

研究展望

REVIEW

研究展望

外ケーブル PC 構造に関する研究の現状

RECENT TRENDS IN PRESTRESSED CONCRETE STRUCTURES WITH EXTERNAL CABLES

小林和夫

Kazuo KOBAYASHI

フェロー会員 工博 大阪工業大学工学部教授
(〒535 大阪市旭区大宮 5-16-1)

Key Words : *external prestressing, load carrying behavior, analysis, design, repair • strengthening*

1. まえがき

最近、緊張材を断面外に配置する外ケーブル方式の PC 構造が注目されているが、その歴史は内ケーブル方式より古く、すでに 1920 年から 1950 年代にかけてヨーロッパを中心に採用されている。しかし、ケーブルの防錆技術が十分でなく、補修にコストがかかったため、その後は殆ど用いられなくなった。そして、1970 年代に主にフランスで PC 橋の補強に外ケーブルが採用され始めた¹⁾のを契機に防錆技術も非常に発展し、1980 年代に米国フロリダの Key 諸橋が外ケーブル方式で架設されてから急速に発展した²⁾。特に、フランスでは SETRA (道路構造物設計事務所) により橋梁架設に外ケーブル単独方式または内ケーブルとの混合方式が推進され、1983 年に理論体系がまとめられ³⁾、1990 年には規準 (案) が刊行されている⁴⁾。

わが国では、1985 年に東北新幹線笹川橋梁に内・外ケーブルの混合方式が採用されてから、外ケーブルの適用が非常に増加している⁵⁾。

最近、大規模構造へのプレキャストセグメントの活用が積極的で、外ケーブルとの併用もかなり報告されている⁶⁾。また、外ケーブル方式は施工が比較的容易で確実な効果が期待できるので、損傷構造物の補修・補強工法としても有用である。

外ケーブル方式は多くの利点を有するが、詳細な検討を要する課題も残されている^{1), 7), 8)}。

ここでは、外ケーブルを適用した PC 構造部材の基本的耐荷挙動と解析法、外ケーブル方式の特性からくる固有の問題、補修・補強への適用、設計規準などについて述べる。

2. 外ケーブル PC 部材の挙動とその解析

(1) 外ケーブル部材の基本的挙動

外ケーブル方式の PC はり部材の挙動に関して特に最近多くの研究結果が報告されているが、ここでは主に一体打ちの部材を中心に述べる。

a) 単純はり部材

外ケーブル方式の単純はりの挙動は、デビエータ間隔、PC 鋼材量、非緊張鉄筋量、プレストレス力、スパン/有効高さ比、載荷形式や内ケーブルとの混合比率など、多数の要因に影響される。

試験結果によると、部材の変形に伴う外ケーブルの偏心位置の変化が曲げ挙動に大きく影響し、デビエータ間隔が大きくなるほど終局曲げ耐力が減少し^{9), 10), 11)}、塑性変形能も低下する^{9), 12)}。これは、変形の適合条件から外ケーブル方式ではコンクリートひずみが卓越し、コンクリートの圧壊が先行するためである。すなわち、内ケーブルのボンド方式が under-reinforced 型の破壊となるのに対し、外ケーブル方式では over-reinforced 型となる可能性が高いことによる¹³⁾。

また、その挙動は部材寸法にも影響され、スパン/有効高さ比が大きくなるとケーブルの応力増分が減少し、終局曲げ耐力や吸収エネルギーが低下する。特に、この傾向はデビエータが設置されない場合に顕著である¹⁴⁾。

内ケーブルのボンド方式では断面の終局曲げ耐力が荷重状態とは無関係であるのに対し、外ケーブル方式では荷重状態で変化する¹¹⁾。対称 2 点載荷試験¹⁵⁾から、スパン長が同一の場合は載荷点間の距離が短くなるほど終局曲げモーメントが減少し、中央 1 点載荷時には初期導入力を外力として取り扱ってケーブル張力の増加を無視した計算値程度にまで低下することもある。

外ケーブルの偏心位置が変化しないように、例えば、スパン中央部にデビエータを配置すると内ケーブル方式のアンボンド部材とほぼ同等の曲げ性状を示し⁹⁾、また後打ちコンクリートで外ケーブルダクトを下フランジと一体化すると内ケーブル方式と類似の挙動を呈する¹⁶⁾。なお、デビエータの影響は、緊張材量が少なく、部材たわみが大きくなるような場合に一層顕著となる¹⁴⁾。

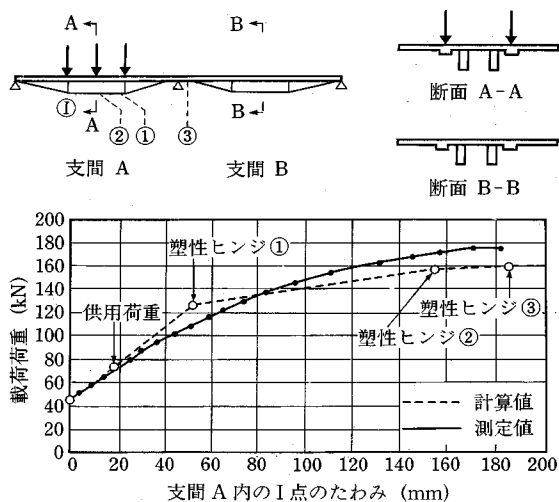
適量の非緊張鉄筋を配置して PRC 断面にすると、外ケーブル部材のひび割れ分散性や終局時の塑性変形能などを改善するうえで非常に有効であり^{11),14),17)}、施工例も報告¹⁸⁾されている。

外ケーブルをボンドタイプの内ケーブルと混合使用した場合の試験^{9),19)}によると、外ケーブル単独の場合に比べてひび割れ分散性、終局耐力、塑性変形能などが改善される。このような混合方式は、施工時と設計荷重時の応力をそれぞれ内、外ケーブルで負担させるような場合に採用されている。

以上の曲げ挙動に比べて、外ケーブル部材のせん断耐荷特性に関する研究は非常に少ない。

外ケーブル方式のせん断補強筋のない PRC はりの試験²⁰⁾では、せん断耐力は内ケーブルを対象とした土木学会²¹⁾、日本建築学会²²⁾、ACI 規準²³⁾の計算値(安全係数は全て 1.0)を上回り、プレストレス量が高いほどこの傾向が顕著となる。しかし、内ケーブル方式との相違は明確にはされていない。また、せん断補強筋の少ない RC はりに外ケーブルでプレストレスを導入した結果²⁴⁾では、せん断耐力に対するプレストレス効果を土木学会式²¹⁾の V_c 中のデコンプレッションモーメントとプレストレス力の鉛直分力で評価して試験値と比べると、せん断ひび割れ耐力は概ね一致するが、終局耐力は試験値がかなり上回る。一方、プレキャストセグメント T 形はりの試験²⁵⁾では、外ケーブルの採用によるウェブ厚の減少を考慮し、内ケーブル方式よりも 40% 薄くしたが斜めひび割れが発生せず、外ケーブルはせん断耐力の増大にきわめて有効であるとしている。

外ケーブルのように軸方向鋼材の付着がない部材に関し、RC 単純はりの支点外の定着部を除いて異形鉄筋の付着を無くした場合と有る場合の比較から、付着の有無と破壊形式、耐力、残存アーチの関係が検討²⁶⁾されている。その結果、付着がない時はせん断スパン/有効高さ比が小さい(2 以下)場合を除き、斜めひび割れが生じず、腹鉄筋がなくてもせん断破壊せず、また強固なアーチリブの形成により残存アーチ耐力が著しく増大するなど、外ケーブル部材のせん断耐荷挙動を考えるうえでの基礎資料として注目される。なお、アンボンド PC はりのせん断耐力にもトラスモデルが適用でき、非緊張鉄筋を併用した場合はせん断破壊形式によらずボンド方式に対する設計式の適用が可能であるとする報告²⁷⁾もある。



