

特別講演 I

「最近の高速道路の橋梁」

日本道路公団広島建設局 建設部長 風 間 徹

はじめに

昨年の11月に日本道路公団はあらたな施行命令 1,184kmをいただきました。その中に第二東名・名神約 303km が入っており、その事業費は約 5.5兆円にもなるようです。トンネル区間が全体の24%、橋梁高架区間が42%となり、これだけで今までの高速道路事業に匹敵する大事業です。

そんなことから、施行命令以前から、橋梁の建設方式について、その形式、材料までを含めた検討がなされており、幾つかは試験施工的に実施されています。ここではそれ等を紹介するとともに、この広島建設局管内で行われている特殊な橋梁について紹介するものです。

1. エクストラロード橋

- 西相バイパス延伸事業のうち、小田原原上と海浜部を通過する部分に「小田原港橋」、エクストラロードPC箱桁橋が建設された(図-1)。

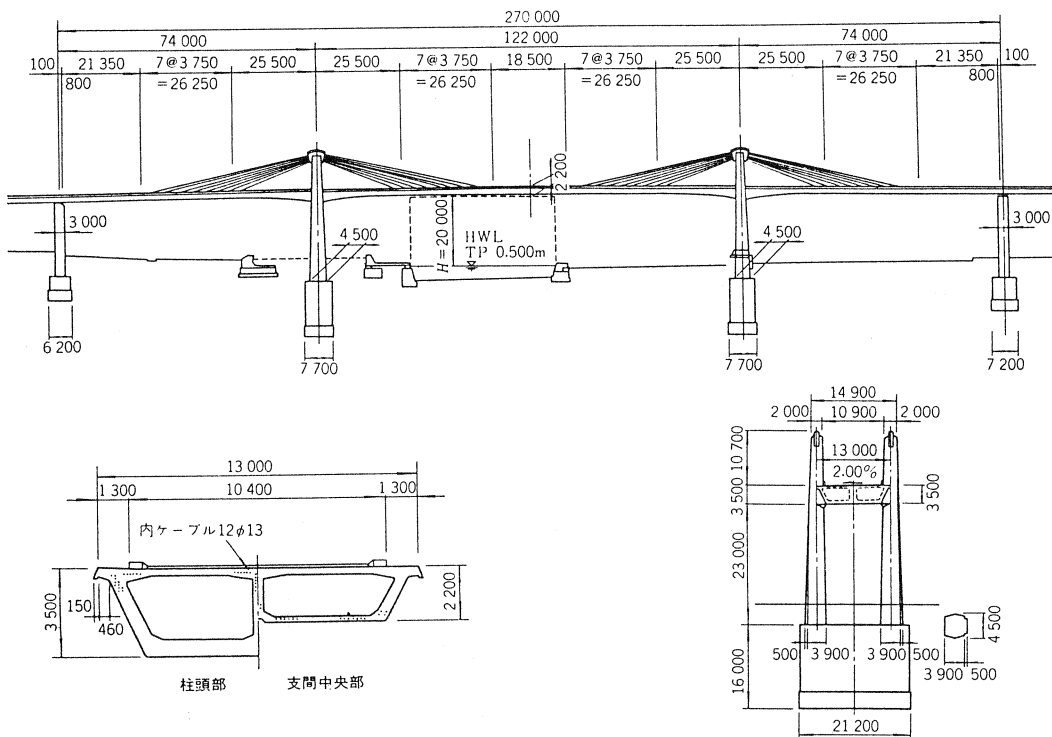


図 - 1 小田原港橋の一般図

架橋条件から種々その形式が検討され、当初は景観的な観点も含めて、スイスで1980年に完成したガンター橋(中央スパン174m)のような、PC斜版付き箱桁橋が計画された。その後内部景観的に圧迫間が大きいこと、自重の増加により地震時に不利になること等から斜材をコンクリートで覆わないエクストラドーズド橋に変更されたものである。

- エクストラドーズド・プレストレスング(Extra-dosed Prestressing)とはフランスのエンジニアである Mathivatによって名付けられた構造形式で、いわゆる大偏心外ケーブル方式によるものである。この形式の特徴は外ケーブルを桁の有効高さ以上に偏心させることにより、桁橋と斜張橋の複合的特性を有する構造系となることであり、それが有利となるスパンも両者の中間領域になっている。

現在までに国内で報告された本形式の適用スパンは 90m~140mであり、塔の高さは10m~12mで中央スパンと塔高さの比は  $H/L=1/13\sim 1/7$ 程度であり、斜張橋の  $H/L=1/5$ 程度に対しかなり低い。このことが斜張橋との違いを生じる大きな要因となっている。 すなわち

①斜張橋に比べ、斜材への依存度が小さく斜材応力の活荷重による変動が小さく、疲労に強い(PC斜張橋の1/3~1/4)。

②斜張橋に比べ、桁の剛性が高くとわみ特性が向上される。

③ 〃 〃、桁高が高く桁内で斜材の定着が可能。また作業性もよい。(スパン桁高比 $h/L=1/30\sim 1/35$ )

