

技術会議報告 T7

プレストレストコンクリート斜張橋における新しい技術

宮本 文穂*

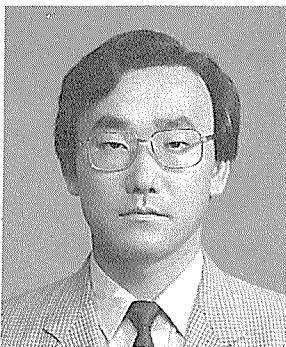
1. セッションの全体概要

本テクニカルセッションでは、プレストレストコンクリート（以下 PC）斜張橋の最新技術に関する合計 15 編の発表があった。その内訳は、日本 11 編、フランス 1 編、スイス 1 編、ノルウェー 1 編、アメリカ 1 編となっており、日本からの発表が約 7 割を占め、この分野での日本の技術レベルの高さを示すこととなった。PC斜張橋は、構造の合理性あるいは構造美といった特徴を兼ね備えていることから、長大化技術の開発、施工の合理化にとどまらず、景観設計、材料選択、新構造の追求など多様な方面からの検討が必要となる。表-1 は、今回の会議で発表された論文の内容を概略分類したものであるが、これらからも広範囲な分野にまたがっていることがわかる。このように、PC 斜張橋の設計パラメータは多くなるため、設計者の高度な裁量に基づく最適な選択が要求されることになる。

表-1 Topic-7 (PC 斜張橋関連) での発表論文内容分類

内容分類	論文数 (かつ内は海外論文数)
長大化技術に関するもの	2 (1)
構造細部を含む静的・動的挙動に関するもの	6
施工の合理化に関するもの	4 (2)
景観設計に関するもの	3
耐久性向上に配慮した材料選択に関するもの	2 (1)
新構造の追求を視野に入れたもの	2 (1)

注) 内容の重複しているものは別々に数えた。



* Ayaho MIYAMOTO
神戸大学
工学部 助教授

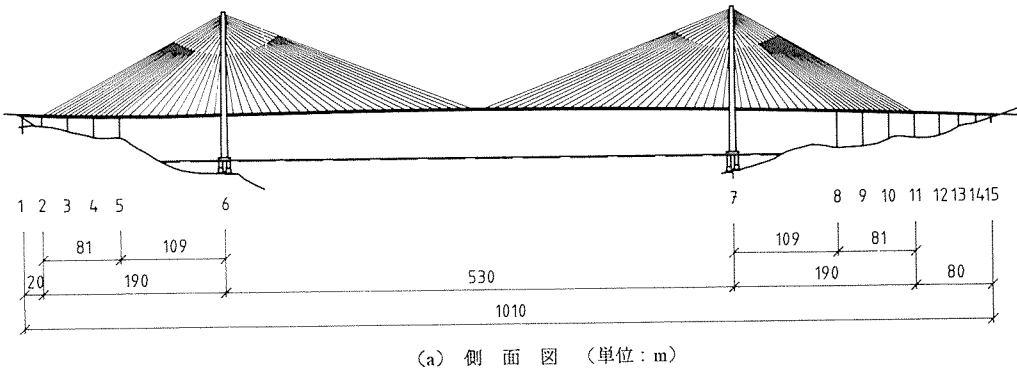
本セッションは、会議の第一日目の午後に開催されたこともあってほぼ満員になり、日本における PC 斜張橋への関心の高さがうかがわれた。特に、海外からの発表が美しいスライド写真を使用しての、施工の合理化とからめた長大化技術および景観設計の実際に関するものが多かったのに対して、国内からの発表は、上記のテーマのほかに、耐震性・耐風性などの動的挙動の改善効果を目的としたもの、斜材定着部、主塔あるいは構造全体としての終局状態における安全性評価に関するもの、斜張橋施工時の各種制御システムの構築に関するものなど、今後の PC 斜張橋の発展の基礎となる重要な研究テーマに関するものが多かった。なお、各発表者に対する Chairman の評価を記入して頂いたが、日本人の発表に対して、good, excellent の評価点の付けられたものが多く、研究内容はもちろん、発表方法、発表態度の優れたものが多くなってきていることが感じられた。

2. PC 斜張橋の現状と技術の動向

本セッションでは、上述のように多岐にわたるテーマに関する発表が行われ、特に、日本からの発表は、架設中および計画中のものを含めて代表的な PC 斜張橋（呼子大橋、新猪名川橋、碓氷橋、南田原橋、青森大橋、南大阪北橋梁）をほとんど網羅するものであった。これらの橋梁に関しては、当協会発行の「プレストレストコンクリート」をはじめ、種々の国内学・協会誌上ですでに詳細な記事として公表されているので、ここでは主として海外からの 3 編の発表論文について紹介することによって、PC 斜張橋の現状と今後の技術動向を探ってみたい。

2.1 Skarnsundet 橋（ノルウェー）

この橋梁は、ノルウェーの Trondheim 市北方において 1989 年に架設が始まり 1991 年 12 月に完成した、世界最長スパンで、しかも最もスレンダーな主桁断面を有する PC 斜張橋である（写真-1 参照）。図-1 (a), (b) は、本橋の側面図および主桁断面図を示したものであり、中央スパン $L=530$ m（全長 1 010 m）に対して、桁高 $H=2.15$ m ($L/H=246.5$)、全幅 $B=13$ m



