開発されている。

① エポキシ樹脂被覆 PC 鋼材

エポキシ樹脂被覆 PC 鋼材はこれまで外ケーブル、グラウンドアンカー、ステイケーブル他、防食材として広く実績を重ねており、現在 JIS 化が進められている。現在用いられているものは、PC 鋼より線 7 本より線をほどこいて素線にエポキシ樹脂静電塗装を行い、再度より合わせる製法を行っている。PC 鋼より線の種類は主として $\phi 12.7 \text{ mm}$ と $\phi 15.2 \text{ mm}$ が用いられている。また、グラウンドアンカーのようにグラウト (またはコンクリート) との付着性を必要とする付着タイプと外ケーブルのように付着を必要としないタイプの 2 種

類がある。

② ポリエチレン系樹脂被覆 PC 鋼材

ポリエチレン系樹脂被覆 PC 鋼材の標準型は熱可塑性樹脂を用いる。製法は PC 鋼より線内部に熱で液状になったポリエチレン系樹脂を圧入充填する手法が用いられている。主な特徴としては、紫外線劣化等の耐候性に優れ、伸びが大きく、ピンホールがないことがあげられる。形状としては標準型、丸味型、線材巻型の 3 種類あり、それぞれ内ケーブル、外ケーブル、プレテンションへ適用されており、その容量も $\phi 9.3 \text{ mm}$ ~ $\phi 28.6 \text{ mm}$ の 7 本よりおよび 19 本より各種があり種類が多い。また、ポリエチレン系樹脂の表面にポリエステル系樹脂を被覆した硬質型があり、施工により傷が付きにくいので、今後硬質型が主流になるものと思われる。

実績としては斜張橋のステイケーブル、外ケーブル、グラウンドアンカー、建築部材他に使用されている。

③ プレグラウト PC 鋼材 (写真 - 1)

プレグラウト PC 鋼材は 1980 年代の終わりに開発され、現在は場所打ち PC 箱桁橋などの床版横締めによく使われている。PC 鋼材に未硬化のエポキシ樹脂を塗布し、その外側を竹ふし状のポリエチレンで被覆したもので、PC 鋼材を配置後コンクリートを打込み、コンクリート硬化後緊張して完了する。時間経過とともに未硬化のエポキシ樹脂が硬化し、コンクリートと一体化する。PC 鋼材の挿入、グラウト工の作業がなく、現場の省力化と確実な PC 鋼材の防錆を兼ね備えている。周囲の温度で硬化する常温硬化型と、わずかな水分で硬化する湿気硬化型がある。桁端横桁のようなコンクリート厚が厚い部材では、コンクリートの硬化熱が 90°C 以上になる場合もあるので、それにも対応できる湿気硬化型が主流となってきた。

(2) 防錆・耐食性 PC 鋼材

被覆防食 PC 鋼材以外でも、積極的に PC 鋼材自身を錆から守るめっき PC 鋼材、ステンレス PC 鋼材、合金チタン PC 鋼材の実績が過去にある。また PC 鋼材ではないが、錆びない PC 緊張材として連続繊維補強材がある。めっき PC