④斜張橋に比べ、施工中の斜材応力の変動も小さく斜材張力の再緊張は一般的に不要である。

⑤PC連続ラーメン橋に比べ、桁高が低くスレンダーな上部工となるため、下部工への負担が少ない。

⑥塔高さが低いため、面外地震時に発生する塔応力の低減が図れ、塔横梁が不要になり、内部景観的にも非常にすっきりしている。

⑦桁橋に比べ塔を有していること、また斜張橋に比べ塔高さが低く、シンボリックな威圧感のない親しみのある景観となる。

といった特徴がある。

- 斜材の塔側の定着は外ケーブルの、より大きな偏心を稼ぐために塔頂部に斜材を集中させた配置をする必要があるため、斜材ケーブルが主塔を貫通するサドル構造の採用が効率的である。この場合斜材の緊張は主桁側で、張力の差がでないように塔の両側で同時に行われる。また活荷重時斜材の張力差による滑りに対抗するため斜材を固定するサドル構造にする必要がある。

小田原港橋の場合塔頂部での斜材間隔は上下方向30cmであり、応力の集中する場所であることから設計は2次元 FEM解析が行われ、またサドルフレーム、鉄筋、補強PC鋼棒のある狭い箇所でのコンクリートの充填作業についても事前に実験により確認されている(図-2)。

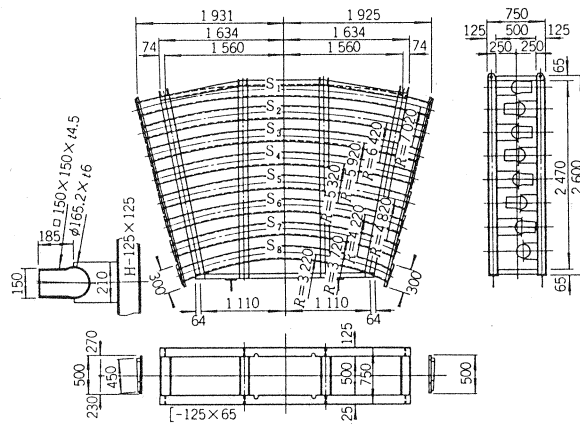


図-2 サドルフレームの構造

- 斜版構造と違って斜材をコンクリートで被覆しない場合は、活荷重による応力変動に加えて風等による変動が常時かかることになり、斜材の疲労設計が重要になる。

PC斜張橋の場合応力変動が  $4\sim 13\text{kg/cm}^2$  になるため斜材の応力を  $0.4f_{pu}$  に制限されているのに対し、この場合その応力が  $1/3\sim 1/4$  になることから小田原港橋は桁内のPC鋼材と同じ  $0.6f_{pu}$  に制限をゆるめている。活荷重による応力変動に対する疲労設計は過去の高速道路の代表的交通荷重とその通行台数との関係を考慮して照査されている。風による振動に対しては、位置的にも地形的にも影響が大きい恐れがある。このため斜材の固有振動解析およびレインバイブレーションと風速の関係を調査した。この結果上から3段目までの斜材が風により影響を受けやすいが、風速が非常に小さい範囲であり、実際にはほとんど影響がないと考えられた。しかしながら変動応力の制限も緩めていることから安全のため高減衰ゴムによる制振装置を設置している。

- 斜材の疲労強度の確認のため、塔部および桁部の固定状態を含めた斜材システムの実物大の曲げ疲労試験が行われている。また高減衰ゴムダンパーの性能試験等が実橋にも行われ、その効果が確認されている。
- 小田原港橋の実績から、100m~200m付近の長大スパンの橋梁については斜張橋、連続ラーメン箱桁橋等に比較してかなり有利になると思われる。このため高速道路では、山陽道の三木付近で施工中であり、第二名神の木曾川付近等でも計画中である。

## 2. プレキャストセグメント工法による橋梁

- 松山自動車道の松山IC付近の「重信川高架橋」は橋長1,901mのPC箱桁橋である。構造形式は標準スパン47mで、45径間を7橋のラーメン橋と2橋の連続桁橋で構成されている。スパン的には47m程度であることと、その橋長からプレキャストセグメント工法が採用された(図-3)。

