

## 技術会議報告 T4 プレストレストコンクリート構造における アンボンドおよび外ケーブルプレストレス技術の適用

小林 和夫\*<sup>1</sup>・大野 義照\*<sup>2</sup>

### 1. まえがき

アンボンド PC 工法 (Unbonded Prestressing Technique) は、現場での PC 鋼材の配置が容易なこと、グラウト注入を必要としないこと、また被覆材料を含めた緊張材の占有空間の減少によってコンクリートの充填・締固めが容易となることなど、施工の省力化や合理化を図るうえで多くの利点を有している。また、必要に応じて再緊張を実施することができ、しかも PC 鋼材定着部を適切に処理すれば、信頼性の高い耐久力を確保することが可能である。

一方において、最近ケーブル防錆技術の向上と太径ケーブルの開発にともなって、アンボンド工法の一つの応用形態とみなすことができる外ケーブル工法 (External Prestressing Technique) が非常に注目されている。これは、構造物の断面外に tendon を配置してプレストレスを導入する方法であるため、新設構造物だけではなく、既存コンクリート構造物の補修・補強工法の一つとしても非常に有用であるとされている。

ここでは、外ケーブル方式をも含めたアンボンドプレストレス技術に関する FIP シンポジウムの発表論文の内容を概観し、併せてこれらの最近の基礎・応用研究と実構造物への適用の現状について述べることにする。

### 2. セッション概要

アンボンド PC および外ケーブル方式 PC に関して、セッション T 4 : Acceptance and Application of Unbonded and External Prestressing Techniques in Prestressed Concrete Structures では合計 17 件の論文が発表された。

以下に、アンボンド PC と外ケーブル方式 PC に分けて、各々の全体を概要することとする。

#### 2.1 アンボンド PC

アンボンド PC に関する発表は、英国 2 件、日本、ブラジルおよびポーランド各 1 件の計 5 件である。いずれも建築の分野のものであり、5 件のうち 3 件はスラブを対象としている。

論文 “Punching strength of prestressed slabs with bonded and unbonded cables” (T 4 (a)-3) では、フラットスラブの押抜きせん断耐力解析のための理論的モデルが提案されている。論文 “Field measurement and experimental study on structural behavior of PPC flat slab with unbonded tendons (T 4 (a)-4) では、アンボンド PPC フラットスラブの実構造物における載荷試験と振動試験ならびに縮尺 2/3 のモデル試験体の載荷試験を行い、設計法の妥当性を確認している。論文 “Vibration criteria for unbonded prestressed concrete floors (T 4 (a)-5) では、アンボンド PC 床の振動特性に関して現場測定が実施され、床の性能は種々の規格許容値と比較された結果、規定値に問題があることが指摘されている。論文 “Systems of unbonded cables in temporary prestressing of buildings” (T 4 (a)-6) では、施工時等に生じる短期間の外力に対して、アンボンドによるプレストレス力が有効であることを実例に基づいて紹介している。論文 “Demolition and alteration of structures containing unbonded tendons” (PT 4-1) では、建物の解体や改造に際し、アンボンド緊張材が切断されても、緊張材周囲のグリースの高い粘性によって、緊張材の飛出し



\*<sup>1</sup> Kazuo KOBAYASHI  
大阪工業大学  
工学部土木工学科  
教授



\*<sup>2</sup> Yoshiteru OHNO  
大阪大学  
工学部建築工学科  
助教授

は許容範囲におさまることを実験ならびに解析で示している。

アンボンド PC に限った問題ではないが、このセッションでは、その他の論文として2件、ドイツと日本からプレストレスの時間依存性の損失に関する解析的研究の報告があった。論文“The effect of steel relaxation on stresses and stress resultants” (T 4 (b)-5) は、PC 鋼材のリラクセーションを考慮したクリープと乾燥収縮によるプレストレスの損失を解析したものである。また、論文“A creep analysis method of prestressed concrete members to take account of the effects of creep recovery and strain restraining due to reinforcements and its applications” (T 4 (b)-6) は、コンクリートの回復クリープひずみと普通鉄筋の存在を考慮してプレストレスの損失を解析したものである。

