

(61) 内外ケーブル併用プレキャストセグメント工法を適用した添川高架橋の設計

日本道路公団 仙台建設局 秋田工事事務所 佐藤 信雄
 日本道路公団 仙台建設局 構造技術課 渡辺 将之
 鹿島建設株式会社 機械部 機械課 鶴岡 松生
 鹿島建設株式会社 土木設計本部 第二設計部 正会員 ○山本 徹

1. はじめに

秋田自動車道秋田南IC~秋田北ICに位置する添川高架橋は、4径間連続PC箱桁橋、9径間連続PC床版橋及び2径間連続PC箱桁橋で構成される橋長576.6mの橋梁であり、平成9年度の供用開始をめざし現在急ピッチで工事が進められている。このうち橋長約93mの2径間部については、工期短縮と省力化の観点から近年注目を集めている内外ケーブル併用のプレキャストセグメント工法が採用された。セグメント製作はショートラインマッチキャスト方式で行い、架設は総支保工を用いて行う。本報文では本橋の設計上の特徴的事項とセグメント製作装置の概要について報告する。

表-1 主要工事数量(2径間部)

	仕様	単位	数量	適用
コンクリート	$\sigma_{ck}=500\text{kgf/cm}^2$	m ³	816	主桁
鉄筋	SD345	tf	111	主桁
PC鋼材	SWPR7B 19S15.2	tf	11.8	外ケーブル
PC鋼材	SWPR7B 12S12.7	tf	11.8	内ケーブル
PC鋼材	SWPR1 1S21.8	tf	6.69	床版横締
PC鋼材	SWPR1 1S21.8	tf	1.05	横桁横締

2. 工事概要

2径間部の主要材料を表-1に、及び橋梁諸元を以下に示す。

<橋梁諸元>

橋名 添川高架橋
 路線名 秋田自動車道 東和秋田線
 道路規格 第1種2級B規格
 活荷重 B活荷重
 構造形式 2径間連続PC箱桁橋
 橋長 92.910 m
 支間 45.955 m+45.940 m
 有効幅員 10.490 m
 平面線形 R=2700 m
 縦断勾配 i=0.62 %
 横断勾配 i=2.00 % (片勾配)

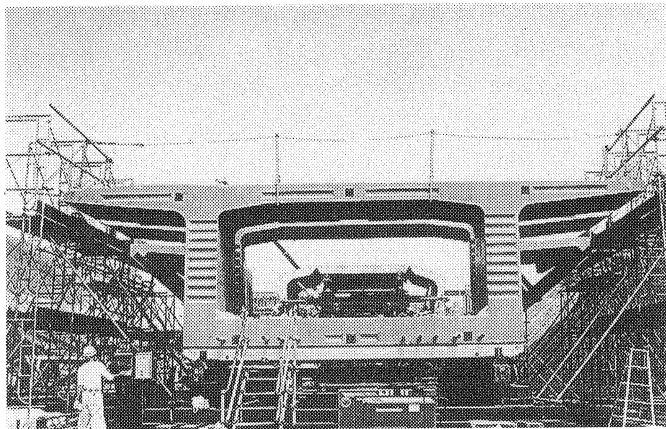


写真-1 プレキャストセグメント製作状況

3. 設計概要

3.1 セグメント形状

セグメント長は、内ケーブル突起定着部の鋼材配置や無筋となるセグメント継目の数を減らすという観点からは大きい方が望ましく、また、製作装置や揚重設備を考えると小さくして重量を軽くした方が施工性に優れている。本橋では、このような一般的な概念の他に、さらにショートラインマッチキャストの際の温度変化によるマッチキャストセグメントの変形を考慮した。これは、新設セグメントの硬化熱でマッチキャストセグメントに温度勾配が生じて弓形に変形し、新設セグメントのマッチキャスト面がその影響を受けるといものである。過去の事例によれば、セグメント幅(B)とセグメント長(L)の比が $B/L > 9$ であればほとん