図一 連続床版モデルの荷重-たわみ関係²⁹⁾

b) 連続はり部材

スパン 30 m の 2 スパン連続床版橋の 1/3 縮尺供試体の試験結果が報告^{28),29)}されている。これは内・外ケーブル混合方式で、後者は中間支点部でのみ床版内にあり、それ以外は床版下側の断面外に配置されている。前者は施工死荷重から所要量が定められている。その結果、全使用荷重下の外ケーブルの応力増加量は降伏強度の約 8% で、その 1/2 振幅での 2×10^6 回繰返し載荷では外ケーブルに損傷は生じなかった。振動試験から実橋の動的増幅効果は最大で 20% 程度で、同程度スパンの通常橋梁と同等である。また、この連続床版は靱性的な挙動を示し(図一 1)、最終的には外ケーブルは降伏した。

2 スパン連続はり(従来型に加え、外ケーブルを支点と支間で断面高外に配置した大偏心型も含む)の試験³⁰⁾では、曲げひび割れ発生後からモーメントの再分配が始まり、終局時には中間支点部の実曲げモーメントと弾性解析値の比は 0.9 で約 10% の再分配が生じた(図二)。大偏心型も従来型と類似の挙動を示す。また、はり全長において外ケーブル位置のコンクリートひずみが局所的に突出せず均等に近ような載荷状態やケーブル配置の場合、終局時のケーブル張力の増加が大きくなる³¹⁾。なお、引張縁プレストレスが同一の時、大偏心型は少ないケーブル量で従来型と同等の耐力や変形能有し、経済的である³⁰⁾。

曲げモーメントの再分配は不静定構造の重要な特性であるが、外ケーブル部材で上記と同程度の再分配が他³²⁾でも認められている。一方、外ケーブルのプレキャストセグメント連続はり³³⁾でも、終局時にかなり大きな再分配を示し、塑性ヒンジを生成する。類似の連続はりに対する他の試験^{34),35)}でも同様なことが確認されている。

以上の連続はりには、文献 30) 以外は内・外ケーブル混

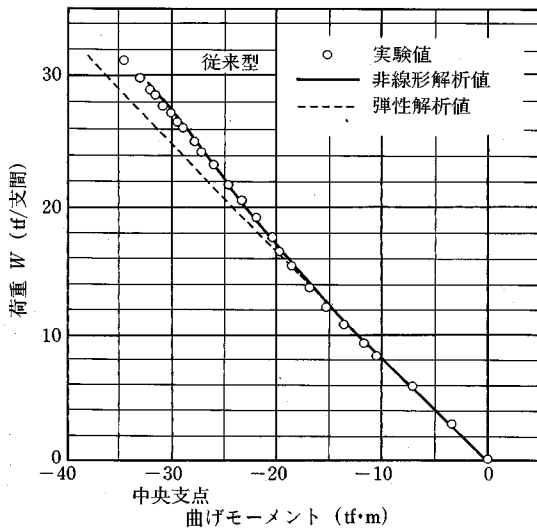


図-2 荷重-中央支点曲げモーメント関係³⁰⁾

合方式である。前記の単純はり試験や後記の解析結果³⁸⁾によると、外ケーブル単独の場合は混合方式や内ケーブル方式に比べ塑性変形能が劣るので、外ケーブル PC 連続はりのモーメント再分配率、塑性ヒンジ生成や耐力などは内ケーブルとの混合比率を考慮して評価する必要がある。

(2) セグメント方式部材の挙動

外ケーブルをプレキャストセグメントと併用する場合、軸方向鉄筋が連続配筋でなく、セグメントの接合法でひび割れ開口による局部変形が異なるので、その影響を検討しておく必要がある。

以下に、特に接合部に着目した試験結果について述べる。

単純はりで接合法（ドライ型、エポキシ塗布型）とセグメント長などを要因とした試験³⁶⁾によると、エポキシ塗布型ではひび割れがセグメント内の鉄筋先端と接合面の間で生じたのに対し、ドライ型では接合面から発生した。図-3 から、荷重-たわみ関係で初期勾配の変化点に対応するひび割れ発生荷重はドライ型ではエポキシ塗布型に比べて低下するが、両者で曲げ性状に明瞭な差はみられない。一体打ちはりの最大耐力がこれらよりかなり大きいのは、連続鉄筋が配筋されているためである。なお、セグメント長でひび割れ本数が相違し、圧縮域での応力集中の程度が異なるため、終局域性状に影響を与えている。

外ケーブルのセグメント方式箱断面 3 スパン連続はりで接合法（ドライ型とエポキシ塗布型）の影響を検討した試験³⁵⁾によると、エポキシ塗布型ではひび割れは接合面近傍の母材部に生じ、その強度はドライ型に比べかな

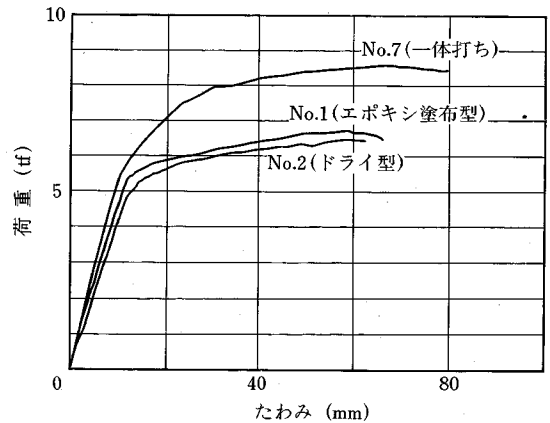


図-3 単純はりの荷重-たわみ関係³⁶⁾

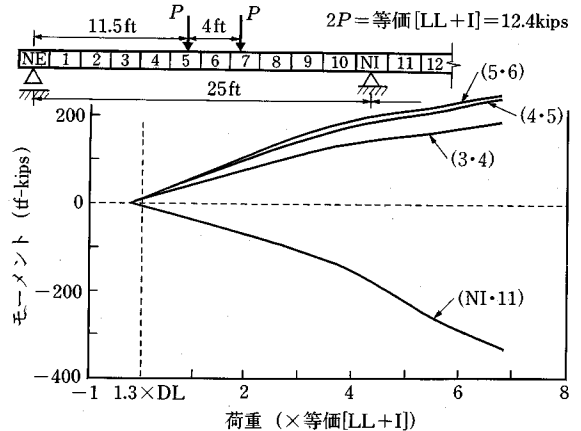
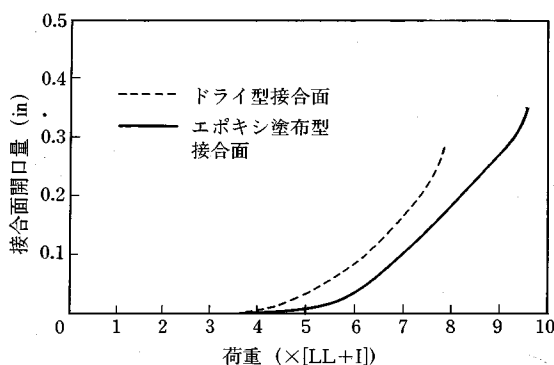


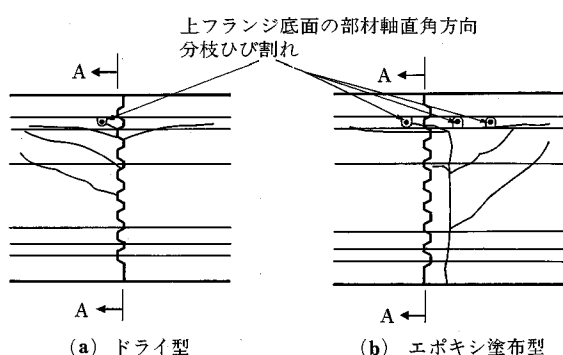
図-4 連続はりの荷重-曲げモーメント関係³⁴⁾

り大きい。しかし、接合法で終局曲げ耐力に特に差はなく（AASHTO HS-20 トラック荷重等価の荷重係数で 6 程度）、両者とも接合部の大きな局部回転により顕著なモーメント再分配現象を示す（図-4：ドライ型の例であり、図中の例えば（5・6）などはセグメント 5 とセグメント 6 との接合位置を表す）。なお、接合部におけるせん断伝達の大小でひび割れモードが異なり（曲げひび割れ開口型、斜めひび割れ形成型）、局部回転の機構が相違するとしている。