($L/B=40.8$) の非常にスレンダーな構造となっている。ちなみに、本橋完成前の世界最長の PC 斜張橋は、スペインの Barrios de Luna 橋で、中央スパン $L=440$ m (全長 649 m) に対して、桁高 $H=2.3$ m ($L/H=191.3$)、全幅 $B=22.5$ m ($L/B=19.6$) を有するものであった。

さらに驚異的な記録は、本橋の施工期間が 32 か月と短いことである。

このような、一見無謀とも思える技術的挑戦を可能とした背景は何かを、設計段階および架設工法を中心に探ってみたい。

まず、初期の設計条件として中央スパンは 530 m とされた。このため、タワーと主桁の形状の選定が耐風(空力)安定性の面から重要となった。100 年間の再現期間を設定した場合の 10 分間平均風速が 38.5 m/s と定められ、種々の調査研究の結果、主桁は、中央に隔壁を有する三角形の箱桁断面が選ばれ、その結果、中央

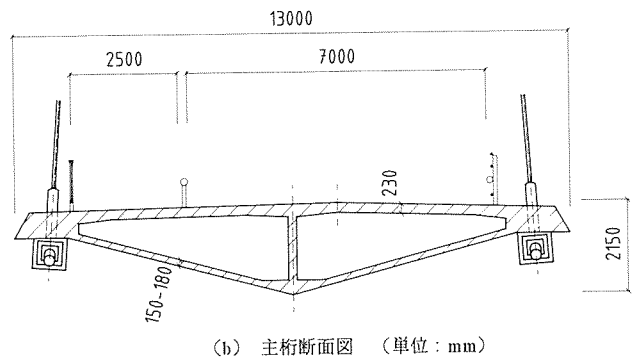


図-1 Skarnsundet 橋の概要

スパンでの補強筋量は約 225 kg/m^3 となった(図-1 (b) 参照)。また、タワーは、図-2 (a) に示すように海面上の高さが 152 m の A 形フレーム構造で、タワー側での斜材定着部は、図-2 (b) に示すような独立したループ状のケーブルによって補強がなされることになっ

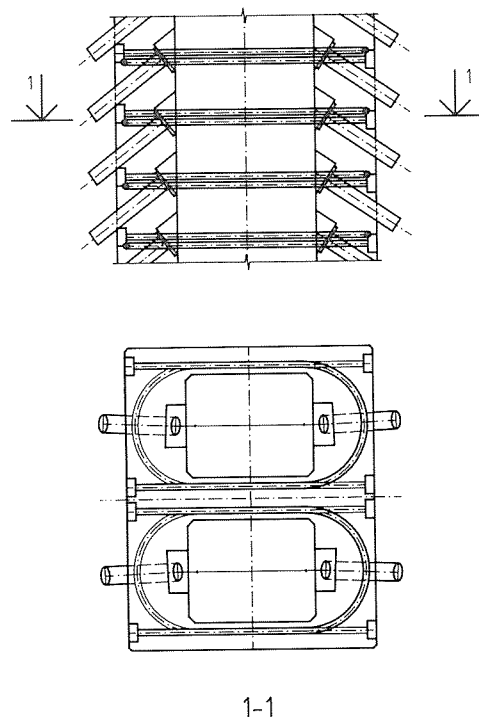
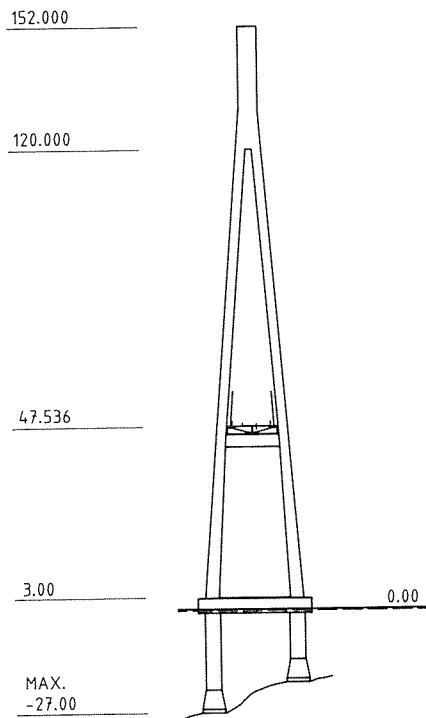


図-2 Skarnsundet 橋タワーの形状とタワー側での斜材定着部の詳細



写真-1 Skarnsundet 橋の全景

た。

図-1 (b) の主桁断面に対する風洞実験の結果、0.6% の構造減衰における風向 0 度付近の安定性は風速 100 m/s を超えるものであった。また、風向 +5 度での最低フラッター風速は 60 m/s 以上となった。