どこの現象が観測され、逆に $B/L < 6$ ではほとんど観測されていない¹⁾。この報告を基に本橋では最小セグメント分割長をセグメント幅11.2mの約1/6以上になるよう2mとし、このセグメント長を部材厚が厚い支点部近傍のセグメントや、デビエータと内ケーブル定着突起が付く偏向部セグメントに適用し、標準部材厚部はセグメント重量がこれとほぼ等しくなるよう3mとした。その結果、3mの標準セグメントを20個、部材厚が厚いセグメントを8個、及び偏向部セグメントを4個組み合わせ、合計32セグメントとした(最大セグメント重量は54tf)。

また、 $R=2700$ mの平面線形に対するセグメント製作形状としては、プレキャストセグメントのウェブは直線で通し、張出し床版の端部に厚さが一定な直線部を設け、その長さを変化させることによって道路線形を曲線に摺り付けるものとした。さらに径間ごとに生じる折れ角は橋脚上に場所打ち部を設け、ここで吸収する構造とした。

PC鋼材については内外ケーブルを併用する構造とし、全内ケーブルとした場合の総鋼材量を目安に、曲げ破壊安全度を満足する範囲で出来るだけ外ケーブル比率を大きくとった結果、縦締め鋼材の重量比で50%の外ケーブル比率となった。さらに経済性から外ケーブルには19S15.2を採用した。また、偏向部の位置は、全プレストレスによる曲げモーメントの正負交番点、設計荷重による曲げモーメントの正負交番点と概ね一致するようにセグメントを配置した。

内ケーブルについては、部材厚に影響を与えないようウェブには配置せず、12S12.7を上床版及び下床版に直線配置するものとした。また、定着位置を偏向部や横桁位置に合わせることで、特殊な形状のセグメントが少なくなるように配慮した。図-1に構造一般図と鋼材配置図を示す。

3. 2 構造解析モデル

本橋の線形解析モデルは、荷重作用による外ケーブルの張力変化や、コンクリート部材のクリープ・乾燥収縮の影響を構造解析段階で評価できる部材評価法とした。主桁は曲げ及び軸剛性を有する梁要素、外ケーブルは軸剛性のみを有するトラス要素、横桁及び偏向部は剛なダミー部材として扱っている。

3. 3 曲げ破壊耐力

外ケーブル方式PC橋では、部材断面の曲げ耐力算定において、外ケーブルの構造非線形性が無視できないと考えられるため、(財)高速道路調査会の「PC橋の新しい構造事例に関する研究報告書」²⁾(以下「ガイドライン」)で提案されている外ケーブルの張力増加を考慮しない通常の検討に加え、幾何学的非線形と材料非線形を同時に考慮した複合非線形解析を実施し、安全性を確認した。前者は、対象断面における外ケーブル位置が相対的に変化しないものとし、更に外ケーブル緊張材を有効プレストレス導入状態で一定とみなして曲げ耐力を評価する方法である。この手法によれば、内外ケーブル併用の場合でも破壊抵抗曲げモー