同様なセグメント方式 3 スパン連続はり（接合法：ドライ型、エポキシ塗布型）の試験³⁷⁾によると、エポキシ塗布型はドライ型に比べコンクリート圧壊時の接合面開口量が大きく、曲げ耐力や変形能が大となる（図-5）。これは、図-6 のように、エポキシ塗布型ではひび割れが上フランジ底面の 3 ケ所で部材軸直角方向に分枝・進展し広い領域で高応力に抵抗するために接合部圧壊前の圧縮変形量が增大するのに対し、ドライ型ではこの分枝ひ



図一五 荷重一接合面最大開口量関係³⁷⁾



図一六 接合部のひび割れパターン³⁷⁾

び割れが1本のみで高圧壊域が狭い領域に限定されることに起因するとしている。

(3) 解析方法

a) 基本解析法

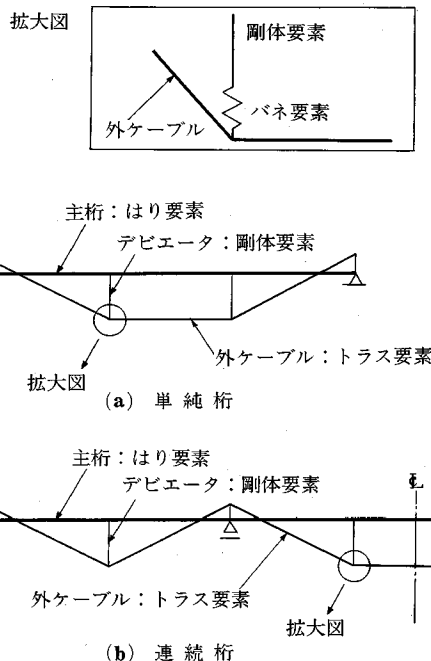
外ケーブル方式 PC 部材ではコンクリートとケーブル間に付着が存在しないので、ひずみの平面保持にもとずく通常の解析法は適用できない。

以下に、外ケーブル方式のはり部材に対する代表的な解析方法を示す。

(ア) 精算法

部材全長に対する変形の適合条件および荷重の増大にともなう外ケーブルの偏心位置の変化を考慮し、はり部材に対する通常の計算法を適用して反復繰返し計算により解析する方法である。

この方法は高精度の解が得られるが、単純はりとし連続はりのように構造系が異なると同一のプログラムが適用



図一七 非線形フレーム解析モデル例³⁸⁾

できない欠点がある。

睦好ら¹⁰⁾は、この解析法で単純はりの数値実験を行い、外ケーブルに対する有効高低減係数と歪低減係数を提案し、これらから通常の曲げ理論で終局耐力が精度よく算定できるとしている。

(イ) 非線形フレーム解析法

材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮し、断面を細領域（ファイバー）に分割して各領域毎の応力とひずみの関係から断面レベルでの解析を行う。次に、このファイバーモデルを用い、はり要素と外ケーブル要素から構成された全体系をフレーム解析で解く方法である。この方法では、はり要素にははり理論を適用し、外ケーブルは軸力のみを受け持つトラス要素でモデル化している。この解析法は理論が明快で汎用性がある。はり部材に対する解析モデルの例³⁸⁾を図一七に示す。

梅津ら³⁰⁾、玉置ら³⁴⁾、鴻上ら³⁸⁾、相沢ら³⁹⁾、新井ら⁴⁰⁾は、この方法で外ケーブル方式の単純はりや連続はりの終局時までの挙動を解析し、実験結果とかなり精度よく整合するとしている。

単純桁（スパン 30 m、T 桁高 2 m）と 3 スパン連続桁（20-30-20 m、箱桁高 1.5 m）でコンクリートの終局圧縮ひずみを 3500μ とした耐力と変位の解析結果³⁸⁾を表一1に示す。終局耐力と変形性能（終局変位）は内・外ケーブルの混合比率でかなり異なり、特に 100% 外ケーブルは 50% 内・外ケーブルや 100% 内ケーブルの部材に比べて変形性能が著しく低下する点が注目される。

表一 非線形フレーム解析による解析結果³⁸⁾

解析 ケース	構造形式	ケーブルの比率		終 局 時	
		内 ケーブル	外 ケーブル	荷重 (MN)	変位 (m)
C-1	単 純 桁 場所打ち	100%	0%	4.42	1.44
C-2		50%	50%	3.76	1.19
C-3		25%	75%	3.42	0.91
C-4		0%	100%	2.89	0.23
C-5	連 続 桁 場所打ち	100%	0%	2.80	0.62
C-6		50%	50%	2.63	0.59
C-7		25%	75%	2.52	0.50
C-8		0%	100%	2.19	0.19

(ウ) 非線形 FEM 解析法

材料と幾何学的非線形性を考慮した FEM 解析もなされており、柳沼¹⁴⁾や藤井ら⁴¹⁾はこの方法で算定した外ケーブル PC はりの曲げ挙動は実験値とかなりよく一致するとしている。

(エ) その他

Virlogeux⁴²⁾は、外ケーブルに付随する諸特性を考慮した非線形解析法を提示している。この解析法では外ケーブルの張力を外力として取扱ひ、各断面で構成材料の非線形特性を考慮して求めた全外力による、部材の変形を計算する。そして、これによる外ケーブルの長さ変化（ケーブル張力）を求め、これが収束するまで繰返し計算を行って逐次増加荷重に対する非線形挙動を解析する。

なお、外ケーブル方式ではテレビータ部でのケーブルの摩擦やすべりの影響も重要であるが、その解析上の取扱いについては後記の c) で述べる。

b) セグメント接合構造の解析法

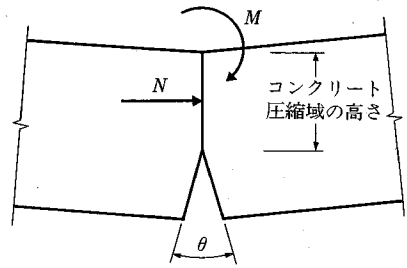
セグメント接合構造を解析する際の接合部の取扱いに関しては、次のような方法がある。

(ア) 接合部の局部変形を考慮する方法

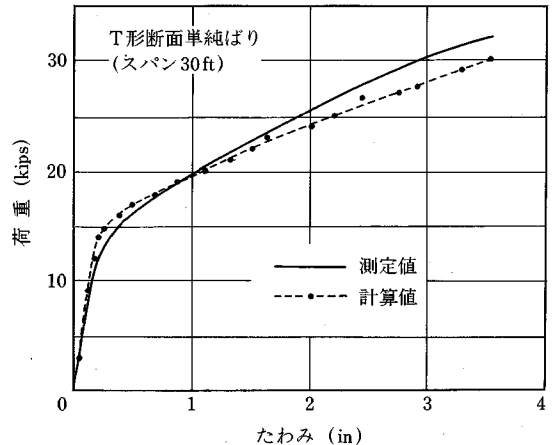
外ケーブル方式のプレキャストセグメント接合部材の解析では、接合部のひび割れ開口以後の剛性の取扱い方が重要となる。