以上のように設計された形状寸法を有する PC 斜張橋の風荷重に対する全体模型実験が、図-3 に示す Stage

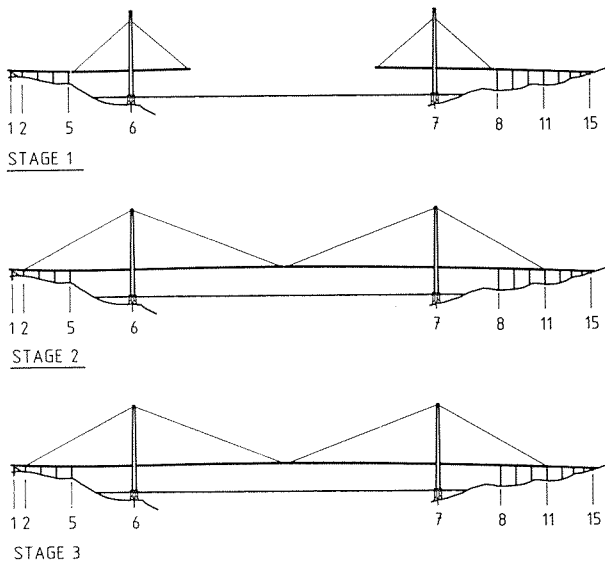


図-3 架設段階 (Stage I, Stage II, Stage III)

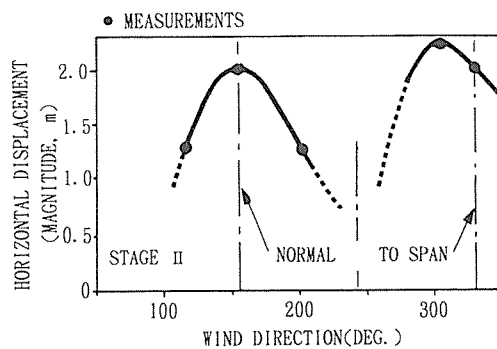


図-4 Stage II における風荷重作用時の主桁水平最大変位特性の全体模型実験結果

I および II の架設状態を想定して実施された。その結果は図-4 に示すとおりであり、主桁水平変形の最大値が約 15 度の角度を有する NW 風向で生じることが明らかとなった。これらの結果は動的解析結果とも一致している。

次いで、架設工法であるが、架設地点での基礎岩盤が十分強固であったため、トレミー法によって海中コンクリートを打設し、タワーは連続スリップフォームでグレード C 45 の高強度コンクリートを打設した。その後の桁架設は、図-5 に示すように重量 154 tf の 2 基の移動作業車を使用した張出し架設工法を採用し、長さ 10 m のセグメント (重量 160 tf) を最初は 10 日間隔で、その後 5 日間隔で順次張り出していき、702.5 m の総延長を 8.5 か月間で架設完了した。

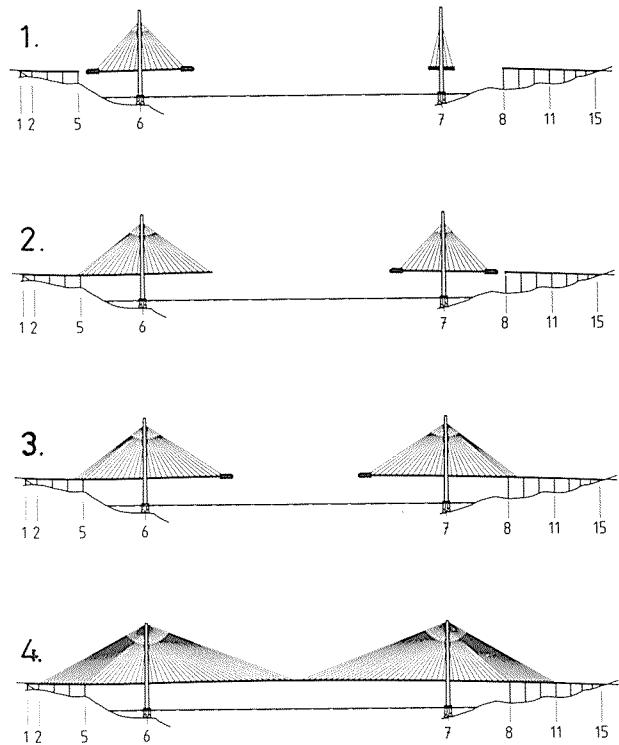


図-5 張出し架設工法の手順

2.2 プレキャスト部材の集成 (Progressive assembly) 工法による架設 (チェコ、アメリカにおける例)

PC 斜張橋建設をより経済的にするために、主桁架設に軽量プレキャスト部材の集成工法を開発し、3 橋の PC 斜張橋に適用している。

まず、チェコの Svretka 川に架かる橋梁は、50 m スパンの比較的小規模の傾斜した主塔を有する PC 斜張橋である。この橋梁の特徴は、図-6 に示すように 2 本の橋軸方向のプレキャスト端主桁を有し、これにプレキャスト中実スラブを組み合わせ、ポストテンション方式で