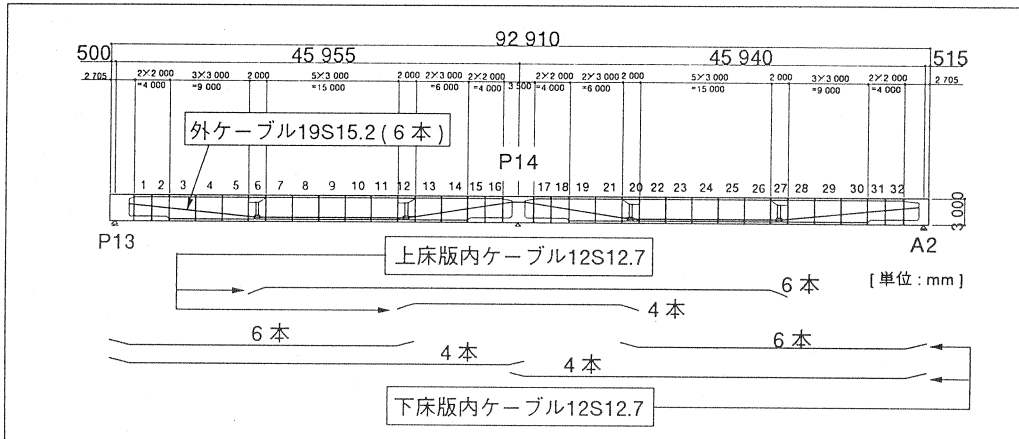


図-1 構造一般図と鋼材配置図

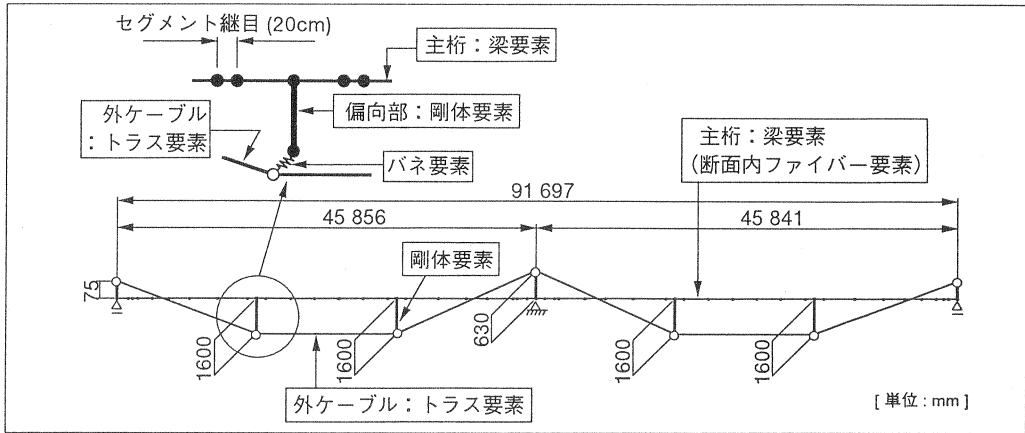


図-2 複合非線形解析モデル (SLAP³¹)

ントがこれまでと同様の手法で算出でき、緊張材の位置変化の影響を無視すれば設計的には安全側の値が得られ、その最小安全率は支間中央付近で1.03となった。また後者は、主桁部材を梁要素 (断面内はファイバー要素) として、外ケーブル部材を曲げ剛性のないトラス要素としてモデル化を行い (図-2)、構造系全体として幾何学的な非線形性を考慮するとともに、外ケーブルの張力変化も考慮して曲げ耐力を評価する方法である。この解析により、外ケーブルの引張応力増加による曲げ耐力への寄与が評価でき、P- δ 曲線、M- ϕ 曲線による構造系の靱性評価や、プレキャストセグメント継目部の非線形挙動評価も行える。解析では、中間支点部において塑性ヒンジが形成された後に、支間中央部の圧縮縁コンクリートひずみが終局ひずみ 3500μ に達した時点が構造系の破壊 (終局耐力) と位置づけた。解析の結果、主桁コンクリートの圧壊は、セグメント継目部 (無筋部) で生じ、このときの終局荷重は死荷重と活荷重の合計値の2.08倍となり、道路橋示方書¹⁾で規定する終局荷重作用時の荷重組合わせの係数1.7を上回る結果となった。また外ケーブルの張力増加は約 $40\text{kgf}/\text{mm}^2$ となり (図-3)、曲げ耐力増加への外ケーブル張力増加の寄与が確認された。一方この時、内ケーブルは降伏しており、M- ϕ 曲線 (図-4) より、十分な回転性能を有していることも確認できた。

3. 4 偏向部

外ケーブルの偏向部については、ガイドラインによる簡便な手法を基本としたが、本橋の場合偏向部と内ケーブルの定着突起が近接しているため、FEMによる安全性の照査も行った。ガイドラインによる簡便な手法とは、