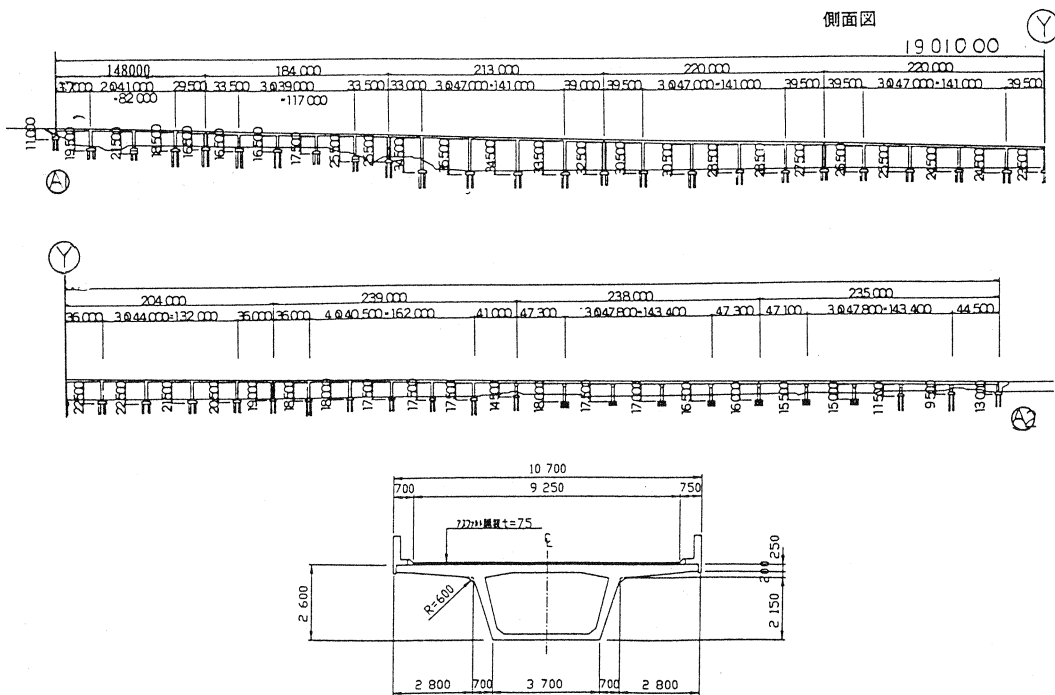


図-3 重信川高架橋

○ プレキャストセグメント工法の利点をできるだけ出すために種々の工夫がなされている。設計製作について、セグメントの軽量化をできるだけ図るために、

①桁幅に対し張り出しのより大きな断面とし、

②外ケーブルを使用し、ウェブ厚を薄くし、

③高強度コンクリート  $\sigma_{ck}=500\text{kgf/cm}^2$

を使用している。また

④床版横締めはプレテンション方式とし、省力化を図るだけでなく、張り出しの大きな断面の扱いを容易にしている。

主ケーブルはじん性(変形能)を確保するため内外ケーブル併用構造とするが、

⑤製作・施工の省力化のため外ケーブル比を大きくし

⑥外ケーブルは偏心量を大きくとるため1段配置とし、大容量ケーブル(19T15.2)を使用している。

⑦内ケーブルは部材厚を考慮して12T12.7とし上下床版に直線配置し、偏心量を大きくするとともに施工的にも配慮されている。

また本高架橋は縦断勾配 2.6~1.2%、横断勾配 4%、平面線径R1,500~R4,000mを有しているが、

⑧プレキャストブロックは上下面平行、ウェブの傾斜角も一定とし、製作時の形状管理測量システムを設けず、経済性を考慮している。

このため縦断平面線形は、各支点付近に50cm前後の場所打ち部を設けることにより確保されている。

○ 主桁製作台は、セグメント総数 750個にたいし 3基設置されており実際の製作にあたって特殊セグメント専用といった使い方はされていない。製作サイクルは標準セグメント 1日/セグメント/基、特殊セグメントは 2日/セグメント/基となっている。またセグメント製作ストックヤードは、大州側A1橋台の後方の本線部 4車線道路幅 30m延長約700mとされ、ストックは最大 3段積みで計画されている。門形クレーンもこれに合わせ設置されている。

○ セグメントの架設は、スパン長から有利といわれているスパンバイスパン工法とされている。橋脚にブラケットを取付け、その上に据え付けられた架設ガーダーの上に一径間分のセグメントを並べ、緊張していく工法である。

○ 架設要領

1)A1後方での架設ガーダーと手延べ桁の地組後、ガーダーを引き出し大型クレーンによる橋脚のブラケット上への架設。

2)トレラーにより運搬されたセグメントをクレーンにより台車上にセット、柱頭部セグメントから順次手前に向かいセグメントをガーダー上にならべる。柱頭部セグメントの位置調整後 U型ケーブルで固定した後、先端側より各セグメントの位置調整。さらに接着剤を塗布した後PC鋼棒を使って 1ブロックずつ組み立てる。

3)桁内PC鋼材を挿入する。その後場所打ち目地部を施工する。場所打ち部コンクリートの硬化後内外ケーブルとも緊張する。

4)第 1径間架設完了後、架設ガーダーを前方に移動、橋面上にはセグメント吊り降ろし用のクレーンをセット。

5)架設ガーダーの移動にともない、橋脚ブラケットも順次移動させていく。

1 径間の架設サイクル日数は10日を標準としている。

○ 重信高架橋の施工は平成 8年度まで予定されているが、ここでの種々の実績に基づき、さらなる改良が検討され、合理的で経済的な工法が確立されることを願っている。すでに第二名神では愛知県の鍋田市付近の高架橋部分で、計画中と聞いている。

プレキャストセグメント工法は、既に欧米では一般的な工法になっており、日本からも数回調査団が派

遣されているが、架設工法の調査はよく行われているものの、架設機材そのものの調査は余り行われていないようである。一般的に架設機材は欧米の方が、はるかに簡単・軽量にできているようであり非常に効率的である。架設機材の設計については、労働安全規則その他にそって行われていると思われ、それぞれの国情の差もあるが、架設機材の軽量化、単純化はこういった工法の経済性に大きく影響するものであることから、架設機材についての調査は急務であると思われる。