Muller ら⁴³⁾は、接合部の開口に伴う局部変形(図一 8)に着目した曲げモーメント (M) - 一回転角 (θ) 関係を考慮し、FEM 解析を適用して各セグメントの剛性を算出している。ただし、簡単化のために接合面の接触域におけるコンクリートの応力分布は直線とし、相隣る 2 つの接合面間にはひび割れは発生しないと仮定している。そして、単純はりの試験結果から、終局状態に至るまでの挙動は接合部の局部変形を考慮したこの解析法でかなり精度よく計算できるとしている (図一 9)。

Virlogeux⁴²⁾は、セグメント接合構造ではクリティカ



図一 8 接合部における局部変形⁴³⁾



図一 9 荷重-たわみ関係⁴³⁾

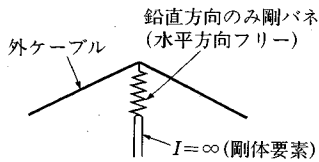
ル領域の接合面が開口し大きな変形が集中するので、厳密には開口した接合面の両側における局部的な応力と変形を適切に考慮して解析する必要があるとし、その方法を提示している。

藤井ら⁴¹⁾は、非線形 FEM 解析において、セグメント接合面の接触条件として摩擦係数を 0 と仮定するとともに、構造系の不安定化を避けるために上フランジ部は剛結としている。その結果、解析値は試験結果とよく一致したとしている。

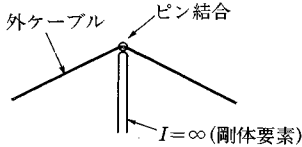
(イ) 接合部での部材特性の変化を考慮する方法

新井ら⁴⁰⁾は、外ケーブル方式のプレキャストセグメント単純はりとは 3 スパン連続はりを対象とし、一体打ちはりの挙動との差異を解析的に検討している。計算には非線形フレーム解析を適用し、セグメントに関しては鉄筋が配置されている部分は RC 区間、配置されていない部分は無筋区間としてモデル化している。その結果、単純、連続はりの両者とも、セグメント接合部材は一体打ち部材に比べ終局耐力、終局変位とも低下するが、内ケーブルの比率が単純はりでは 25%、連続はりでは 50% 以上になると、一体打ち部材の 90% 程度以上の終局耐力が得られるとしている。

中村ら³³⁾は、わが国で初めてプレキャストセグメント



(a) スライドモデル



(b) 固定モデル

図-10 デビエータ部のモデル化の例³³⁾

工法に外ケーブルとスラブキー、ウェブ多段せん断キーを本格的に採用した全長 1 900 m、全 9 連 45 径間の高架橋の支間長 47.0 m の 2 径間連続桁部分を想定した 1/3 縮尺供試体に対し、載荷試験と非線形解析を行っている。解析では、主桁は接合部を挟んで±50 cm 区間を無筋部材、その他の区間を RC 部材とし、新井ら⁴⁰⁾と同様なモデル化を行っている。その結果、終局時のケーブル応力増加量や耐力は解析値の方が小さく、さらに検討を要するものの全体的には解析値と試験値はよく一致し設計上は十分な精度を有するとしている。

c) デビエータ部における摩擦の取扱い

外ケーブル PC 部材の挙動はデビエータ部でのケーブルの摩擦やすべりにも影響される。

部材挙動の解析にあたって、デビエータ部での摩擦の取扱いは次のように分類される。

(ア) デビエータ部での摩擦を考えない場合

新井ら⁴⁰⁾は、はり要素(コンクリート桁)とトラス要素(外ケーブル)において、デビエータ部で摩擦が生じないものとし、ケーブル軸力がデビエータ(剛体要素)の左右で等しくなるよう斜バネで結合する形でモデル化している。

中村ら³³⁾は、デビエータでケーブルを拘束しないスライドモデルと拘束する固定モデルで解析し(図-10)、デビエータの摩擦を考えないスライドモデルでも精度的には十分であるとしている。

(イ) デビエータ部での摩擦を考える場合

Virlogeux⁴²⁾は外ケーブル構造の非線形解析法を提案(2.(3)a)(エ)参照)し、デビエータ部の摩擦とすべりに関して次のような取扱い方を示している。

デビエータの各屈曲点において、繰返し計算による最終的なケーブル張力に次の関係が成立する時にはすべりが存在しないと判定する。

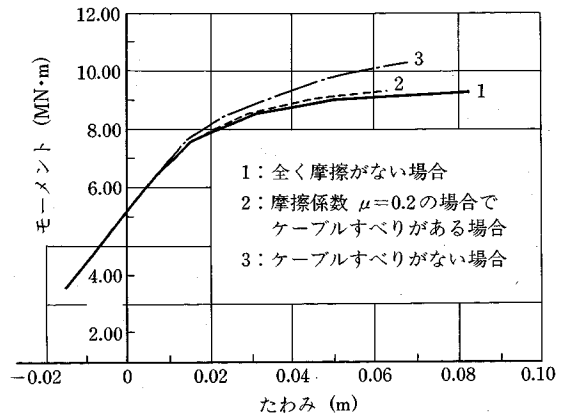


図-11 デビエータ部のすべりの影響⁴²⁾

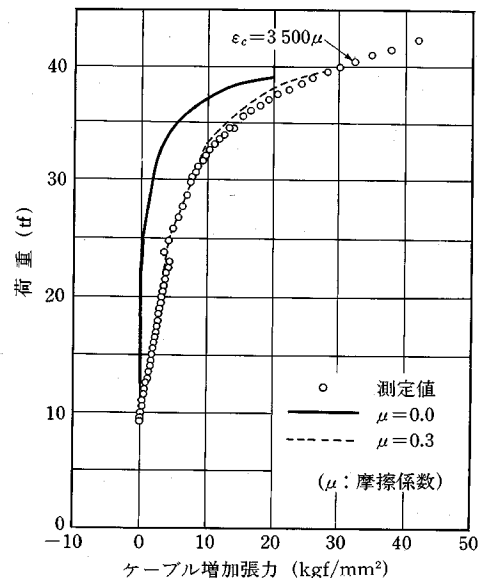


図-12 外ケーブル張力に及ぼす摩擦の影響⁴⁴⁾

$$F_i \cdot e^{-[\mu \Delta \alpha_i + \lambda \Delta l_i]} \leq F_{i+1} \leq F_i \cdot e^{[\mu \Delta \alpha_i + \lambda \Delta l_i]} \quad (1)$$

ここに、

F_i, F_{i+1} : 屈曲点両側のブロック $[i], [i+1]$ のケーブル張力

$\Delta \alpha_i, \mu$: 角度変化とその摩擦係数

$\Delta l_i, \lambda$: 屈曲ブロックの長さとその摩擦係数

ある屈曲点で式(1)が成立しない時はその部分ですべりが生じていることになり、すべりを考慮した繰返し計算により各屈曲点で最終的に式(1)の関係が成立することを確認する必要がある。図-11は、2つの対称な屈曲点を有する単純はりですべりの影響を検討したその解析結果の例を示す。

河村ら⁴⁴⁾は、材料と幾何学的非線形とともに、デビエー

タ部のケーブルの非線形すべり（デビエータの左右での張力差に対しても非線形挙動を勘案）を考慮した解析を行っている。この場合、各デビエータの左右におけるケーブル張力とすべり量の間で、①左右の張力差が摩擦で保持できる場合はそのデビエータでのすべりは生じない、②左右の張力差が摩擦で保持できる値よりも大きい場合はその張力差まですべる、という考え方ですべり量を算出している。なお、張力の再分配後も副次的な影響が発生するので、各デビエータですべりが生じなくなるまで繰返し計算を行う。これは、基本的には上記の Virlogeux と同様の考え方に立っている。河村らの解析と試験結果の比較を図-12 に示すが、デビエータでの摩擦を考慮すると外ケーブル張力等がより実情に近い。