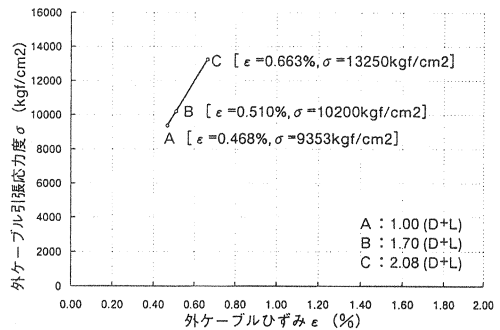


図-3 破壊断面の外ケーブル σ - ϵ 曲線

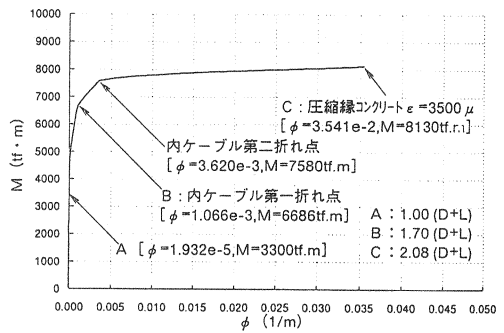


図-4 破壊断面のM- ϕ 曲線

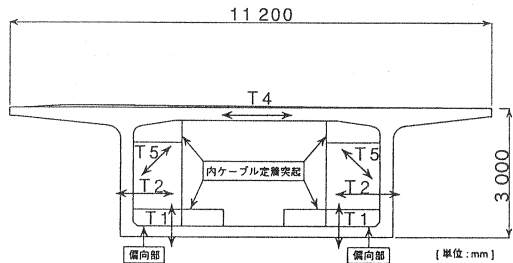


図-5 偏向部ストラットモデル

図-5のストラットモデルに示す引張力に対して、直接鉄筋が抵抗するものとして鉄筋量の算定を行うもので、照査荷重についてはプレストレス直後の導入力を用いた。なお外ケーブルの導入力には、偏向部でのPC鋼材曲げ応力度の付加を考慮した値を用いた。

3.5 外ケーブル定着部

外ケーブル定着横桁は、押し抜きせん断に対して安全な部材厚を設定し、以下の要領で補強鉄筋量を算定した。まず外ケーブル定着前面の割裂に対しては、ガイドラインに準じて補強鉄筋量を算出した。すなわち、載荷幅とブロック幅との比(集中度 β)を鉛直、水平方向それぞれについて求め、集中度の高い方向から補強鉄筋量を求めた。また、横桁の曲げとせん断に対しては、横桁の応力状態をよりの確に評価できるようにシ

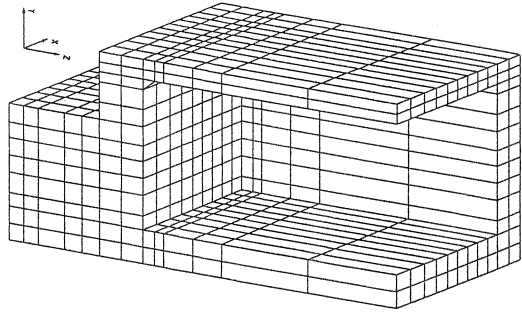


図-6 P13横桁3次元FEM解析モデル

ェル要素を用いたFEM解析によって引張力及びせん断力を求め、これに対して補強鉄筋量を決定した。ただしP13横桁については、隣接橋の緊張作業を行うための切欠きが大きく、適切な形状評価を行えるようにソリッド要素を用いて3次元FEM解析を実施し補強鉄筋量を決定した(図-6)。

3.6 スラブキー

スラブキーの寸法は、上床版をウェブに固定支持されている版としてFEM解析を実施し、T荷重によって生じるせん断力の分布によりスラブキー1箇所当たりの分担荷重を算出し、せん断応力度、支圧応力度が設計荷重時(活荷重 $\times 1.0$)において許容応力度を満足するように決定した。また、T荷重の載荷に当たっては、輪荷重載荷面と舗装厚、スラブ厚による分散を考慮し、橋軸直角方向に対しては各々のキーに対して、最も厳しいケースで検討を行った。