### 3. 外ケーブル併用押し出し工法による橋梁

#### 3.1 秋田自動車道「岩滑沢橋」

- 秋田道湯田IC付近の「岩滑沢橋」は橋長302m、スパンは 50m× 6径間のPC連続箱桁橋である。本橋は橋長、スパン、その地形的条件から押し出し工法が採用されたが、当初から外ケーブルをできるだけ使用する方向で検討されたものである(図-4)。

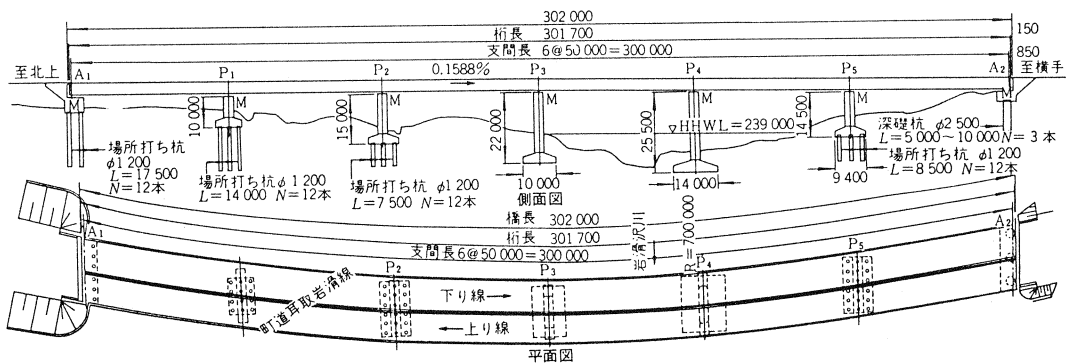


図-4 岩滑沢橋の一般図

- 外ケーブルの利点は、前述のように①部材厚さ減少による桁自重の軽減、②ケーブルの摩擦による応力損失の減、③施工の省力化、④ケーブルの点検、取り替え等維持作業の改善などがあるが、逆に現在までの課題として、①有効プレストレス及び曲げ破壊耐力の算定方法、②偏向部、定着部の設計方法等の統一なものが出されていないことがある。
- 「岩滑沢橋」の設計は押し出し工法また外ケーブルの利点をできるだけ出すべく考えられている。
  - ①PC鋼材の偏心を大きくとるため、桁高比を従来より大きくとったこと。桁高比1/14.3~1/12.8の範囲で使用PC鋼材量をほぼ一定として、桁高と主版幅をパラメーターとした試算により、コンクリート量最小断面となる桁高 $h=3.7\text{m}$ (1/13.5)を決めている。
  - ②押し出し施工時は外ケーブルをたすき掛け配置し、完成時に不要となるケーブルを再配置することで(図-5)、上下床版に多く配置されていた架設用PC鋼材を削減した(約35%)。
  - ③このためA1背面の製作ヤードに押し出し控えヤードを増設し、また再配置ケーブルの緊張解放作業を1箇所で行うため、各横桁に定着後、カブラーを用いて連続ケーブルとした。
- コンクリート強度は一般的な  $\sigma_{ck}=400\text{kgf/cm}^2$  を用いているが、ウエブ厚の減少等からコンクリート量の減少は約 9%程度になっている。
- 外ケーブルの有効プレストレス量の算定は、棒部材の構造モデルでチェックし、道示の算定式、猪股博士の提案式ともほとんど差の無いことが確かめられている。
  - 外ケーブル(12T15.2 SWPR7B)の本数については押し出し施工時の上下床版に設置されるPC 鋼棒( $\phi 32$  SBPR930/1180)とたすき掛け外ケーブルの増減関係、完成時再配置するケーブルの増減関係を検討し、PC

鋼材量が最少となるように外ケーブル配置がなされている。

外ケーブル方式の場合、曲げ破壊耐力のチェックにより内ケーブル量が左右される場合が多い。しかし本橋の場合、曲げ破壊耐力の検討による内外ケーブル量の変更はなかった。これは桁高を従来より約50cm高くしているため、内外ケーブルの偏心量が大きく有効に作用するためと思われる。