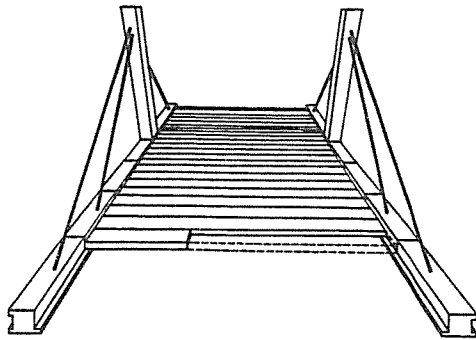


図-6 Svretka 川に架かる PC 斜張橋の概要

縦締めおよび横締めをすることによって集成 (Assemble) したところにある。

橋軸方向端主桁は 1.4 m 幅、0.9 m 高さを有する長さ 5.0 m のマッチキャストセグメントから成っており、接合面にはエポキシ樹脂が塗布されている。この主桁には、コーナーに配置された 4 本のポストテンション鋼材でフルプレストレスに相当するプレストレス力が導入されている。一方、床版を構成する中実部材は、幅 1.0 m、長さ 5.0 m でその厚さは端部で 0.4 m、中央部で 0.5 m のプレキャスト版で、端主桁との接合部では図-7 に示すような構造になっており、パーシャルプレストレスに相当するプレストレス力が導入されている。

主桁および床版の架設は、図-8 に示すように、a) 端主桁を張出し架設し、ポストテンション方式で、既設部を接合する、b) 斜材を設置し、斜材張力を導入する、c) プレキャスト床版を設置し、端主桁とポストテンション方式で接合する、d) 斜材張力を調整する、とい

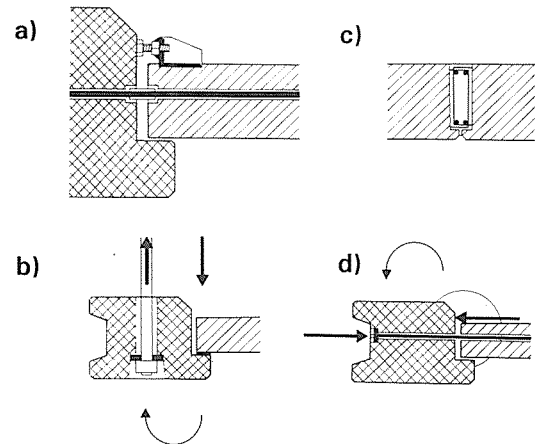


図-7 プレキャスト版と端主桁との接合部構造

うサイクルを繰り返すことにより行う。斜材設置時および横締め力導入時には、図-7 b), d) に示すように接合部にねじりモーメントが生じるので、ナットとスクリーウを組み合わせた鋼製ブラケット(図-7 a))を取り付けてこれに抵抗させ、場所打ちコンクリートを打設する。

次に示すチェコの Elbe 川に架かる、中央スパン 123.2 m、幅員 31.8 m の 3 径間連続 PC 斜張橋は、脊柱を有する箱桁 (Spine box girder) とプレキャストストラットで支えられた場所打ちコンクリート張出し板で構成される橋梁である。図-9 (a)~(c) および写真-2 にその詳細を示すが、床版上を移動できる特製クレーンを用いてプレキャストセグメントを順次集成していく張出し工法が適用された。なお、アプローチスパンでは、図-9 (b) に示すような外ケーブル方式がプレキャストセグメントの集成に利用されている。

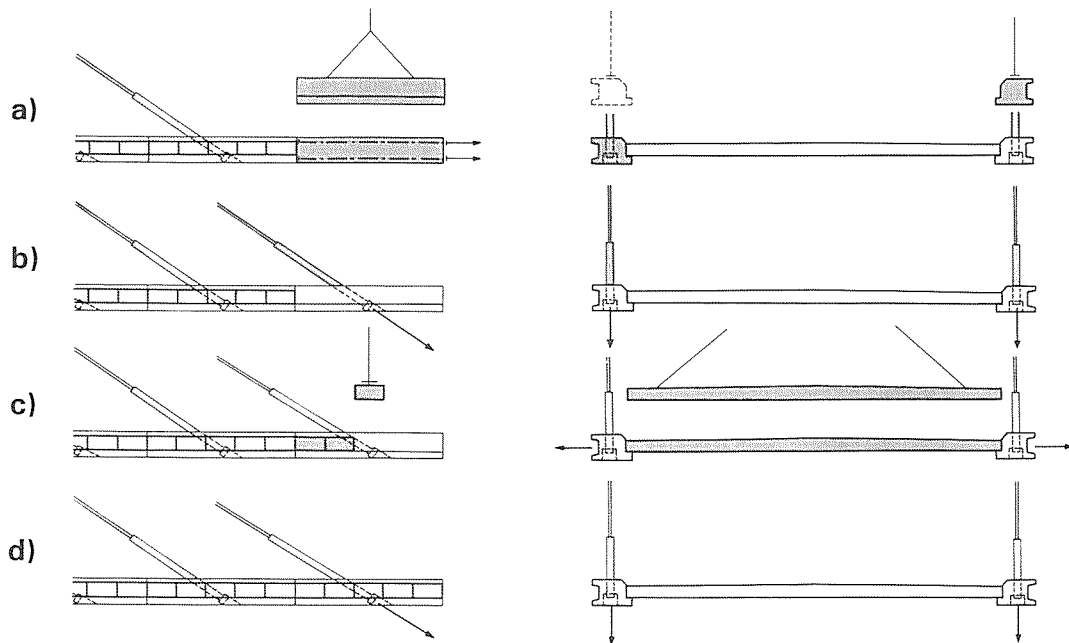
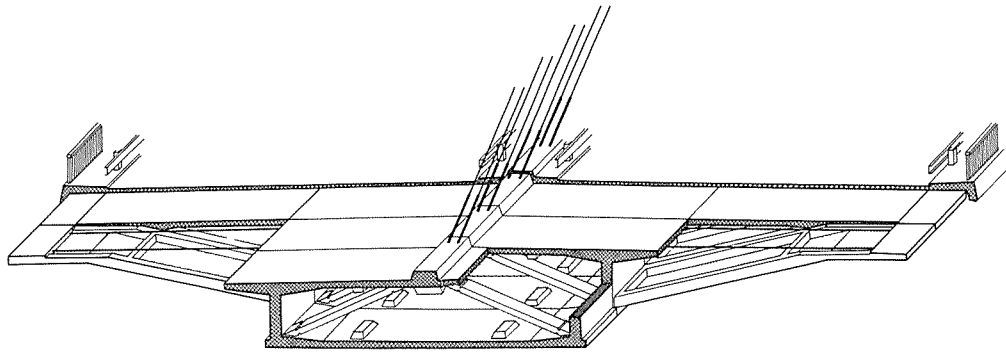
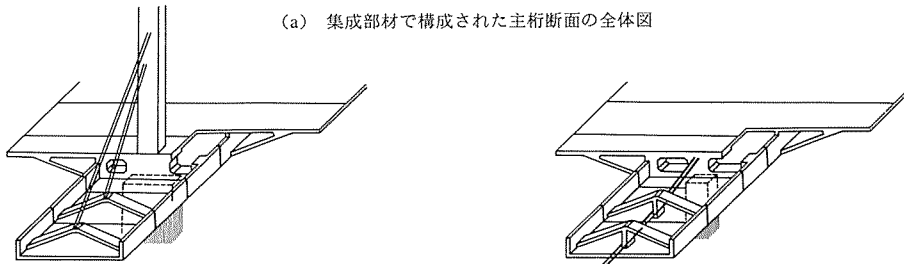