## 2.2 外ケーブル PC

外ケーブル方式の PC に関して、本セッションでは合計 10 件の論文が発表された。それらは、①主に終局曲げ耐力の解析に関する基礎的な研究、②新設橋梁への適用事例、さらに③既設コンクリート橋梁の損傷に対する補修・補強への利用に分類される。

国別では、日本 4 件、英国、スイス、中国、ドイツ、フランス、ポルトガルが各 1 件となっている。

①については、論文“Ultimate strength of externally prestressed concrete structures” (T 4 (b)-2) では、非緊張鉄筋量、外ケーブルの配置形状、載荷方法（曲げモーメント分布形状）を要因に選定した 10 体の T 形断面単純梁試験体に対して載荷試験を実施し、たわみや曲率、緊張材応力、終局耐力などを測定し考察するとともに、その結果から降伏時と終局時の曲率分布を適切に与え、梁の全体変形を考慮して算定した計算値は終局状態における上記諸試験値とかなりよく合致することを示している。論文“Ultimate strength of PPC beams with exterior cables” (T 4 (b)-3) では、非緊張鉄筋比、緊張材比、プレストレス力、スパン長 / 断面高比を変化させたパーシャル PC 梁部材の曲げひび割れ、降伏および最大の各耐力の測定値は、非線形 FEM による解析値とよく一致することを示している。また、論文“Research of the external prestressing method for the three span continuous road bridge” (PT 4-3) では、首都高速湾岸線に架設される 3 径間連続道路橋に外ケーブル工法を適用するにあたって、三次元 FEM 法によるケーブル定着部等の諸応力解析、終局状態における外ケーブル応力の評価などの設計上の重要問題に関して検討を行うとともに、併せてエポキシ樹脂被覆ストランドに対する定着システムやデビエータ部でのテンドン

の疲労試験が実施され、それぞれ安全であることが確認されている。

②については、論文“External prestressing in bridges” (T 4 (a)-1) では、橋梁に外ケーブル方式を適用した場合の設計・架設上の注意点、外ケーブルの防錆法、設計規準（使用・終局限界状態）のあり方などを、フランスを中心とした多くの適用事例に基づいて総括している。論文“External prestressing” (T 4 (a)-2) では、橋梁を対象とし、外ケーブルの種類とその代表的な定着法、ドイツにおける適用事例と経済性の問題などを総括している。また、論文“External prestressing for bridges, building and other structures in practice” (T 4 (b)-1) では、最近外ケーブル方式の採用が増加している理由、その構造安全性を確保するための注意点、外ケーブルのタイプ・防錆法、スイスとドイツにおける新設構造物および既設構造物の補修・補強への適用例を示すとともに、内ケーブルと外ケーブルの混合方式や鋼・コンクリート合成構造への外ケーブルの適用など今後の発展が期待される課題が提示されている。論文“External prestress in the New Oporto Railway Bridge” (T 4 (a)-7) では、1991 年ポルトガルで架設された  $\pi$  形の多径間（全長約 1 030 m）橋で、中央スパン 250 m の鉄道橋への外ケーブルの適用例が紹介されている。なお、この橋梁では、箱形断面ウェブのひび割れ発生を防止するため、アンボンドのモノストランドによって鉛直方向プレストレスが導入されている。さらに、論文“Bangkok Second Stage Expressway—The use of external tendons and dry joints with precast segmental construction” (T 4 (b)-7) は、バンコクにおける高速道路高架橋の建設にあたっての適用例を紹介したもので、ショートライン・マッチキャスト方式と外ケーブルとを組み合わせたプレキャスト分割工法が採用されている。この場合、セグメント間の接合はシアーキーと外ケーブルによるドライジョイントであり、上床版表面にエポキシグラウトシールを施すことによってジョイント部からの水分侵入を防止するように配慮されている。

なお、論文“The design of an extradosed prestressed concrete bridge—The Odawara Port Bridge—” (PT 4-2) では、世界初のエクストラドーズド PC 橋である小田原港橋の設計において考慮された重要な諸点と建設に際して採用されたいくつかの新技術について述べたものである。このタイプの橋梁は、外見は斜張橋のようであるが、その構造的特性はむしろ通常の桁橋に非常に類似しており、通常の PC 箱桁橋では長すぎ、PC 斜張橋では短すぎるようなスパン 150 m 程度の場合には経済的で非常に有効であると述べている。