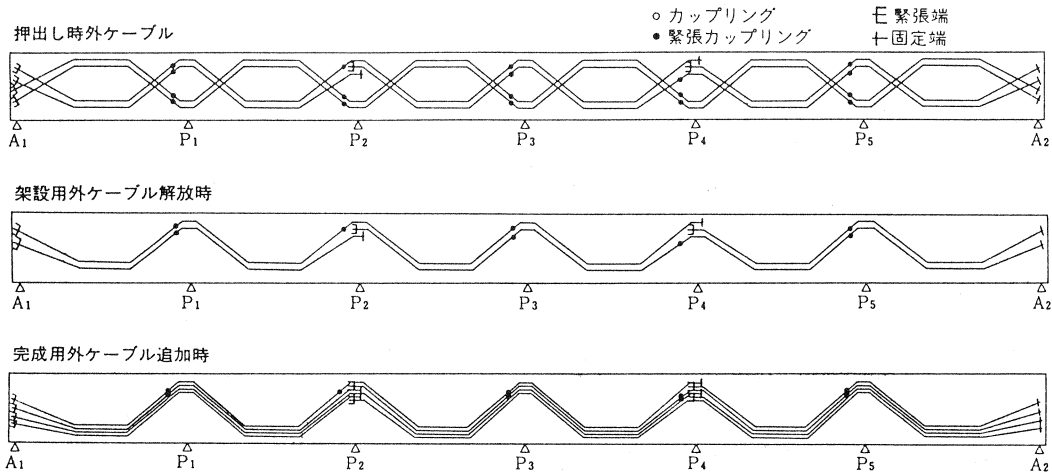


図 - 5 外 ケ ー ブ ル 配 置

- 外ケーブル方式の場合で 1-BOX箱桁の桁高の増減は、コンクリート量 1%の増減に対し必要PC鋼材量については10%程度減増、斜引張り応力度は10%以上減増、終局時平均せん断応力度は10%以上減増するという報告もある。
- 本橋の曲げ破壊耐力の算定には、現在までに提案されている①外ケーブルを張力増加を見込まない引張り抵抗材とする方法、②外ケーブルを張力増加を見込まない外力として作用させ、抵抗値より差し引く法、③道示のアンボンドケーブルの考え方を準用する法に加えて④非線形解析による法により検討されている。  
 本橋の場合、PC鋼棒のひずみが $\epsilon_p=0.0500$ に達したときの抵抗値は鉄筋を考慮した場合に、終局時の値を上回り安全率が確保できている。  
 算定方法としては①、②が厳しく③の方法は抵抗値が過大になる傾向があるとされた。④では外ケーブルの偏心量の減少よりも張力増加の影響が大きくなり、曲げ破壊安全度はより大きく確保される結果になっている。
- 現在施工中であり、完成は平成 8年度中の予定である。

### 3.2 中国横断道岡山米子線「上竹橋」

- 中国横断道の岡江北房間の賀陽1Cに近い「上竹橋」は橋長530m、標準スパン44.25mの6径間連続箱桁橋が2連の橋梁である。橋長とスパン、道路線形そして地形の関係から押し出し工法が採用された。当初設計は内ケーブルのみの設計であったが、まったく同型式が2連あるため施工性、経済性等比較のため1連について外ケーブルが採用された(図-6)。
- 桁高については既に橋脚は施工済みであり縦断線形の変更も不可能なため  $h=3.0\text{m}(1/14.75)$  で固定、上下床版厚についても固定としている。  
 ウエブにはPC鋼材をいれないため10cm減少させ、30cmとした。これによるコンクリート量の減少は約4.4%となっている。

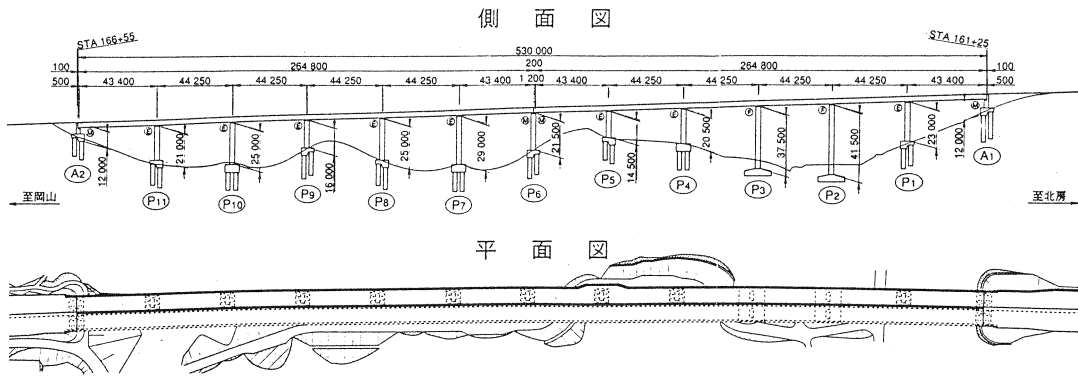


図-6 上竹橋一般図

- 外ケーブル(12T15.2 SWPR7B)の有効プレストレスの算定は猪股式により、また曲げ破壊耐力については、張力増加を見込まない引っ張り抵抗材として算定し、PC鋼材のみで足りない断面については鉄筋を考慮した。

外ケーブルの配置検討は以下の順序で行った。

- 1) 転用を考慮し、架設時及び設計荷重時に対し全て外ケーブルとする。この時架設時は各径間毎にたすき掛け対称配置を前提とする。
- 2) 各径間毎に外ケーブルの一部を曲げ破壊安全度が満足するまで内ケーブルに置き換えていく。この時も架設時外ケーブルはたすき掛け対称配置を前提。
- 3) 転用を考慮せず、架設時に対し内ケーブル、橋面荷重・活荷重に対し外ケーブルとする。

上記の他、さらに設計荷重時に不要な架設用内ケーブルを応力解放した場合の検討も行っている。

これらの結果、全内ケーブルの場合に対しPC鋼材は

たすき掛け配置して転用する場合約21%の減、

架設時内ケーブル後荷重に対し外ケーブルの場合約 8.3%の減

となった。以上より概算工費を算出し経済比較を行ったが、さらに、架設時外ケーブルの移設転用に際し、PC鋼材損傷の恐れもあり、また緊張解放工、移設工等の費用がかさむことを考慮し、ここでは3)が採用されている。