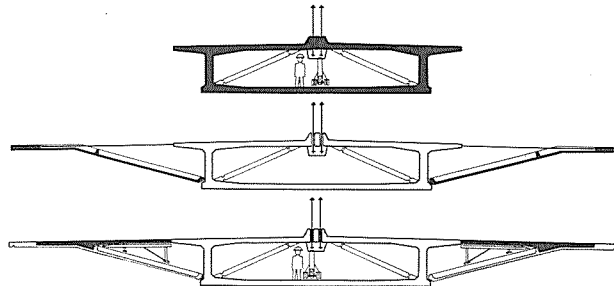
図-8 プレキャスト版および端主桁の架設順序



(a) 集成部材で構成された主桁断面の全体図



(b) 集成部材で構成された主桁断面内の斜材および外ケーブルの配置状況



(c) 集成部材で構成された主桁断面の集成順序

図-9 脊柱を有する箱桁とプレキャストストラットで支えられた張出し板の集成で構成された橋梁

主桁部材の集成は、まず、マッチキャストで作製した脊柱を有する箱桁を架設し、張出しストラットの設置、張出し部の型枠設置および打設という順序で行う。箱桁セグメントの寸法は幅 15.0 m、長さ 2.2 m、高さ 2.5 m であり、重さは 45 tf となっている（写真-3 参照）。また、写真-4 および写真-5 に示すように、端部をリブで補強したスラブ形式のプレキャストストラット（重量約

8 tf）が主桁下フランジにあらかじめ設けたコーベルに設置される。これらのストラット間にはエポキシ樹脂を充填している。張出し部の床版は場所打ちであり、その長さは 11 m で、箱桁とはプレストレスと鉄筋のラップジョイントの併用によって結合する。これらの床版は、内ケーブルによる縦締めおよび横締めプレストレスの導入によって接合される。