3.7 ウェブせん断キー

コンクリート道路橋設計便覧⁵⁾によれば、接合キーの設計は架設時と終局荷重時について行うと規定している。しかし、本橋の場合、セグメントの架設は支保工上で行われること、せん断力がせん断キーに作用するのは接着剤が固化した後と考えられることにより施工時の検討は省略し、終局時の検討のみを行った。設計照査は、終局時に作用するせん断力から、有効プレストレス分の摩擦抵抗($\mu=0.3$)を控除した設計荷重に対して、多段キーが設置されている範囲がせん断抵抗するものとして平均せん断応力度を算出した。その結果、終局荷重時の許容値 20kgf/cm^2 に対して発生応力度は 13kgf/cm^2 程度であり、十分安全であることが確認された。標準部のキー配置を図-7に示す。

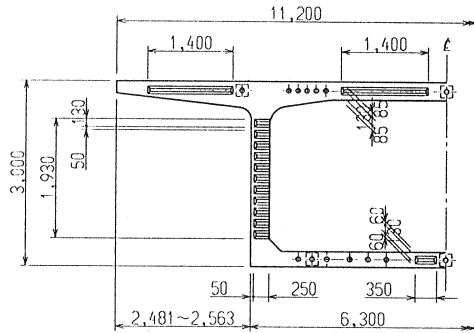


図-7 標準部キー配置

4. プレキャストセグメント製作装置

4.1 プレキャストセグメント製作の概要

本橋のプレキャストセグメントを製作・架設するに際しては、橋長が93 mと短く製作セグメント数は32個と少ないが、製作数に比して、増厚部、偏向部、変断面部、標準部と製作種類が多く、かつ平面線形($R=2700\text{m}$)、横断・縦断勾配に対応させる必要があった。そこで、プレキャストセグメントの製作・架設を以下の方針で行うこととした。

- ① プレキャストセグメントのウェブを直線で通し製作する。
- ② 平面線形は、張出し床版端部の出入りに対応する。
- ③ 製作装置は、1基で経済的かつ単純構造とし駆動装置を必要最小限とする。
- ④ 製作長さや製作タイプに応じアタッチメントの交換のみで対応可能とする。