3. 定着部の耐力とデビエータ部の局部応力

外ケーブルの張力が直接伝達される定着部は十分な耐力を有し、デビエータはケーブルの局部偏向力で破損しないよう配慮する必要がある。

(1) 定着部の耐力

外ケーブル方式では、横桁を部分的に拡幅して定着部として利用することが多い。この形式の定着部に対し、立体 FEM 解析とひび割れ発生後の補強鉄筋応力や破壊性状を調べるための試験が実施されている⁴⁹⁾。それによると、箱断面桁の横桁とウェブの取合い部が水平曲げで破壊した後には荷重が下床版に集中して作用し、補強鉄筋が降伏した後、曲げと押抜きせん断の複合作用で下床版が急激に破壊した。定着部は設計上は十分な耐力を有していたが、このような破壊性状を改善するため上床版も一体化するよう変更された（図-13）。

外ケーブル方式を損傷構造物の補修・補強に適用する場合、その定着方法が重要となる。桁ウェブ面をチップングし、定着用コンクリートブロックを打設し PC 鋼棒で圧着した接合面のせん断伝達耐力試験⁴¹⁾によると、その耐力は土木学会示方書²¹⁾のせん断摩擦理論に基づく設計せん断伝達耐力式で各部分安全係数を 1.0 とした計算値と概ね一致し、ウェブのテーパの存在が耐力低下に与える影響も同式で評価できる。他にも箱桁ウェブ内面にチップングで約 25 mm の凹凸を設けて外ケーブル定着用ブロックを打設し、PC 鋼棒で緊結した例⁴⁶⁾がある。この例でもせん断摩擦理論式（摩擦係数は 1.0 と仮定）を適用している。

このような場所打ちコンクリートや鋼製ブラケットの使用例はいくつかあるが、施工の簡素化からプレキャストコンクリート製を採用した例は少ない。後者に関しては、軽く粗面仕上げした主桁側面とブラケット（製作時に接合面に遅延剤を塗布し粗面化）の間に流動化剤混

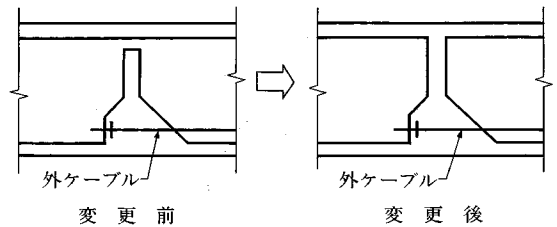
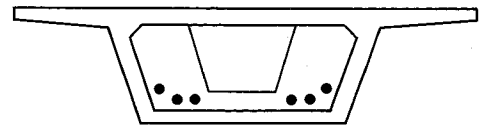
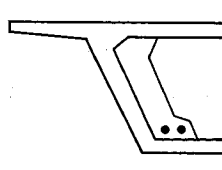


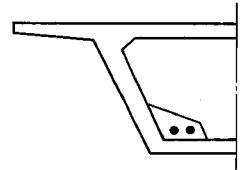
図-13 外ケーブル定着部の形状⁴⁵⁾



(a) ダイアフラムタイプ



(b) リブタイプ



(c) サドルタイプ

図-14 デビエータの形式⁴⁸⁾

入ブレパックドモルタルを充填し、所定強度に達した後には PC 鋼棒で圧着する接合方法が報告⁴⁷⁾されており、そのせん断伝達耐力も土木学会示方書²¹⁾の設計式で適切に安全側に算定できるとしている。

(2) デビエータ部の局部応力と補強

箱桁橋を例にとると、デビエータには図-14 の 3 タイプ⁴⁸⁾が採用されている。(a)ダイアフラムタイプと(b)リブタイプはコンクリートの圧縮ストラットでケーブル偏向力に抵抗でき、(c)サドルタイプより耐荷力が高い。しかし、前 2 者ではデビエータ寸法が大きく、またダイアフラムやリブコンクリートの型枠、特に曲線桁では幾何学的形状が複雑で施工が煩雑となる。このため、サドルタイプが増えると思われるが、このタイプではケーブル偏向力に圧縮ストラットで抵抗できないので耐荷力を向上させるための配筋が複雑となる。

Beaupre ら⁴⁸⁾は、サドルタイプデビエータ供試体（図-15）で、補強鉄筋をリンク筋とスターラップ筋とした従来型配筋、ループ筋とスターラップ筋とした修正型配筋（従来型より簡易）の破壊試験を行い、また簡易モデルとストラットタイプモデルで耐荷力を解析し、次の結果を得ている。

① 両配筋とも使用荷重下で健全な挙動を示し、十分な破壊安全度を有する。

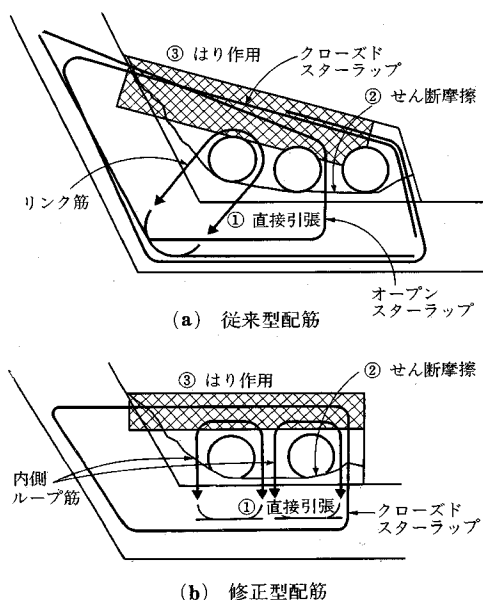


図-15 サドルタイプデビエータの配筋と簡易解析モデル⁴⁸⁾

② 両配筋とも適度な靱性を有するが、引抜き力に主に内側ループ筋に抵抗する修正型は特に優れた靱性を示す。また、直接引張鉄筋（リンク筋、ループ筋）と上側表層鉄筋を比べると、両配筋とも偏向力への抵抗性では前者の方がきわめて有効であり、最終的にはその破断により破壊した。

③ ひび割れや鉄筋ひずみの測定から、耐荷機構はリンク筋やループ筋の直接引張、上側表層鉄筋のはり作用、ひび割れ面のせん断摩擦からなる。

④ 供試体 10 体に対する終局耐力の実験値と計算値の比の平均値は、簡易解析モデルでは 1.14、ストラットタイプモデルでは 1.06 であった。

修正型配筋の場合、各緊張材を取囲むようにループ筋を配置し、その端部を十分に定着する。また、デビエータをウェブおよびフランジと緊結させるため、3 者を取囲むようにクロズド（閉合型）スターラップを配置するが、その断面積と配置間隔はループ筋と同一とするのがよい。

一方、伊東ら⁴⁹⁾は連続箱桁の中央径間側と中間支点上の横桁を部分的に拡幅したものをデビエータとした場合に対して、FEM 解析より次の結果を得ている。

① 外ケーブルの偏向によりプレストレス力の鉛直成分が作用するため、横桁はウェブで支持されたはりのような挙動を示し、その上方領域に橋軸直角方向の引張応力が生じる。

② 外ケーブルの偏向によってデビエータ部の表面付近に鉛直方向の引張応力が発生する。

設計上は、デビエータ部については鉄筋量を若干増加

することでこれらに十分に対処できるとしている。

4. 補修・補強への適用

外ケーブル方式の施工性、経済性、維持管理面での利点を活用した、既設橋梁の補修・補強への適用事例が多数報告されている。試験研究的なものも含め、紙面の都合で文献のみを 49)～61) に示し、以下にいくつかの事例について述べる。

供用後約 30 年のプレキャストセグメント PC 桁橋において、通常の自動車荷重下で接合面の開口が生じ、現場載荷試験から健全な状態に比べ残存プレストレス量が 30% 程度小さいことが判明した。外ケーブルによる追加プレストレスの導入に先立ち、モデル供試体での載荷試験と非線形 FEM 解析からその補修効果が評価された。その後に実橋の補修を行い、ダンプトラックによる載荷試験で所期の補修効果が確認された⁴¹⁾。