写真-2 チェコの Elbe 川に架かる PC 斜張橋の架設状況

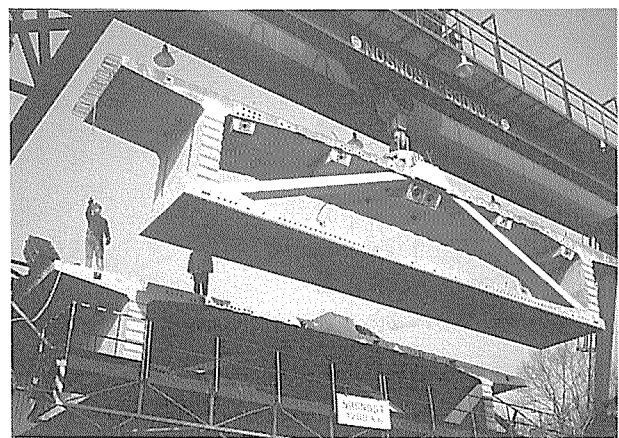


写真-3 脊柱を有する箱桁セグメントの接合状況



写真-4 端部をリブで補強したスラブ形式のプレキャストストラットの設置状況

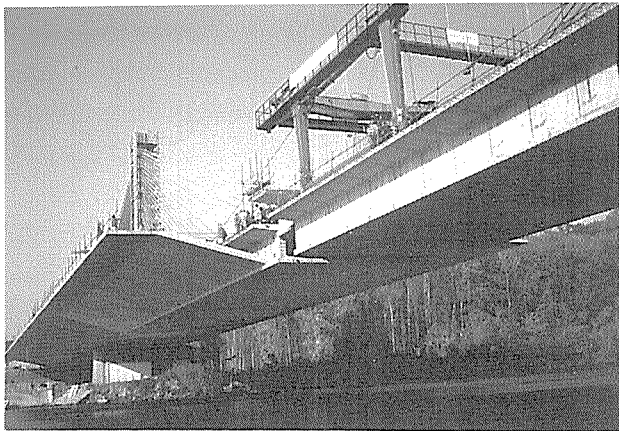


写真-5 プレキャストストラットの設置状況全景

箱桁セグメントは、PC タイロッドで補強されており、上床版中央に定着された斜材張力の鉛直分力は、このタイロッドにより、ウェブ、床版に伝達される構造となっている（図-9 (c) 参照）。

架設は、図-10 に示すように、まず、トラッククレーンを使用して側径間および中央径間側の斜材定着のない箱桁ブロックをエポキシ樹脂塗布後プレストレスを導入して接合していき、その後、トラッククレーンで鋼製主塔を立て込み、斜材を張りながらプレキャストセグメントをエレクションクレーンで順次張り出していく。これらとほぼ併行して、上述の手順でプレキャストストラットをトラッククレーンで設置していき、張出し床版の打設を行っていく。

最後に、アメリカ、ミシシッピー川に架かるスパン 360 m の PC 斜張橋にも、上述の場合とほぼ同様なプレキャスト部材の集成工法が適用された。すなわち、図-11 (a)～(c) に示すように、脊柱を有する台形状の単

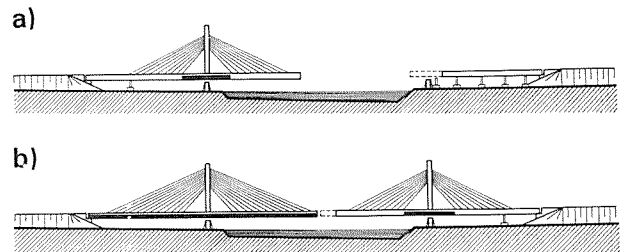


図-10 クレーンによる張出し架設の手順

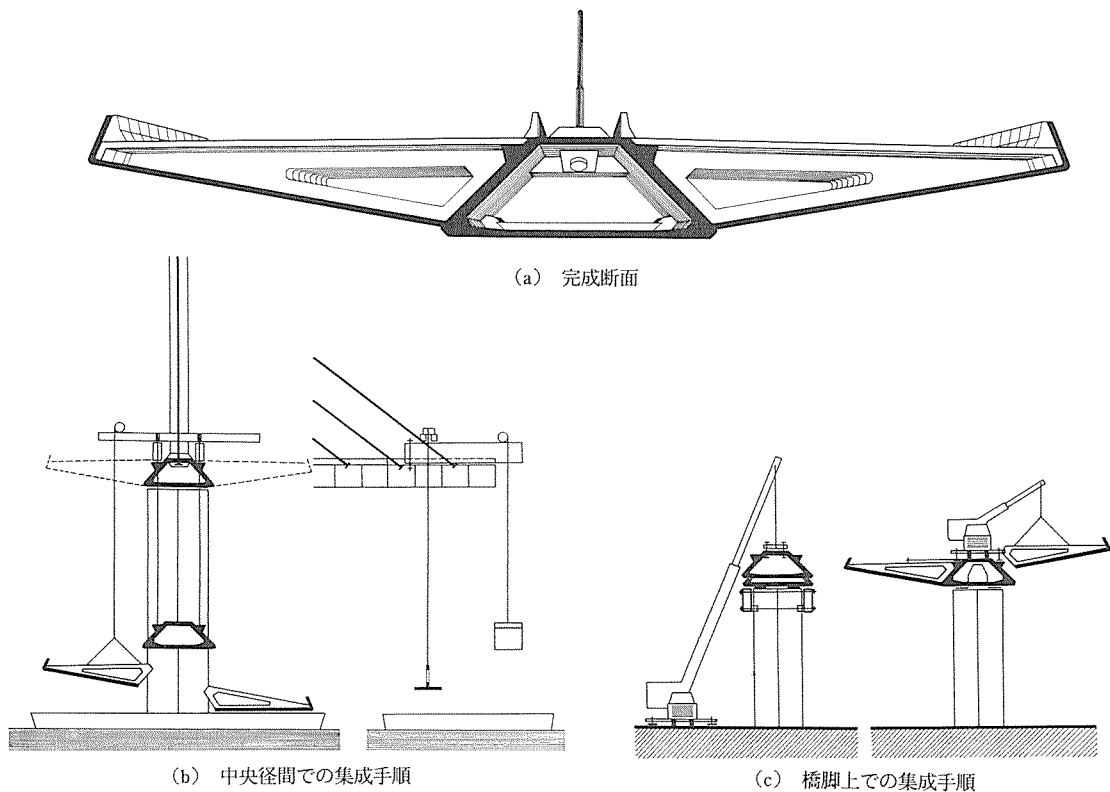


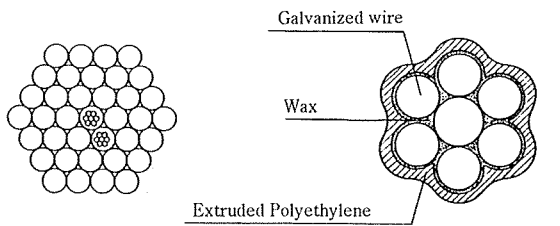
図-11 プレキャスト部材による主桁の集成手順

箱桁とプレキャストストラットで支持された張出し床版を、トラッククレーンおよびトラベラークレーンで集成していき、最後に全体構造に対して外ケーブルによるプレストレスの導入および斜材張力の調整を行う手法が適用された。