また、③については、論文“Retrofit of damaged PC beams by external prestressing cables”(T 4 (b)-4)では、損傷したPC桁の補修・補強への外ケーブル方式の適用を目的とし、PC鋼材、CFRP、AFRPの3種類の緊張材を外ケーブルに用い、内ケーブルの腐食破断により耐荷力が低下した損傷モデル桁を補強した場合の効果を載荷試験で検証した結果が示されている。

### 3. 現状と今後の動向

FIP シンポジウムの論文発表・討議を通して示された最近の課題やトピックスを含め、アンボンドPCおよび外ケーブル方式PCの基礎・応用研究と実構造物への適用に関する現状と今後の動向について述べてみたい。

#### 3.1 アンボンドPC

アンボンドPCシステムは、1960年代に、USAとカナダにおいて使用され始め、その後世界各国で建築物の床や屋根スラブを中心に広く用いられている。このシステムは緊張材長さが50mを超えるような多スパンあるいは連続スラブに最も広く用いられている。我が国においても、建築学会から1986年にPPCの指針が発刊されたのを契機に、建築構造の分野においてアンボンドのPC技術が普及しつつある。一方、土木学会では後記のように、1978年制定のPC示方書からアンボンドPCが本格的に取り上げられるようになった<sup>1)</sup>。

本シンポジウムでは、アンボンドPCはいずれも建築分野を対象としたものであったので、発表論文との関連に基づいて、まず建築構造について述べることにする。

アンボンドシステムを利用した例としてアンボンドフラットスラブ構造があるが、論文T 4 (a)-4ではその構造の利点として以下の点を挙げている。

建物の階高を低くし、建設コストを低減できる。梁がないので天井空間を空調設備配管に有効に利用できる。柱間隔を広く、広い空間が得られる。ひび割れやたわみが制御されるので高品質の建物を提供できる。また、集合住宅においては小梁をなくし、高性能の空間を得るために床スラブにアンボンドシステムが用いられている。

アンボンドシステムの使用例が増えるにつれ、床スラブの解体あるいは改造等で、アンボンド緊張材を切断するような場合も生じてくる。その場合、付着がないために、ひずみエネルギーの急激な解放によって、定着端における緊張材の飛出しが心配される。

アンボンドシステムの使用実績の多い欧米では、この点に関してかなりの調査研究がなされている。論文PT 4-1では、実験室における試験と解析によって緊張材破断時の定着部からの緊張材の飛出しについて調べている。実験はコンクリート中に埋め込まれた緊張材の一端を切り離し、定着端での緊張材の動きを測定すること

によって行われた。実験要因として、軸力：引張強度の40～75%、緊張材径：12.5mmと15.2mm、緊張材長さ：4.8mと7.8m、緊張材の配置：直線と曲線、定着端部条件：モルタルでカバーされ拘束のあるものとないもの、などが選定された。実験結果は、緊張力が60kN以下では緊張材の移動は少なく、それ以上の緊張力では緊張力の増大にともなって、ほぼ線形に増大し、緊張力が引張強度の70～80%の間で最大値120mmとなった。破断時の緊張材の飛出しに対する拘束は、グリース充填プラスチックシース内で生じるダンピング作用と緊張材の摩擦による。これは周囲のコンクリートの拘束と緊張材の断面積増加によるくさび効果による。アンカーモルタルの拘束効果は小さく、また緊張材の曲がりの影響はない。

これらの実験結果を基に、解析モデルを作成し、緊張材長さ、直径、応力レベルの影響が調べられた。その結果、飛出し量が最大となる緊張材長さは緊張応力によって異なる。飛出し量は全般に小さく、飛出しが生じない長さが存在することが示された。これらの結果は、現場での調査結果とよく一致した。結論として、以下のように述べている。アンボンド緊張材の配置された建物も安全に解体、改造ができる。ただし、緊張材の切断の前に、緊張材の腐食状況、グリースの品質の評価、かぶり厚さのチェック、飛び出した緊張材や定着部の破片が飛び散るのを防ぐ手立てを設ける必要がある。