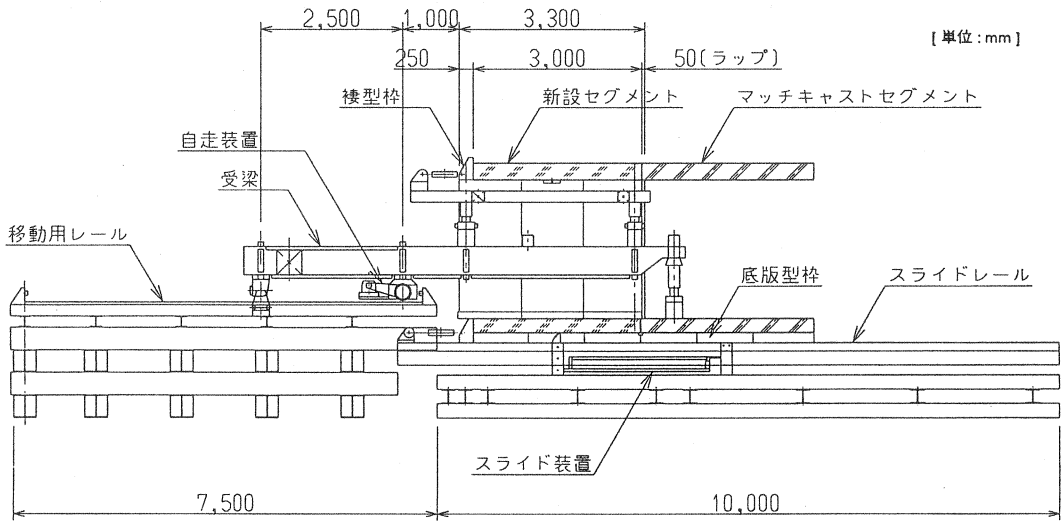


図-8 プレキャストセグメント製作装置

⑤ 床版横締めは、ポストテンション方式とする。

⑥ 引寄せ鋼材は、内ケーブル方式とする。

図-8及び写真-2にプレキャストセグメント製作装置を示す。

4. 2 プレキャストセグメント製作装置

プレキャストセグメント製作装置は、大別して固定台・内型枠・外型枠・底版型枠・複型枠に分類される。図-9にプレキャストセグメント製作装置型枠概念図を示す。動力装置として、内型枠には自走装置が装備され型枠セット時(前進)・型枠脱型時(後退)の省力化を図っている。また、固定台には、マッチキャストの切離しや製作セグメントの移動をスムーズに行うため、油圧システムによるスライド装置が組み込まれている。本装置を構成する主な部材の概要は、以下のとおりである。

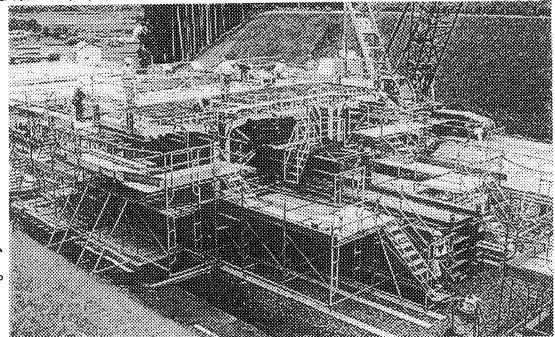


写真-2 プレキャストセグメント製作装置

固定台 : 底版型枠をスライド架台として、製作セグメント及びマッチキャストセグメントをスライドさせる油圧を用いたスライド装置とレール及びスライド装置のガイドレールにより構成される。

内型枠 : 左右それぞれ2点のヒンジを持ち、インバートフォーム、サイドフォームがそれぞれ内部に折れ込む二段折れ構造で、標準部と増厚部の変更に対しては調整型枠及び内型枠のユニット数の変更で対応可能である。また偏向部は、内型枠クラウンフォームを利用し型枠を組み立てる。型枠セット時の調整機構として、横送り装置及び高さ調整ジャッキを装備している。前進・後退は、自走装置により行い、打設時は、フロントジャッキ及びサイドジャッキをマッチキャストセグメントにあずけ、位置決め後、固定する。

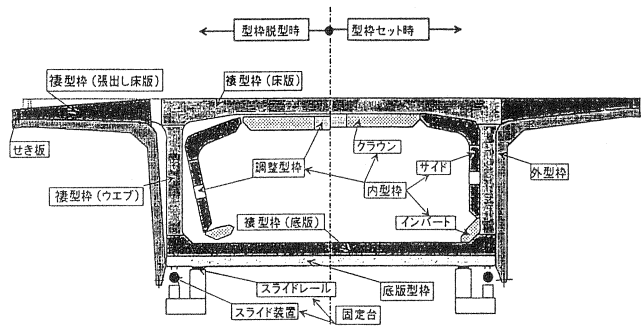


図-9 プレキャストセグメント製作装置型枠概念図

外型枠 : 左右それぞれ下部のヒンジピンを支点として外側へ開く(1段折れ)構造で、ヒンジピン支持架台は、高さ調整及び横送り調整装置を装備している。襖型枠(張出し床版)及びせき板は、それぞれ外型枠面板上に設置され面板上をスライドする構造となっている。