外ケーブル方式は、損傷構造物の補修のみならず、最近の B 活荷重への移行による既設橋の耐荷力不足への対応策としても検討されている。この目的で、外ケーブルによるプレストレス導入量や補強効果を調査するためにトラック載荷試験を行い、各種解析値と比較されている⁶²⁾。その結果、格子計算では荷重による外ケーブルの張力変化やクリープ・乾燥収縮によるプレストレスの減少は考慮できない。試験や立体骨組解析からは外ケーブルによる荷重分担が若干みられたが、その有無でたわみや応力に殆ど差がなく、また既設橋ではクリープや乾燥収縮がほぼ終了しているので、実用上は格子計算で十分安全な設計が可能である。なお、主桁、横桁、床版をシェル要素とした薄肉シェル解析は試験結果に最も近いが、外ケーブルの影響を過大評価するのでケーブルを含めてより適切なモデル化が必要であるとしている。

外国では、例えば、カナダで片持架設工法による PC 箱桁橋（中央スパン 181 m）で、ひび割れの発生に伴うたわみの増大に対処するため、外ケーブルを適用した報告⁴⁶⁾がある。この事例でも上記⁴¹⁾と同様に、ウェブ内面に外ケーブル定着用コンクリートブロックを打設し、PC 鋼棒で緊結された。この方法でプレストレスを導入すると、ウェブに曲げモーメントの発生により大きな引張応力が生じるので、左右 1 対の定着用ブロック間にダイヤフラムを配置しこの曲げモーメントの軽減が図られた。その後、現場測定でたわみの変化などの補強効果や定着用ブロック寸法などの補強設計での諸仮定の妥当性が検討された⁶³⁾。

架設後約 30 年経過した RC 橋（11×25 m=275 m）が配筋不良で曲げやせん断ひび割れが発生し、かぶりの剥落や鉄筋腐食が激しく、外ケーブルで補修した後にその効果を調べた事例⁶⁴⁾もある。その結果、補修後は固有振動

数が明確に増加し、また補修前後の固有振動数の比は補修前モデル（ひび割れ有）と補修後モデル（プレストレスでひび割れ閉合）の解析結果とよく一致し、全体構造系に対する補修効果の評価手法として振動試験による固有振動数の測定は有用であるとしている。

外ケーブルへの新素材の適用を目的とし、CFRPやAFRPを用いて内ケーブルの腐食破断で耐力が低下したPCはり（補修）した場合の効果を調べた報告⁶⁵⁾もある。外国でも、損傷構造物の補修や補強用の外ケーブルに新素材の適用が検討⁶⁶⁾されている。

最近、既設の単純桁橋に対し、車両の大型化（B活荷重）への対応、ノージョイント化による交通騒音問題の解消、伸縮継手部損傷による維持管理面での問題の解消、さらには耐震性の向上を目的とし、外ケーブルプレストレスで橋軸方向に連結し連続桁構造とすることが試みられており、載荷試験と解析計算からこの方法で十分に連続桁化が達成できることが示されている^{67)~69)}。

以上は曲げ補強を対象としているが、はり（プレテン部材と場所打ちコンクリートの合成断面）のせん断補強を目的とし、鉛直方向の外ケーブルによるプレストレス効果の検討報告⁷⁰⁾もある。その結果、無補強はりは斜めせん断破壊、鉛直プレストレスの少ないはりは接合面ですれせん断破壊したのに対し、適量の鉛直プレストレスを導入すると曲げ破壊し靱性が著しく向上した。また、鉛直プレストレスの効果により定着長をAASHTO/ACI基準設計値の60%程度と著しく短くしても付着破壊が起らず、曲げ破壊が先行した。

5. 外ケーブル PC 構造の設計法

実構造では影響要因が多く、外ケーブル PC 構造の設計法については今後の検討事項も残されているが、以下にその設計法の主な点を概述する。

(1) プレストレス力の計算

デビエータ部の摩擦を考慮したプレストレス力を式(2)で表した場合の摩擦係数として、例えば、PE/SETRA（外ケーブル/フランス道路構造物設計事務所）では次のように定めている。

$$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-\mu\alpha - \lambda x} \quad (2)$$

鋼管シース： $\mu=0.2\sim0.3$ ， $\lambda=0$

HDPE 管： $\mu=0.12\sim0.15$ ， $\lambda=0$

グリス被覆ストランド： $\mu=0.05$ ， $\lambda=10^{-3}/\text{m}$

(2) 定着部の設計

外ケーブル定着部の設計で特別に規定を設けている例はないが、この場合は定着部で局部応力の集中が大きくなるので応力分散が重要となる。

通常の突起定着の設計法が準用できるが、ケーブルを桁内部の突起に定着する場合、両者の境界面に生じる大きなせん断力に抵抗するよう、補強鉄筋の配置や突起の寸法を定める必要がある。

(3) デビエータ部の設計

例えば、PE/SETRA ではデビエータは直線部との接続に角折れが生じないように設置し、ケーブル最小曲げ半径は2～4 m、2重管では内管と10 mm以上の遊間を確保し、両端に5/100 radの角度誤差を考慮するよう定めている。

(4) 外ケーブルの防振と疲労に対する配慮

a) 防 振

外ケーブルの固有振動数が通行車両の衝撃などによる主桁の曲げ振動数と一致すると共振し⁷¹⁾、ケーブルの定着具近傍などで曲げ応力が発生してケーブルの疲労につながる可能性がある。

外ケーブルの防振に関する設計規定として、例えば、AASHTO では特別な振動解析をしない時はケーブル固定間距離は7.5 m (25 ft) 以下、PE/SETRA ではその振動が構造物の固有振動数と一致しないよう10～15 m間隔で支持すると定めている。

振動実験⁵⁷⁾によると、外ケーブルの固有振動数は張力で異なること、また主桁とケーブルの構造が設定されれば主桁の振動特性からケーブルの振動特性が推定できるが、現実には主桁からケーブルに入力される振動の継続時間の推定が重要となることなどが示されている。

b) 疲 労

外ケーブル方式では、特にデビエータ部での偏向がケーブルの疲労に及ぼす影響が重要である。

例えば、伊東ら⁴⁵⁾はデビエータ部のケーブルの曲げ半径をAASHTO (3.0 m) や SETRA (2.5 m) 基準を参考にして通常の内ケーブル（道路橋示方書：8.0 m）よりかなり小さい3.5 mとしたが、実橋に採用された裸PC鋼材とエポキシ鋼材のケーブルとも 2×10^6 回の繰返し荷重で素線破断などの変状は生じなかったとしている。

土木学会など諸基準では緊張材に付着がない場合は定着部の疲労強度の検討が重要であるとし、緊張材や定着具の疲労強度を定めたり（例えば、CEB-FIP 90）、活荷重による応力変動幅の制限値を定めている（例えば、DIN 4227）。

(5) 終局耐力の算定

終局曲げ耐力の算定には、外ケーブルのようなアンボンド緊張材では有効プレストレス力を外力と考えて抵抗側にカウントしない方法（CEB-FIP 90、構造物設計標準）と終局時ケーブル応力度の規定値を用いて計算する

方法 (BS 5400, ACI 318-89, DIN 4227) とがある。土木学会示方書では、付着のない緊張材で特別な検討を行わない時は付着を仮定した耐力算定値を 30% 低減している。

アンボンド緊張材を用いた PC 部材の代表的設計式と多数の曲げ耐力試験値を比較し、設計式の精度を検討した結果も報告⁷²⁾されており、設計上有用である。

外ケーブル構造の終局限界の照査では、ケーブル張力の増加を見込まずに断面耐力を算定するのが安全であるが、外ケーブル比率の高い時は鋼材量が増加し不経済である。この場合は非線形解析により全体構造系で安全性を評価するのが合理的で、この観点からの照査も試みられている³⁴⁾。

一方、外ケーブルのはり部材の設計せん断耐力算定には土木学会示方書等の設計式が適用できるが、そのプレストレス効果の評価法 (コンクリート負担せん断耐力、プレストレス力の鉛直分力) に関してはさらに検討する必要がある^{20), 24), 25)}。