アンボンドプレストレスの技術は通常の荷重に対してだけでなく、施工中あるいは荷重条件の変更による補強に対しても有効であり、論文T 4 (a)-6では炭坑地帯において当該建物の地下が掘削される建物のアンボンド工法による補強工事が報告されている。

USAとオーストラリアにおいて1955年から広く使用されたポストテンションコンクリートスラブは、いまや世界中で広範囲に用いられるようになった。RC構造より、経済的であるとして、フラットスラブ、リブ付きスラブ、ワッフルスラブ、梁付きの一方方向スラブ等、通常のすべてのタイプのスラブに用いられている。テンドンにはボンドとアンボンドの両方が使用されている。

ポストテンションPCを用いることの多くの利点のうち最も重要なのは、同じスパンのRC構造のスラブよりスラブ厚さを減少することができることである。この薄いスラブは材料を節約し、柱と基礎の大きさを減じ、建物の高さを同じとすれば、より多くの階を設けることができる。換言すれば、同じスラブ厚さであればより長いスパンが可能となり、自由度の大きい空間を生み出すことが可能となる。そのような大スパンのPCスラブの利用が増えると、合成構造やRC構造と同様な床振動の問題がでてくる。この種のスラブが広く受け入れられ

るためには、この問題が解決されなければならない。

一般に床振動の問題は世界で用いられている主なコードにおいてうまくカバーされていない。スパン/厚さ比の制限によって、たわみと同様に振動もフルサービス荷重下において適切にコントロールできるという絶対的な仮定がある。しかし、これは一般的ではない。一般にまれにしか直接に建物の振動について述べられていない。ISO, イギリス (BS 6472), ドイツ (DIN 4150), カナダ (CAN 3-S 16, 1-M 89), USA (ANSI S 3.29) 等の非常に少ないコードにおいてのみ建物の振動について明確に記述されている。論文 T 4 (a)-5 では、各規準における床振動に対する許容値を比較し、ついで、実際のスラブの振動特性を調べ、床の性能を評価している。アンボンドポストテンションの3つのスラブを含み、5つのタイプの異なる床スラブを対象として振動試験が行われた。床の振動性能を評価するためにハンマー試験を主に、歩行、走行および跳躍試験が行われた。その試験結果を、世界の各規準における許容基準によって評価したところ、その評価結果は一致せず、さらに研究が必要であると述べられている。

振動吸収性能は各々の床によって異なっており、また床の振動性能を高めるためにポストテンションスラブにダンピングを導入することを研究すべきであるとも述べている。人間の振動に対する感覚は、その使用状態、建物の使われ方、振動の源によって異なる。

論文 T 4 (a)-4 においても振動試験がなされ、一次振動数や減衰定数は同じ床面積の通常のものと同等以上となり、アンボンド PPC フラットスラブは良好な振動特性を有していると評価されているが、我が国でも床の振動特性に対する評価基準を設ける必要がある。

この FIP シンポジウムで発表されたアンボンド PC の研究成果は、いずれも建築分野への適用を対象としたものであるが、以下に我が国での土木分野におけるアンボンド PC の現状について簡単に述べることにする。

我が国の土木学会では、1978 年制定の「プレストレストコンクリート標準示方書」において、アンボンド PC が本格的に取り上げられた。さらに、限界状態設計法を基本とした 1986 年制定の「コンクリート標準示方書——設計篇——」においては、具体的な計算方法は示されていないものの、曲げひび割れ幅限界の検討を要する PC 部材 (PPC 部材) へのアンボンド PC の適用についても触れられている。

アンボンド PC の土木構造物への利用は、試行的になされてきたのが現状であり、主ケーブルとしての適用はないものの、その使用範囲はかなり広い。

橋梁関係では、PC 桁の横締めや鉛直締めで使用されている。その実施例としては、1965 年に東海道本線・

瀬田川橋梁において斜引張力を受けもたせるのにアンボンド PC 鋼棒が使用された。また、東海道本線・野州川橋梁では、PC 下路桁の横締め用にボンド鋼材と併用してアンボンド PC 鋼より線が用いられた。東北新幹線・第二阿武隈川橋梁その他においても、一部にアンボンド PC 工法が採用されている。