#### 4. RC30径間連続中空床版橋

- 中国横断道岡山米子線の岡山総社ICに近い「総社高架橋」は、2箇所の中空床版部を除いて支間長16m~18mの連続RC中空床版で構成された橋長1,747.3mの高架橋である。このうち岡山総社IC側の528mについてアーチ構造を併用したRC30径間連続中空床版が採用されている(図-7)。

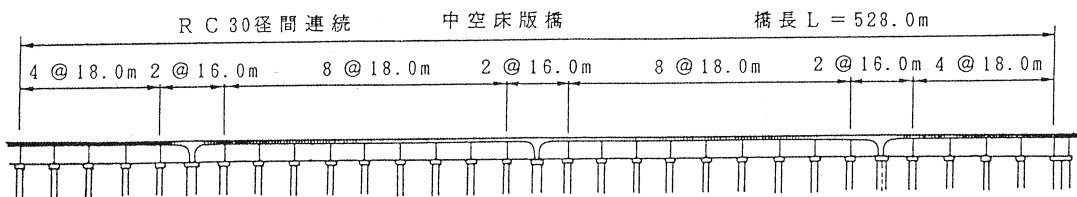


図-7 総社高架橋側面図

- RC中空床版の連続化は、基礎形式、橋脚高さ等の条件により限界が異なるが、支間長 18m程度の場合 12径間程度が最大であり、それ以上になると温度変化により発生する水平移動量によって橋脚柱および基礎に過大な応力が発生する。総社高架橋ではこの温度変化による水平移動量をアーチ構造により吸収し 30径間の連続化を図っている。
- アーチ構造は30径間の中に10径間ごと 3箇所設けられている。これは橋脚柱および基礎に過大な応力を発生させないよう、水平移動量が大きくなるうちに吸収するためである。また、支間長はアーチ部以外は 18m、アーチ部は 16mとしている。これは、アーチ部が吸収する移動量を路面に直接伝えないように充腹構造となっており、自重の増加に伴い支点上で発生する断面力が通常の中空床版橋より大きいためである。
- アーチ部の構造は当初、コンクリート断面が連続した形状で計画を行っている。この時点では、8径間ごとにアーチ構造を設け16, 32, 64径間と連続延長を増やしたモデルを棒要素で解析し、どの程度まで連続化が可能かを検討している。その結果、桁端の変位、アーチに発生する断面力の増加はともに30径間以上になると収束する傾向にあることが確認された。しかし、アーチ部材に発生する曲げモーメントは、30径間で 700tm程度に達するため、連続径間数は30径間程度が限界と判断している(図-8)。

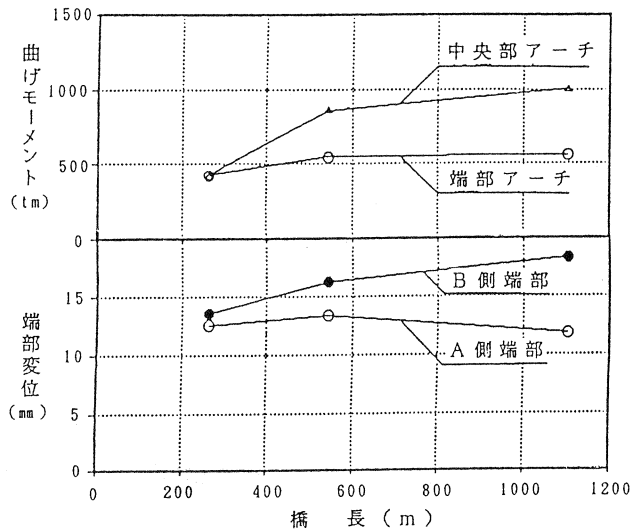
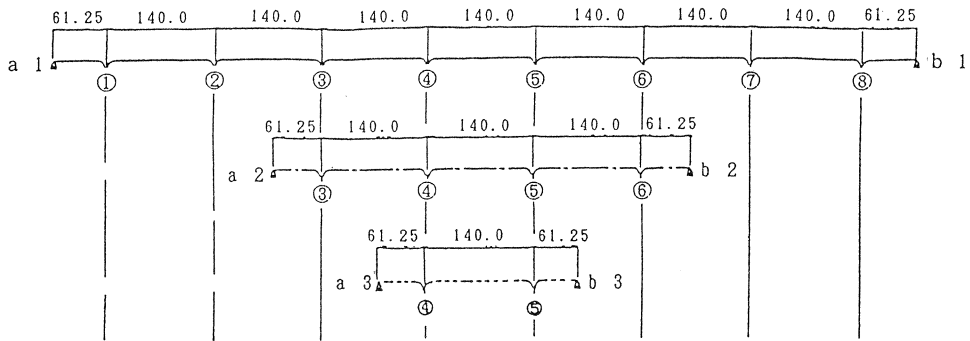