6. むすび

以上のように、特に最近の外ケーブル構造に関して非常に活発な研究がなされ、その挙動や定量化手法がかなり明確にされているが、合理的な設計法を確立するうえで細部的にさらに検討を要する課題としては次のようなものが挙げられる。

- (1) ケーブルと構造体との共振特性
- (2) ケーブル定着部およびデビエータ部の合理的かつ実用的な応力分散法や配筋法の確立
- (3) デビエータの屈曲部におけるケーブルの疲労破壊に対する明確な安全性の評価法
- (4) 連続はりも含めた外ケーブル部材の精度の高い終局曲げおよびせん断耐力式の確立
- (5) 長期耐久性が保証できる信頼性の高いケーブル防錆対策・技術の確立

外ケーブル方式は、構造特性や施工上の種々の利点などを考慮すると、さらに広範囲に活用することが可能で今後の発展が大いに期待される。

最後に、付録の参考文献リスト中に記載させて頂いた非常に多くの貴重な文献の著者の方々に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) Lartoux, P. and Lacroix, R.: Development of External Prestressing in Bridges-Evolution of the Technique, *ACI SP-120*, pp.83-106, 1990.
- 2) 池田尚治: プレストレストコンクリート橋の新しい流れ, プレストレストコンクリート, Vol. 35, No. 2, pp. 12-15, 1993.3.
- 3) 森元峯夫: PC 産業の将来展望, プレストレストコンクリート, Vol. 30, No. 1, pp.26-33, 1988.1.
- 4) 荒川敏雄訳: 外ケーブル方式プレストレスング (その 1, 2, 3), プレストレストコンクリート, Vol. 33, No. 1 (No. 4, pp.65-89, 1991.7), No. 2 (No. 5, pp.61-69, 1991.9), No. 3 (No. 6, pp.57-89, 1991.11)
- 5) 日本コンクリート工学協会プレストレストコンクリートの利用性追求研究委員会報告書—プレストレス技術の現状と将来への展開—, 1991.
- 6) 高速道路技術センター: 外ケーブルを用いた PC 橋梁設計・施工事例集, 1992.12.
- 7) 古賀政二郎, 富沢三郎: アウトケーブル方式の PC 橋梁—その現状と展望—, プレストレストコンクリート, Vol. 31, No. 1, pp.36-43, 1989.1.
- 8) 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, pp.17-20, 1990.9.
- 9) 土田一輝, 睦好宏史, S. Matupayont, 谷口裕史: 外ケーブル式 PC はりの曲げ性状に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 2, pp.1009-1014, 1994.
- 10) 睦好宏史, 土田一輝, M. Songkiat, 町田篤彦: 外ケーブル PC 部材の曲げ性状および曲げ耐力算定法に関する研究, 土木学会論文集, No. 508/V-26, pp.67-77, 1995.2.
- 11) Zuohan, Z., Bin, N. and Lu, S.: Ultimate Strength of Externally Prestressed Concrete Structures, *Proc. of FIP Symp. on Modern Prestressing Techniques and Their Applications*, pp.907-914, 1993.
- 12) 柳沼善明: 外ケーブルを用いた PRC はりの曲げ性状, PC 技術協会第 4 回シンポジウム論文集, pp.1-6, 1994.
- 13) 若林登, 沼田昌一郎, 一枘久允, 玉置一清: 外ケーブル構造の曲げ終局耐力に関する一考察, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 2, pp.1021-1026, 1994.
- 14) Yaginuma, Y.: Ultimate Strength of PPC Beams with Exterior Cables, *Proc. of FIP Symp. on Modern Prestressing Techniques and Their Applications*, pp. 915-922, 1993.
- 15) 藤田学, 沼田昌一郎, 一枘久允, 高野晴夫: 荷重状態が外ケーブル構造の曲げ耐力におよぼす影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 2, pp.1027-1032, 1994.
- 16) Rabbat, B.G. and Sowlat, K.: Testing of Segmental Concrete Girders with External Tendons, *PCI Jour.* Mar.-Apr, pp.86-106, 1987.
- 17) Bruggeling, A.S.G.: External Prestressing—a State of the Art, *ACI SP-120*, pp.61-81, 1990.
- 18) 例えば, 津吉毅, 細川泰明, 中山弥須夫, 石橋忠良: 外ケーブルを併用した PRC 鉄道橋の設計, PC 技術協会第 4 回シンポジウム論文集, pp.447-452, 1994.
- 19) 柳沼善明: 外ケーブルと内ケーブルとを用いた PRC はりの曲げ性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 16, No. 2, pp.1003-1008, 1994.
- 20) 柳沼善明, 与儀友一郎: 外ケーブルを用いた PRC はりのせん断破壊実験, PC 技術協会第 3 回シンポジウム論文集, pp.29-32, 1992.