コンクリートブロックの圧着接合工法にアンボンド PC 鋼材を用いると、施工上から非常に都合のよい場合がある。一例として、海底地質調査後に海上部分を撤去する必要があった海底地質調査杭用ケーソンのブロック接合に、この方法が応用された。

PC 圧力容器や原子炉格納容器に、アンボンドタイプの大容量テンドンが使用されている。これらとは別に、一般に PC タンクのように壁厚の薄い円形構造物に対しては、角度変化による摩擦係数が小さく、しかもアンボンド鋼材を採用するとシース径が小さくなるため、コンクリートの締固めが容易となるといった利点もある。

PC まくらぎや PC 矢板などの工場製品にもアンボンド技術が適用されてきた。その他、アースアンカーやロックアンカーなどにもアンボンド PC 鋼材が採用されている。

なお、本セッションの一部では、アンボンドや外ケーブル技術とは直接的に関係するものではないが、PC 構造全般に関連する非常に重要なプレストレスの経時減少の問題が取り上げられた。

コンクリートのクリープ、乾燥収縮および PC 鋼材のリラクゼーションによるプレストレスの損失はプレストレス技術の根本に関わる重要な問題であり、従来より多くの解析法が提案されてきた。一方、コンクリートのクリープに関する研究が進み、その特性がより詳細に把握されるようになってきた。その結果を基にクリープ回復を考慮し、また PC 鋼材のリラクゼーションの時間的挙動を考慮した解析法がいくつか提案されている。

論文 T 4 (b)-5, T 4 (b)-6 はそのような研究の一部である。PPC の普及にともなって、緊張材のほかにかなり多量の普通鉄筋が配置されるようになってきた。そのような部材においては、論文 T 4 (b)-6 で指摘されているように、緊張材の引張力の損失は少なくなるが、コンクリートに作用している圧縮力が普通鉄筋に移行することによって、純コンクリート断面に作用するプレストレス力は小さくなることに留意する必要がある。

### 3.2 外ケーブル PC

最近、特に橋梁関係で外ケーブルを用いた PC 橋が目されているが、外ケーブル方式の歴史は内ケーブル (Inner Cable) 方式より古く、1920 年代から 1950 年代にかけてヨーロッパを中心に積極的に採用された。しかし、当時は PC 鋼材の腐食を防錆する技術が十分ではな

く、その補修にかなりコストがかかったため、その後はほとんど用いられなくなった。そして、1970年代にPC橋の補強に外ケーブル工法が採用され始めたのを契機に、防護技術も非常に発展した<sup>1)</sup>。

1980年代に、J. Muller (仏) による米国フロリダのKey 諸橋が外ケーブル方式によって架設され、その後急速な発展を遂げている。特に、フランスではSETRA (フランス建設省高速道路局) の開発指導により、計画橋梁の半数は外ケーブル方式、あるいは内ケーブル方式との併用による混合方式となっている。フランスの外ケーブルに関する理論体系は、ANNALES de ITBTP, Decembre 1983 “La Precontrainte Exterieur” にまとめられており、現在はブロック工法による連続桁、押出し工法、片持ち梁施工の連続ケーブル、さらに斜張橋などに広く用いられている<sup>2)</sup>。

我が国においては、1985年に東北新幹線・笹目川橋梁に内ケーブルと外ケーブルとの混合方式が採用されて以来、福塩線・芦田川橋梁、宿毛線・四万十川橋梁などに用いられている。また、このような永久的な利用法のほかに、ワーゲン張出し架設時の過大な曲げモーメントに対処するために外ケーブルを用い、反力調整後にそれを撤去するというような一時的な利用法 (例えば、筒石川橋梁) もある。

PC施工の省力化、高品質化や耐久性能の向上を目的とし、プレキャストセグメント (プレキャストブロック) 工法が大規模工事に適用されるようになってきた。このため、プレキャスト部材を有効に活用するための工法やシステムの開発も検討されている。その一つに、プレキャストセグメント工法に外ケーブルを適用して施工の一層の合理化を図るという試みがあり、適用事例もかなりある。上記タイのバンコク高速道路架橋に関する論文 T 4 (b)-7 は、大規模工事に適用された最近の代表的事例であり、今後の新しいPC技術開発の一つの大きな方向を示唆する資料として興味深い。プレキャストセグメント工法と外ケーブル工法を併用したその他の事例として、フランスのRe 島橋, Chevre 橋, Glacieres Sylans 橋などがある<sup>3)</sup>。