図-8 連続延長の検討



- 上記検討結果から連続径間数を30径間に固定し設計を行った。その結果、アーチ部に断面力が集中するためアーチ断面の剛性が大きくなり、アーチの変形による水平移動量の吸収はほとんど行われないう構造となった。また、アーチとアーチに挟まれたRC中空床版部分（以後ユニットと呼ぶ）の温度変化による変位が他のユニットに大きな影響を与えているため、設計は常に30径間全体で行わなければならない、設計計算に多大な労力を必要とした。
- これらの問題点を解消するには、水平移動量および断面力の吸収効果が高いアーチ構造を開発する必要があった。そこで、①部材の剛性を小さくした構造と②アーチ付け根にヒンジを設けた構造について、アーチ部分だけを取り出した構造に水平力を作用させ、変位と断面力の伝達度を確認した。その結果、アーチ部材の剛性を半分とするよりもヒンジを設ける方がはるかに吸収効果が高く、隣接するユニットへの伝達度は断面力で 1/8程度、変位では1/10程度であった(図-9)。

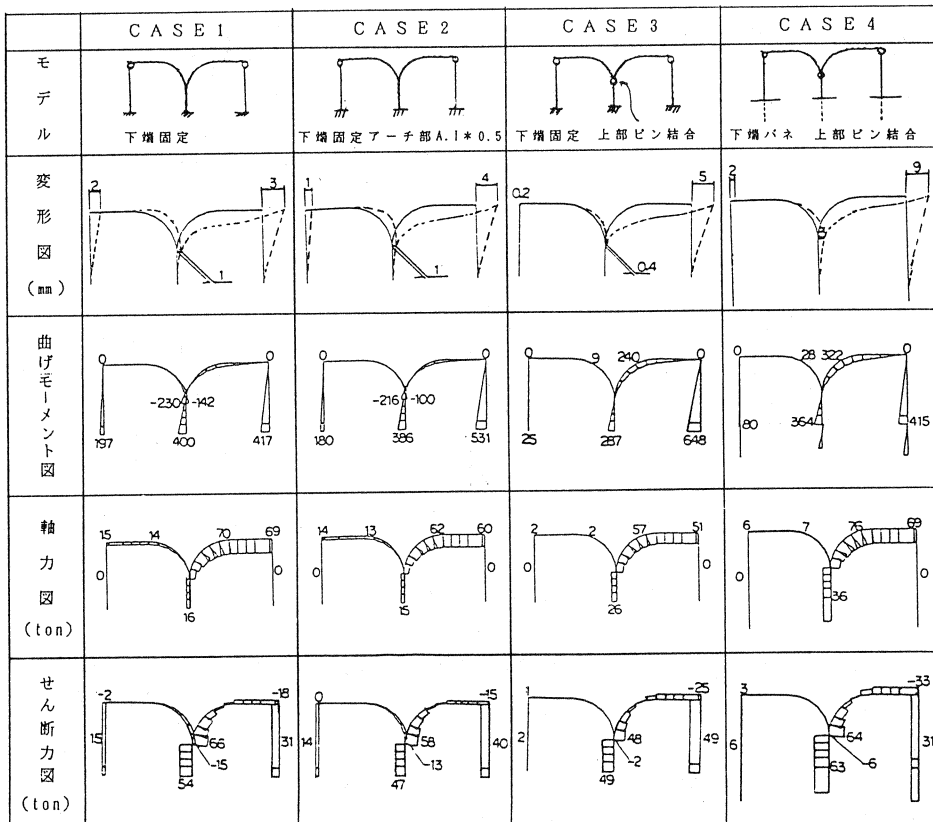


図-9 アーチ構造の検討

- アーチ付け根に設けるヒンジの構造には①コンクリートキーを設けるタイプ、②アンカータイプ、③メナーゼヒンジおよび④鋼製斉が考えられる。ここで、①の構造は回転性能は良好であるが張力には抵抗できない。また、④は②および③と比較して高価である。そこで、②と③を比較し、回転変形、せん断力に対してともに有効に働く③のメナーゼヒンジを採用することにした(図-10)。