2.3 Guadiana 橋および Arade 橋

Guadiana 橋は、中央スパン 324 m を有するポルトガルとスペインの国境に架かる、また、Arade 橋は、中央スパン 256 m を有するポルトガル南部に架かる PC 斜張橋であり、両橋梁に対して耐久性の観点から特徴のある斜材および斜材定着システムが適用された。なお、同様の定着システムがノルマンディ橋にも適用されている。

図-12 は、引張強度 260 kN の溶融亜鉛メッキワイヤを束ねて、個々にポリエチレン管とワックスで防錆保護したストランドをさらに束ねたストランドを示したものである。ここで、ポリエチレン管の色は、Guadiana 橋では黒、Arade 橋では白としている。



束ねられたストランド 個々に防錆処理されたストランド

図-12 斜材断面の構成

Guadiana 橋での特徴としては、図-13 に示すように、両アンカレッジの張力伝達領域にガイドデビエータを配置したことである。これによって、活荷重および風荷重による斜材の角度変化によって発生する、アンカレッジにおける主桁および主塔の横変形により PC 斜材に作用する付加曲げを防止することが可能となる。緊張側アンカレッジの構造詳細を図-14 に示すが、アンカレッジ内での金属どうしの接触のない、しかも防水処置の十分な定着システムとなっているのみならず、緊張お

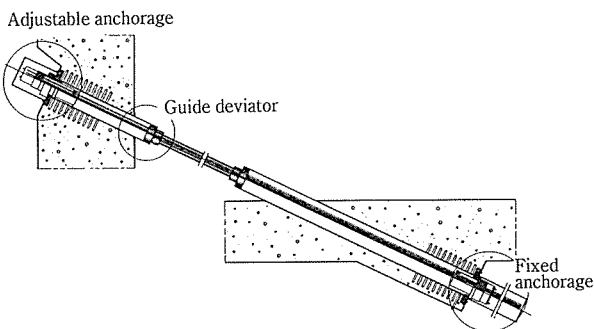


図-13 Guadiana 橋で使用された定着端の詳細

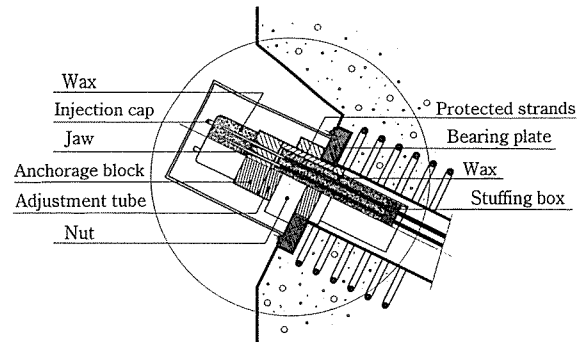


図-14 緊張側アンカレッジの構造詳細

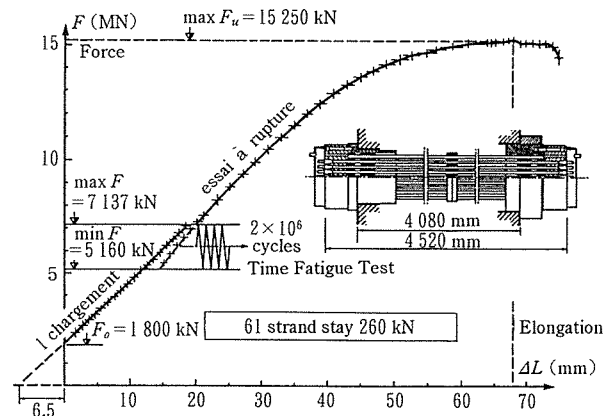


図-15 緊張システムの引張試験結果

よび再緊張が随時可能な構造となっている。図-15 は、この緊張システムの引張試験および 200 万回疲労試験後の再引張試験結果を示したものであるが、強度的な面からの問題は見あたらない。さらに、この定着システムの耐久性試験を海洋噴霧雰囲気下での促進試験などを利用して実施しているが、この点からの問題もないようである。

一方、Arade 橋での特徴としては、架設中に構造的、材料的な種々の改良が加えられたが、中でも主塔のサドル部が特徴として挙げられる。主塔サドル部における要求性能としては、①主塔の両側で異なる張力を受けられること、②必要に応じて取替えが可能なこと、③繰返し荷重に対して必要な疲労強度を有していること、などを満足することが必要となる。これらの要求性能を満たすべく設計されたサドル部の構造詳細を図