底版型枠 : スライド時の架台を兼ねた底版型枠は、1枚の長さが1mで、セグメント長2mの増厚部及び偏向部や、セグメント長3mの標準部に応じて組み替えを行う。

襖型枠 : 床版、ウエブの襖型枠は内型枠に支持し、底版の襖型枠は固定台スライドレール上に固定する。型枠セット時に襖型枠は、それぞれボルト接合しターンバックルにより位置決め固定する。原則として襖型枠は、1組を用意し、標準断面及び増厚セグメント双方に対応したアタッチメントを用意し、製作セグメントに応じて組替えを行う。ただしウエブ型枠のみ2種類装備している。

4. 3 プレキャストセグメントの製作

プレキャストセグメントの製作は、標準部の場合、図-10のプレキャストセグメント製作手順図に示す手順で実施している。製作の基本は、底版型枠及びマッチキャストセグメントを水平にセットすることと、セグメントスライド時にこの水平精度を保つ(固定台スライドレールを常に水平に維持する)ことである。また、セグメント製作長さ及び桁高を確保するためには、襖型枠を鉛直にセットすることが非常に重要となるため、細心の注意を払う必要がある。

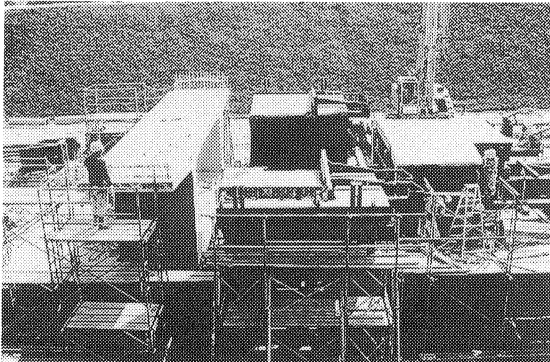


写真-3 型枠脱型時

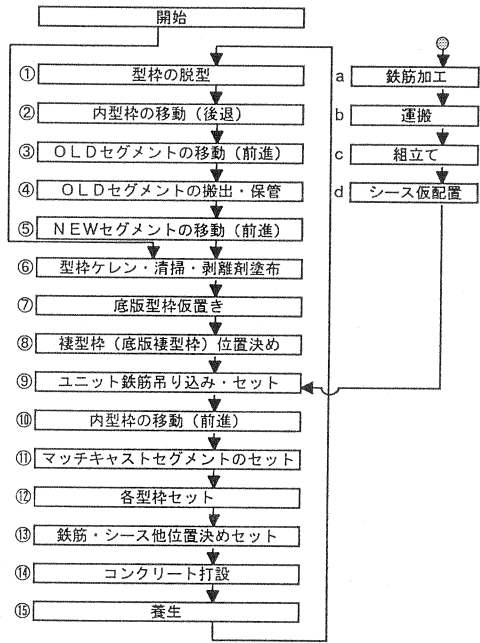


図-10 プレキャストセグメント製作手順図

5. おわりに

本橋は平成8年7月現在、1径間目のプレキャストセグメントの製作を行っているところである。本報文では、詳細設計と製作装置の概要について報告したが、本橋に内外ケーブル併用方式のプレキャストセグメント工法を適用するに当たって実施してきた模型実験や、解析、接着剤の実験などについては、また別の機会に報告したいと考えている。

最後に、本橋の設計、施工に当たり、これまで多大なる御指導、御尽力を頂いた関係各位に対し、深く感謝の意を表します。

<参考文献>

- 1) *Carin Louise Roberts: Measurement Based Revisions For Segmental Bridges Design And Construction Criteria, 1993*
- 2) (財)高速道路調査会: PC橋の新しい構造事例に関する研究報告書、平成5年3月
- 3) 沖見芳秀・右近八郎: 複合非線形フレーム解析システムの開発、土木学会誌、Vol.80、p14-17、平成7年1月
- 4) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (I 共通編・III コンクリート橋編)、平成6年2月
- 5) (社)日本道路協会: コンクリート道路橋設計便覧、平成6年2月
- 6) 建設省土木研究所構造橋梁部橋梁研究室・(社)プレストレスト・コンクリート建設業協会: プレキャストブロック工法によるプレストレストコンクリート道路橋設計・施工指針(案)、平成7年12月