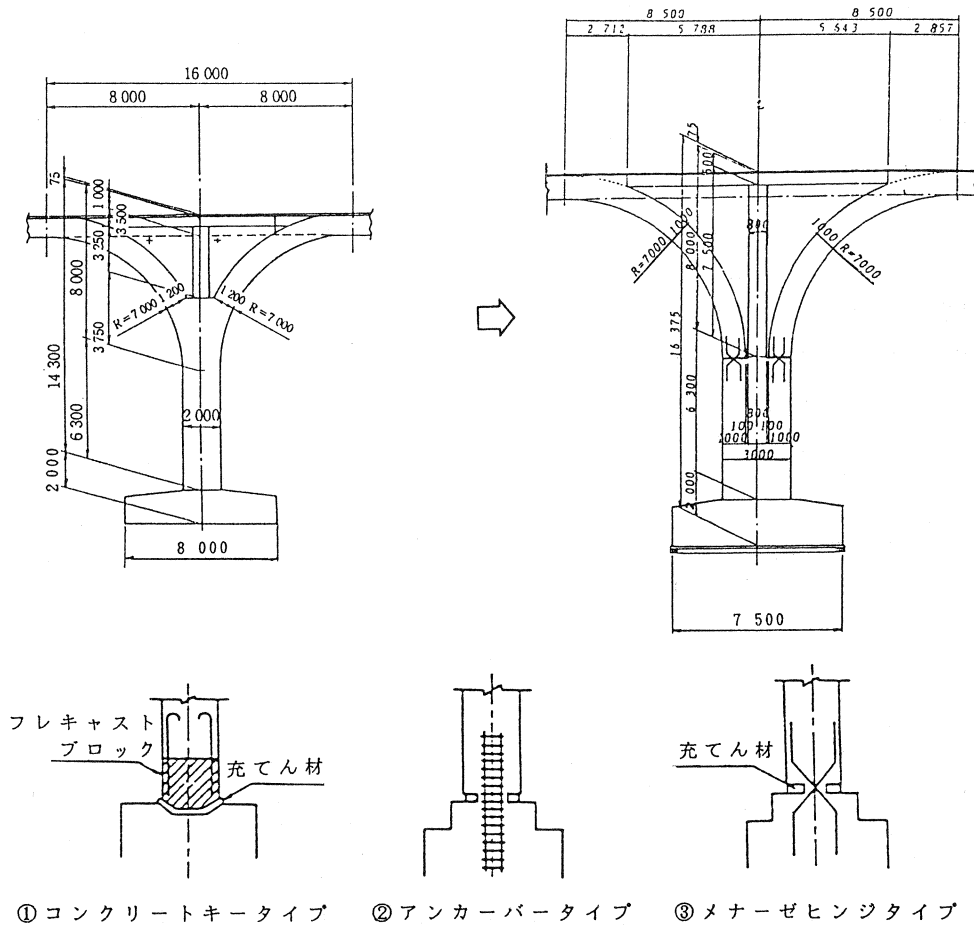


図-10 ヒンジ構造の採用と型式検討

- メナーゼヒンジはある程度までの回転には追随出来るが、今回のような変位の大きい場合でも十分な効果を発揮できるか不確定であった。そこで、温度変化に対するアーチ部材の回転量を計算し安全性を確認している。
- 総社高架橋においてRC中空床版の一部にヒンジ付きアーチ構造を併用したことにより、温度変化に対する桁端部の変位は、桁が拘束を受けずに自由に伸縮した場合に較べて約35%、ヒンジを有しないアーチ構造を設けた場合に較べて44%となっている。また、橋脚柱及び基礎に作用する断面力はヒンジを有しないアーチ構造と比較して小さくなっており、杭の本数を大きいところで1~2割減らすことが出来た(図-11)。
- 現在、総社高架橋は設計を完了し施工中であるが、温度変化に対して設計計算に即した挙動を示すことの検証方法を検討中である。

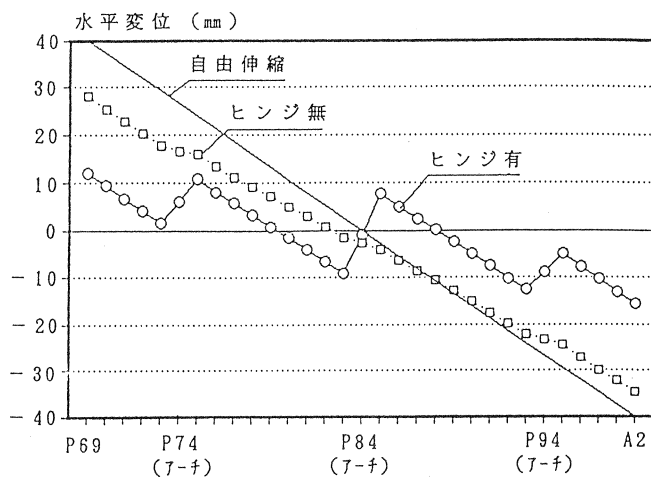


図 - 11 温度変化による橋脚天端の変位

参考文献

- 1) 城野ほか; エキストラードゾドPC橋の計画と設計, 橋梁と基礎(1992-12)
- 2) 小野ほか; 小田原港橋の施工, 橋梁と基礎(1994-7)
- 3) 平出ほか; 屋代南・北橋梁, 土木技術(1994-12)
- 4) 石橋ほか; 名取川橋梁の設計, 土木技術(1994-12)
- 5) 道路公団松山(工), ピーエス・住友建設JV; 重信高架橋, パンプ(1995-6)
- 6) 紫桃ほか; プレキャストセグメント工法の設計施工について, 道路公団業研論文集(1995-6)
- 7) 長井ほか; プレキャストセグメント工法による連続高架橋の計画について, 道路公団業研論文集(1995-6)
- 8) 佐久間ほか; 外ケーブル併用押し出し施工によるPC箱桁橋の設計(上), (下), 橋梁と基礎(1995-4)
- 9) 佐久間ほか; 外ケーブルを使ったPC橋梁に関する考察(その1), (その2), 道路公団業研論文集(1995-6)
- 10) 中村ほか; 総社高架橋の設計について, 道路公団業研論文集(1993-6)
- 11) 持田ほか; RC30径間連続アーチ式中空床版橋の設計, 道路公団技術情報(1994-12)