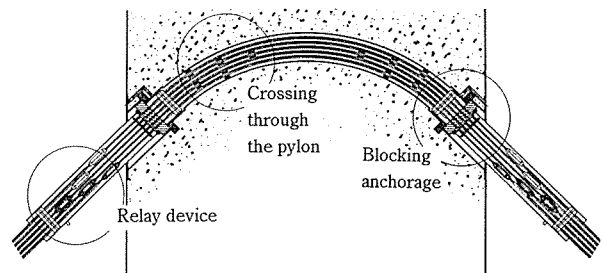
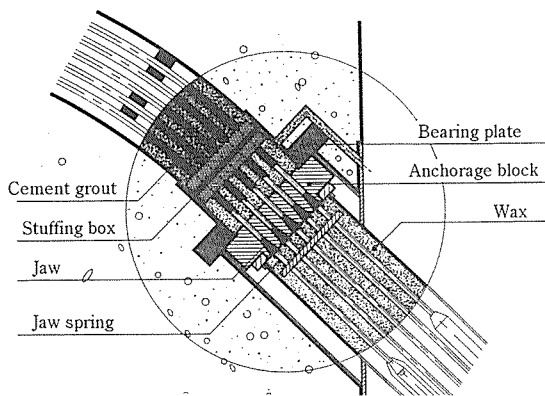
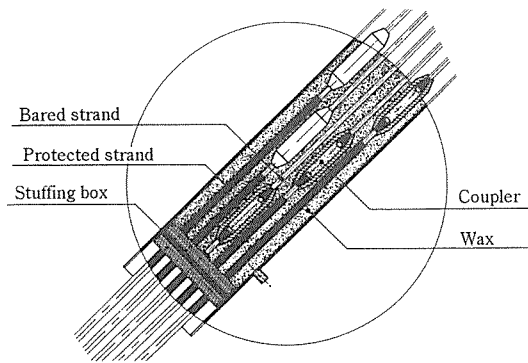


図-16 Arade 橋に使用されたサドルの構造詳細

-16 に示す。すなわち、ブロッキングアンカレッジ (Blocking anchorage) と中継デバイス (Relay device) を組み合わせて上述の要求性能を満足させた構造としている。ここで、ブロッキングアンカレッジの詳細は、図-17 (a) に示すとおりであり、約 1 mm のジョースプリングの移動量により応力変動が小さく抑えられ、サドル両端での張力差を安全に吸収するとともに、2つのアンカレッジブロック間の応力をほぼ一定に保つことによって疲労問題を解決している。一方、中継デバイスの詳細は、図-17 (b) に示すとおりであり、カップラーによるストランドの中継が可能な構造となっている。



(a) ブロッキングアンカレッジ



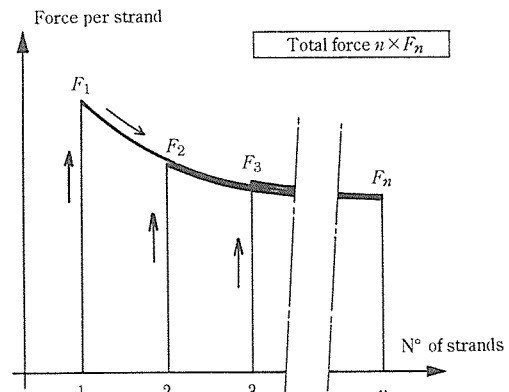
(b) 中継デバイス

図-17 ブロッキングアンカレッジと中継デバイスの詳細

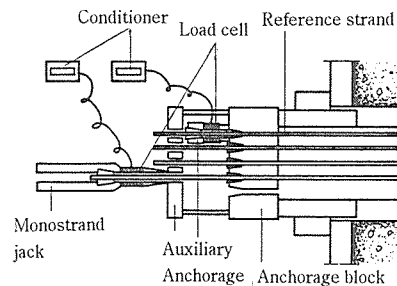
以上のような構造を有するサドルへの、斜材張力が均一となるような斜材取付け方には、アイソテンション法 (既特許取得) と呼ばれる緊張定着方法が使用された。この手法の手順としては、まず、最初に第一ストランド (あるいは参照ストランドとも言う) に計算どおりの張力が導入される。このときの導入力はロードセルで計測され、所定の導入力となったとき仮設アンカー装置

がこのロードセルの後ろ側に設置される。その後、順次ストランドを緊張する間にジャッキの油圧力と、最初に導入したストランド導入力が比較され、これらの応力が等しくなるように調整されていく。最終的な導入応力の値が計算による予測結果と比較後、確認され、斜材ケーブルの永久アンカーに導入力が移される。

このような緊張過程および緊張装置を示したものが、図-18 (a), (b) であり、非常に軽量で、しかも比較的小型の緊張装置および定着装置で張力調整、ストランドの交換などを可能としている。



(a) 斜材張力の均一化の過程



(b) アイソテンション法の緊張装置

図-18 アイソテンション工法の原理

3. あとがき

本四連絡橋の完成によって我が国の橋梁設計・架設技術は、世界に誇るに値するものを有するに至ったにもかかわらず、PC斜張橋に限って言えば世界のレベルに遠く及ばないのではないかと懸念があったが、本セッションでの論文を改めて読んでみて世界に誇れる規模・形式のPC斜張橋の完成も間近いと確信が得られたと考えている。本稿での不十分なまとめが、今後のPC斜張橋の発展につながれば幸いである。