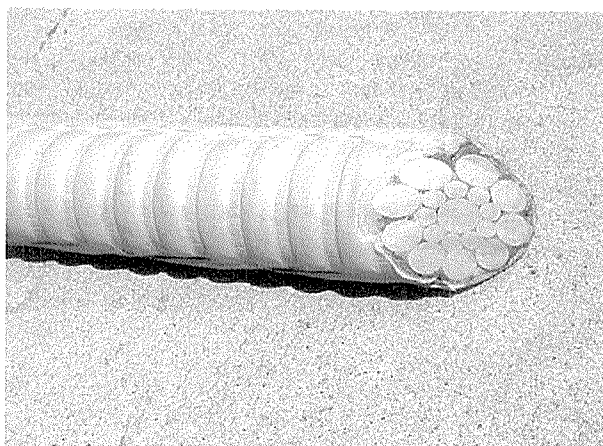


写真 - 1 プレグラウト PC 鋼材

鋼材には亜鉛めっきとアルミ亜鉛めっきがあり、外ケーブルを中心に現在用いられている。

開発されたステンレス PC 鋼材は非磁性も有しているの、その目的からリニアモーター山梨実験線の軌道ビームに、耐食性から原子力発電所の吊りケーブルに採用されているが、高コストであるので特殊用途に限られている。ステンレス PC 鋼材は、被覆防食 PC 鋼材や連続繊維補強材のように傷が付かないように施工で気を配る必要はなく、また連続繊維補強材のように定着具に工夫する必要もない。通常用いられている SUS304 で PC 鋼材を造ると、高強度にはなるが靱性が低下し、磁性も示す。ステンレス PC 鋼材に適用された鋼種の化学成分と機械的性質を表 - 2 に示す。ステンレス PC 鋼材は、靱性の低下は少なく非磁性を保持する。また、PC 鋼より線の A 種と B 種の間レベルの機械的性質と SUS304 と同等以上の耐食性を示すのが特徴である。

チタンは軽く (比重 4.5)、亜硫酸ガス、アルカリに強く、優れた耐食性を有することが知られている。チタンには純チタンとチタン合金があり、PC 鋼材の適用にはチタン合金が用いられ、その合金成分は Al, V, Cr である。伸線加工により加工硬化し、その後時効処理ができれば、さらに高強度が得られる。高耐海水特性から、沖の鳥島護岸工事の防護蓋に採用された。コスト的にかかなり高いが、海洋構造物等の PC 鋼材としての使用が考えられる。

連続繊維補強材の主な種類としては、炭素繊維、アラミド繊維、ガラス繊維があげられる。ガラス繊維は材料が安く開発当初期待されていたが、コンクリート中の耐久性に不安があり、また、効率の良い定着具ができないため、現在は残りの炭素とアラミド緊張材が使われている。将来は非金属定着具の開発、確立が期待される。また、PC 鋼材と異なり降伏点がないため、使用する際にはそのことに配慮しなければならない。この他、連続繊維補強材は非磁性のものも多く、磁性を嫌う構造物の使用にも適している。

3.2 PC 鋼材の高強度化

コンクリート技術、とくに混和材開発の進歩に伴い、近年 100 N/mm^2 以上の超高強度コンクリートの製造が可能となった。コンクリート強度の高強度化に伴い、PC 鋼材の高強度化の要請が高まっている。とくに橋梁では、高強度コンクリートの特性を生かすため桁高をより低くした場合などに有効である。これは、桁高を低くすると、引張り側に配置される鋼材量が増え、コンクリート断面に限界があるため配置ができなくなる場合があることに起因する。PC 鋼より線の高強度化についていえば、1960 年に A 種 (引張強度 1720 N/mm^2) が JIS 化され、その後、米国を中心に高強度化の開発が行われ、1971 年には B 種 (引張強度 1860 N/mm^2) が JIS 化された。1990 年代に入りさらに高強度化の開発が進み、現在では引張強度が 7 本より PC 鋼より線で 2300 N/mm^2 ⁷⁾、19 本より PC 鋼より線で 2200 N/mm^2 のものまで開発されている。19 本より高強度 PC 鋼より線の荷重-伸び曲線例を図 - 4 に示す。

高強度 PC 鋼材は、炭素量 C を増した過共折鋼線材 (C 85%以上) を用い、JIS 鋼材よりも Si を増し、Mn を減らし

表 - 2 ステンレス PC 鋼材の化学成分と機械的性質

鋼種	化 学 成 分 (%)								径 (mm)	降伏耐力 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び (%)
	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	N				
ステンレス PC 鋼材	0.08	0.51	9.17	0.024	0.001	5.46	17.62	0.275	5.014	1 471	1 778	3.5
SUS 304	0.07	0.40	1.26	0.025	0.005	8.45	18.35	—	5.013	1 176	1 422	5.0
JIS A 種	0.77	0.23	0.75	0.020	0.007	—	—	—	5.013	1 603	1 770	7.0