現在の外ケーブル方式の急速な発展は、ケーブル防錆技術の向上ならびに太径ケーブルの開発によるところが大きい。外ケーブルの使用にあたって特に重要となる防錆方法には、従来はPC鋼材の緊張後にセメントグラウトが注入されたが、最近では亜鉛メッキまたはポリエチレンコーティングなどのPC鋼材を用いてグラウトなしで使用する方法や、黒色ポリエチレンパイプを用いてグリースを注入する方法などもある。

外ケーブル方式が最近特に発展してきたのは、このようなケーブル材料の進歩・開発に加えて、次のような利

点があるためである。

- 1) 断面の外にケーブルが配置されるので、ウェブ厚の減少により経済設計が可能であり、またコンクリートの打設が容易で充填性も良好となる。
- 2) ケーブルの取替えや再緊張が可能であり、維持管理しやすい。
- 3) ケーブル配置が簡単で、施工期間を短縮できる。
- 4) ケーブルがデビエータ部でしか接触しないので、PC鋼材とシースとの摩擦によるプレストレスの損失が軽減される。

外ケーブル方式は、構造物の断面外にPC鋼材を配置してプレストレスを導入する方法であり、また他の工法に比べて施工が簡単で確実な効果が期待できるため、劣化損傷したコンクリート構造物の補修・補強工法の一つとしても非常に有用である。

論文 T 4 (b)-1 では、スイスとドイツにおけるこのような補修・補強の事例が紹介されている。また、論文 T 4 (b)-4 では、損傷PC桁の補修・補強への外ケーブル方式の適用性が、モデル桁の載荷試験とその解析結果に基づいて検討されている。この場合には、外ケーブルとしてPC鋼材のほかに、腐食の心配がないCFRPとAFRPも取り上げられている点が注目される。なお、外ケーブルとして、このような新素材緊張材の活用については、論文 T 4 (a)-2 でも実構造物への適用が検討中であると述べられている。

橋梁の補修・補強工法としての外ケーブル方式の適用については、我が国では従来次のような例がある。

- 1) 美陵高架橋：3径間連続PC有ヒンジT形ラーメン橋の中央ヒンジ沓摺動部の摩擦と中央径間のたわみ増大に対する対策として、沓の取替え、オーバーレイによる縦断勾配の修正がなされたが、その死荷重増加に対して外ケーブルによってプレストレスが導入された。
- 2) 首都高速道路橋：2径間連続橋のコンクリート打継部の曲げひび割れの補強対策として、外ケーブル方式でプレストレスが導入された。
- 3) 京橋橋：5径間連続有ヒンジPCラーメン橋で上記の1)と同様な問題に対して外ケーブル方式が適用された。
- 4) 青梅大橋：3径間連続有ヒンジラーメン橋でクレーン船の衝突による主桁腹部の損傷に対し、鋼板接着した後、外ケーブルでプレストレスが導入された。

一方、建築分野では、現段階では外ケーブルの補修・補強工事への適用事例に関する報告は非常に少ない。これは、外ケーブルを用いる場合には耐火上の問題を解決しなければならないことに原因している。しかし、プレ

ストレスの導入によって曲げ耐力やせん断耐力の大幅な増大、たわみや振動性状の改善などが可能となるため、今後は外ケーブルを利用した補修・補強工法はかなり発展するものと思われる。建築物では、配筋の施工不良やコンクリートの強度不足によってスラブに有害なひび割れやたわみが発生し、また用途変更にもなう積載荷重の増加に対処するため、外ケーブルで補強がなされたというような実施例がある。