- 21) 土木学会：コンクリート標準示方書[設計編]，平成3年版，1991.
- 22) 日本建築学会：プレストレスト鉄筋コンクリート（Ⅲ種PC）構造設計・施工指針・同解説，1986.
- 23) ACI Committee 318: *Building Code Requirement for Reinforced Concrete (ACI 318-89)*, 1989.
- 24) 近藤悦郎，睦好宏史，高橋博威，佐野正：外ケーブルによるせん断補強効果に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 16, No. 2, pp.1015-1020, 1994.
- 25) 伊藤忠彦，山口隆裕，池田尚治：外ケーブルを用いたプレキャストセグメントはりの曲げせん断挙動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 17, No. 2, pp.773-778, 1995.
- 26) 池田尚治，宇治公隆：鉄筋コンクリートはりのせん断耐荷挙動に及ぼす鉄筋の付着の影響に関する研究，土木学会論文報告集，第293号，pp.101-109, 1980.1.
- 27) Kordina, K., Hegger, J. and Teutsch, M.: Shear Strength of Prestressed Concrete Beams with Unbonded Tendons, *ACI Structural Jour.*/Mar.-Apr., pp.143-149, 1989.
- 28) Menn, C. and Gauvreau, P.: Externally Prestressed Concrete Slab Bridges—Model Test Results. *ACI SP-120*, pp.289-304, 1990.
- 29) Menn, C.: Unterspannung von Bruckenträgern mit gedrungenem Querschnitt [デビダーク協会若手海外技術研究会訳：床版橋への外ケーブルの適用，プレストレストコンクリート，Vol. 33, No. 4, pp.90-99, 1991.7]
- 30) 梅津健司，藤田学，玉置一清，山崎淳：外ケーブル方式二径間連続はりの曲げ終局耐力について，PC技術協会第5回シンポジウム論文集，pp.303-308, 1995.
- 31) 梅津健司，藤田学，玉置一清，山崎淳：外ケーブル方式二径間連続はりの曲げ終局耐力に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 17, No. 2, pp.743-748, 1995.
- 32) Aravinthan, T., Mutsuyoshi, H., Matupayont, S. and Machida, A.: Moment Redistribution in Prestressed Concrete Continuous Beams with External Tendons, *Proc. of JCI*, Vol. 17, No. 2, pp.761-766, 1995.
- 33) 中村克彦，紫桃孝一郎，河村直彦，井谷計男：内外ケーブル併用プレキャストセグメント連続箱桁橋の模型試験，PC技術協会第5回シンポジウム論文集 pp.321-326, 1995.
- 34) 玉置一清，新井英雄，坂井栄次，山崎淳：非線形解析プログラムの外ケーブル構造への適用と今後の標準化について，PC技術協会第5回シンポジウム論文集，pp.309-314, 1995.
- 35) MacGregor, R.J.G., Kreger, M.E. and Breen, J.E.: Strength and Ductility of a Three-Span Externally Post-Tensioned Segmental Box Girder Bridge Model, *ACI SP-120*, pp.315-338, 1990.
- 36) 山口統央，睦好宏史，M. Songkiat, 徳山清治：プレキャストブロックと外ケーブルを用いたPC部材の曲げ性状，PC技術協会第4回シンポジウム論文集，pp.25-30, 1994.
- 37) Hindi, A., MacGregor, R., Kreger, M.E. and Breen, J. E.: Enhancing Strength and Ductility of Post-Tensioned Segmental Box Girder Bridges, *ACI Structural Jour.*/Jan.-Feb., pp.33-44, 1995.
- 38) 鴻上浩明，石厚生孝，伊東佑之，沖見芳秀：外ケーブルを用いたPC橋の非線形解析について，PC技術協会第4回シンポジウム論文集，pp.19-24, 1994.
- 39) 相沢旬，沖見芳秀，小関喜久夫，徳山清治：複合非線形フレーム解析による外ケーブルプレキャストセグメントPC梁の耐力解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 17, No. 2, pp.767-772, 1995.
- 40) 新井崇裕，日紫喜剛啓，夏目忠彦，相沢旬：外ケーブル方式プレキャストブロックPC橋の非線形解析について，PC技術協会第5回シンポジウム論文集，pp.293-298, 1995.
- 41) Fujii, M., Kobayashi, K. and Sugie, I.: Strengthening of Precast Segmental T-Girders Using External Cable, *Proc. of FIP Symp. on Modern Prestressing Techniques and Their Applications*, pp.1671-1678, 1993.
- 42) Michel Virlogeux: Non-Linear Analysis of Externally Prestressed Structures [若狭忠雄，西村恒男訳：アウトケーブル構造における非線形解析（連載（1），（2），（3）），橋梁，1989.9～1989.11.]
- 43) Muller, J. and Gauthier, Y.: Ultimate Behavior of Precast Segmental Box Girders with External Tendons, *ACI SP-120*, pp.355-373, 1990.
- 44) 河村直彦，大浦隆：デビエータでの摩擦を考慮した外ケーブル方式PC桁の非線形解析，PC技術協会第5回シンポジウム論文集，pp.299-302, 1995.
- 45) 伊東昇，篠田誠，後藤精三，石川善信：首都高速道路湾岸線における外ケーブル併用PC橋の設計，コンクリート工学，Vol. 32, No. 10, pp.64-75, 1994.10.
- 46) Massicotte, B., Picard, A., Gaumont, Y. and Ouellet, C.: Strengthening of a Long Span Prestressed Segmental Box Girder Bridge, *PCI Jour.*/May-June, pp.52-65, 1994.
- 47) 小石川求，正野繁生，油野博幸，濱岡弘二：外ケーブル定着ブラケットのプレキャスト化に関する実験：PC技術協会第5回シンポジウム論文集，pp.315-320, 1995.
- 48) Beaupre, R.J., Powell, L.C., Breen, J.E. and Kreger, M.E.: Deviator Behavior and Design for Externally Post-tensioned Bridges, *ACI SP-120*, pp.257-288, 1990.
- 49) 阿保進，桑原晴雄：首都高速道路横浜羽田空港線大師PC橋補強工事について，プレストレストコンクリート，Vol. 22, No. 2, pp.50-58, 1980.4.
- 50) 酒井和廣：美陵高架橋の補修，橋梁と基礎，Vol. 17, No. 8, pp.86-89, 1983.
- 51) 阿保進，杉浦征二：PC橋の補修，橋梁と基礎，Vol. 17, No. 8, pp.94-99, 1983.
- 52) Klaiber, F.W., Dunker, K.F. and Sanders, W.W.: Strengthening of Existing Bridges (Simple and Continuous Span) by Post-tensioning, *ACI SP-120*, pp.207-228, 1990.

- 53) Osborn, A.E.N. and Preston, H.K.: Post-tensioned Repair and Field Testing of a Prestressed Concrete Box Beam Bridge, *ACI SP-120*, pp.229-256, 1990.
- 54) 中井三夫：外ケーブルによる桁および橋脚の補強，プレストレストコンクリート，Vol. 32, No. 5, pp.27-36, 1990.9.
- 55) 滝沢義郎，菊池正剛，榎本勝利：アウトケーブルによる横桁の補修方法，PC 技術協会第 1 回シンポジウム論文集，pp.195-198, 1990.
- 56) 睦好宏史：FRP を外ケーブルに用いた PC 梁の挙動，土木施工，32 巻，6 号，pp.51-56, 1991.6.
- 57) 本田英尚，植野晃，近藤真一，藤田学：外ケーブルの振動実験について，PC 技術協会第 2 回シンポジウム論文集，pp.67-72, 1991.
- 58) 山口良弘，沢登善誠，三輪泰之：外ケーブルを使用した既設 PC 橋の補強に関する実験および解析，PC 技術協会第 2 回シンポジウム論文集，pp.339-344, 1991.
- 59) 一枿久允，牧副初，菊池正剛：プレストレッシング工法を用いた構造物の補強，JCI シンポジウム「プレストレス原理・技術の有効利用」論文集，pp.83-90, 1991.7.
- 60) 和泉公比古，狩生輝巳，久保田清数：アウトケーブルによる PC 桁の補強に関する研究，JCI シンポジウム「プレストレス原理・技術の有効利用」論文集，pp.91-96, 1991.7.
- 61) 津野和男，和泉公比古，山田実：外ケーブルによる PC 桁の補強効果に関する研究，プレストレストコンクリート，Vol. 34, No. 1, pp.41-48, 1992.1.
- 62) 折笠晴海，斎藤雄一，佐々木徹，徳丸晋：外ケーブルによる補強効果に対する測定と解析，PC 技術協会第 5 回シンポジウム論文集，pp.357-362, 1995.
- 63) Massicotte, B. and Picard, A.: Monitoring of a Prestressed Segmental Box Girder Bridge During Strengthening *PCI Jour.*/May-June, pp.66-80, 1994.
- 64) Tattoni, S.: The Structural Refurbishment of a R.C. Highway Bridge by External Tendons—A Case History, *Proc. of Sixth Int. Conf. on Structural Faults and Repair*, pp.183-189, 1995.
- 65) Sano, M., Tokumitsu, S., Maruyama, K. and Mut-suyoshi, H.: Retrofit of Damaged PC Beams by External Prestressing Cables, *Proc. of FIP Symp. on Modern Prestressing Techniques and Their Applications*, pp.923-926, 1993.
- 66) Jungwirth, D., Breidenbruch, R., Hochreither, H. and Nutz, O.: External Prestressing, *Proc. of FIP Symp. on Modern Prestressing Techniques and Their Applications*, pp.853-860, 1993.
- 67) 小石川求，正野繁生，吉田光雄，土取義和：沢良宜高架橋（外ケーブルによる桁連結工事）の施工と実橋測定，PC 技術協会第 5 回シンポジウム論文集，pp.363-368, 1995.
- 68) 渡辺泰行，丸山和良，丸井俊介：外ケーブル方式による PC 単純桁橋連結化の施工について，PC 技術協会第 5 回シンポジウム論文集，pp.369-372, 1995.
- 69) 山田金喜，山口慶三，北川琢也：日本道路公団姫路バイパス曾根高架橋橋梁補強工事 施工報告，PC 技術協会第 5 回シンポジウム論文集，pp.377-380, 1995.
- 70) Aboutaha, R.S. and Burns, N.H.: Strengthening of Prestressed Concrete Composite Beams Using External Prestressed Stirrups, *PCI Jour.*/July-August, pp. 64-73, 1994.
- 71) 例えば，森元峯夫：外ケーブル方式による PC 構造物の変遷，プレストレストコンクリート，Vol. 32, No. 5, pp. 8-16, 1990.9.
- 72) 睦好宏史：外ケーブル PC 構造物の現状と問題点，コンクリート工学，Vol. 31, No. 8, pp.24-35, 1993.8.

(1996.5.30 受付)