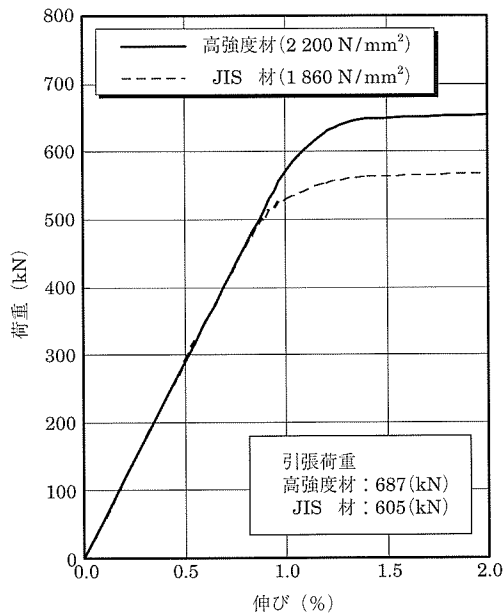


図 - 4 19本よりφ21.8 mmの荷重—伸び曲線

て高強度化したものである。

3.3 PC 鋼棒工法

これまでPC鋼より線を中心に述べたが、PC鋼棒についての特殊な工法「圧縮PC鋼棒」と「中空PC鋼棒」について述べる。

PC鋼棒の特性を生かした圧縮PC鋼棒は、通常のPC鋼材の使い方とは逆にPC鋼棒を圧縮定着することにより、コンクリートに引張応力を与えることができる。このため、桁高制限を受ける設計で桁の圧縮応力が許容応力を超える場合、圧縮応力の一部をこの引張応力で打ち消すことにより、許容値以内にすることができ、これまでできなかった許容値以上の範囲を設計可能にした。今後PC部材の引張側における高強度PC鋼材の開発との関係もあるが、圧縮側については、究極的には高強度コンクリートとの併用も考えられ、より設計範囲を広げることができる。

中空PC鋼棒は鋼棒の中空内部に別の圧縮PC鋼材を挿入し、この圧縮鋼材を圧縮し、ナットを介して中空鋼棒に定着し、その反力により中空鋼棒に引張力を与えることができる。現場で中空PC鋼棒を配置後コンクリートを打込み、所定の強度に達した時、定着ナットを開放して内部の圧縮PC鋼棒を緩めることにより、中空PC鋼棒の引張り応力が付着力によりコンクリートに伝わり、プレストレスをコン

クリートに導入することができる。簡単にいえば、反力台(アバット)のような大掛かりな工場設備がなくても、現場で簡単にプレテンション部材を製作することができる。現在は短いものが用いられているが、将来は長い部材への適用方向にいくものと思われる。

4. まとめ

以上、近年のPC用の新たな材料技術に関する現状と、その展望について概略を述べた。その詳細については、本号の各論で述べられることと思う。環境負荷の低減については触れることができなかった。これについては、文献8)が参考になろう。また、数年前プレストレスコンクリートの発展に関するシンポジウムが開催された淡路島の夢舞台の建設にあたって、環境面での検討結果⁹⁾も参考となろう。

なお、本原稿を取りまとめるにあたり、(株)安部工業所の葛西康幸氏の協力を得た。紙面を借りて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) (社)プレストレスコンクリート技術協会：プレストレスコンクリートの歩みと21世紀の展望—第29回PC技術講習会—, 2001.2
- 2) 國府勝郎, 澤公夫：最新コンクリート技術選書8 膨張コンクリート・高強度コンクリート, 山海堂, 1987.12
- 3) 国土交通省土木研究所, (社)プレストレス・コンクリート建設業協会：現場打ち高強度コンクリート部材の設計施工法の開発に関する共同研究報告書—現場打ち高強度コンクリート施工マニュアル(案)—, 共同研究報告書第266号, 2001.3
- 4) 国土交通省土木研究所, (社)プレストレス・コンクリート建設業協会：現場打ち高強度コンクリート部材の設計施工法に関する共同研究報告書—高強度コンクリートの凍結融解抵抗性—, 共同研究報告書第271号, 2001.3
- 5) 岡本享久, 石川雄康, 榎木 隆, 笹嶋昌男：高性能軽量コンクリート, コンクリート工学, Vol.37, No.4, pp.12-18, 1999.4
- 6) (社)土木学会：高強度フライアッシュ人工骨材を用いたコンクリートの設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー106, 2001.7
- 7) 落合征雄, 小森英樹, 萩原昌明, 市原哲也：330 K(2 300 N/mm²)級PC鋼より線の開発, プレストレスコンクリート, Vol.39, No.1, pp.79-82, 1997.1
- 8) (社)土木学会：環境負荷低減型土木構造物設計ガイドライン, 2001.4
- 9) <http://www.hyogo-iic.ne.jp/policy/inoue.htm>

【2003年2月21日受付】