外ケーブル方式は、種々の利点を有するため最近急速に発展しているが、今後さらに明確にしなければならぬ問題点として、次のようなものが挙げられる。

- 1) ケーブルの支持間隔が長くなると、構造体と共振を起こす可能性があり、その検討が必要である。
- 2) ケーブルの引張力が直接定着部に伝達され応力が集中するため、応力分散を図るか、適切な配筋による補強を講じる必要がある。論文 PT 4-3 では、外ケーブル定着部領域の応力解析とその補強法が検討されている。また、論文 T 4 (a)-2 では、外ケーブルの定着法に関する具体例が紹介されている。
- 3) ケーブルが屈曲するデビエータ部においてケーブルの疲労強度が低下する可能性があるが、現行の諸規準には具体的な規定がない。論文 PT 4-3 では、デビエータ部でのケーブルの疲労強度実験がなされ、実構造体に適用する際のケーブルそのものの疲労安全性の検証がなされている。
- 4) 内ケーブル方式の、特にボンドタイプに比べて、終局曲げ耐力が低下するが、それに及ぼす諸要因の影響度を明確にし、外ケーブル方式の PC 部材に対する精度の高い理論解析法を確立する必要がある。論文 T 4 (b)-2 では、単純はり実験から得られた曲率分布を考慮した近似計算法が提示されているが、適用範囲を明確にする必要がある。一方、論文 T 4 (b)-3 では、非線形 FEM を適用したより一般性の高い解析法が提案され、諸実験結果との比較によりその有効性が検証されている。また、論文 PT 4-3 では、設計上の観点からその終局耐力の取扱い方を実設計例に基づいて説明している。

さらに、論文 T 4 (a)-1 では、外ケーブル方式 PC に対する使用限界状態と終局限界状態を包括した設計思想についての見解が提示されている。

- 5) ケーブルが断面外にあるため、長期耐久性を確保するうえで信頼性の高い防錆対策が必要である。

これは、外ケーブル方式の PC では非常に重要な事柄であり、論文 T 4 (a)-1, T 4 (b)-1 では種々の防錆対策が適用事例をまじえて紹介されている。

- 6) 耐火性が問題となる場合には、ケーブルに耐火被覆等を考慮する必要がある。

以上、外ケーブル方式に付随するいくつかの問題点は致命的なものではなく、先に述べた利点の方がはるかに大きいと考えられる。

現在、これらの問題に対処するための一つの方法として、混合方式も採用されている。混合方式の基本的な考え方は、架設中の応力を内ケーブルで、一方設計荷重時応力に対して内ケーブルが配置されていない区間および内ケーブルで負担できない部分を外ケーブルで負担させるものである。論文 PT 4-3 では我が国および T 4 (b)-1 ではスイスにおける、このような混合ケーブル方式の適用事例が紹介されている。その他、混合ケーブル方式を採用した従来の我が国における代表例としては、東北新幹線の笹目川橋梁（3 径間連続 PC 箱形橋）がある。この場合、内ケーブルには PC 鋼棒と PC 鋼線、一方外ケーブルには PC 鋼線を使用することによって、鋼棒と鋼線の有する利点もうまく活用されている。

#### 4. む す び

アンボンド PC 工法は、現場における煩雑なグラウト注入作業を省略して省力化や施工性の向上を図ろうとするものである。また、従来主として既設コンクリート構造物の補修・補強工法として用いられてきた外ケーブル工法は、断面のウェブ厚の減少により自重がかなり軽減されることやコンクリートの施工性が改善されることなどのため、近年は国内外において新設構造物への適用も次第に増加している傾向がある。

最近では、非常に防錆能の高いアンボンド PC 鋼材が開発されており、先に述べたように PC 鋼材の配置作業上の注意と適切な定着部の処理を行えば、信頼性の高い耐久性を確保することが可能である。

アンボンド PC の有する種々の利点や先に紹介した最近の諸研究成果や適用例を考慮すると、外ケーブル方式の PC を含め、さらに広範囲の分野へ有効に利用することも可能で、今後の普及・発展が大いに期待される。

#### 参 考 文 献

- 1) 日本コンクリート工学協 prestrestコンクリートの利用性追求研究委員会報告書—prestrest技術の現状と将来への展開—, 1991 年 7 月
- 2) 森元峯夫: PC 産業の将来展望, prestrestコンクリート, Vol. 30, No. 1, 1988 年 1 月
- 3) 池田尚治: prestrestコンクリート橋の新しい流れ, prestrestコンクリート, Vol. 35, No. 2, 1993 年 3 月