(83)　中国横断自動車道見延橋（全外ケーブル橋）の設計

日本道路公団中国支社建設部構造技術課　岡村　敦
日本道路公団中国支社津山工事事務所　○橋川　勝司
㈱大林組・住友建設㈱共同企業体　苅田　豊
住友建設㈱土木本部ＰＣ設計部　正会員　中村　収志

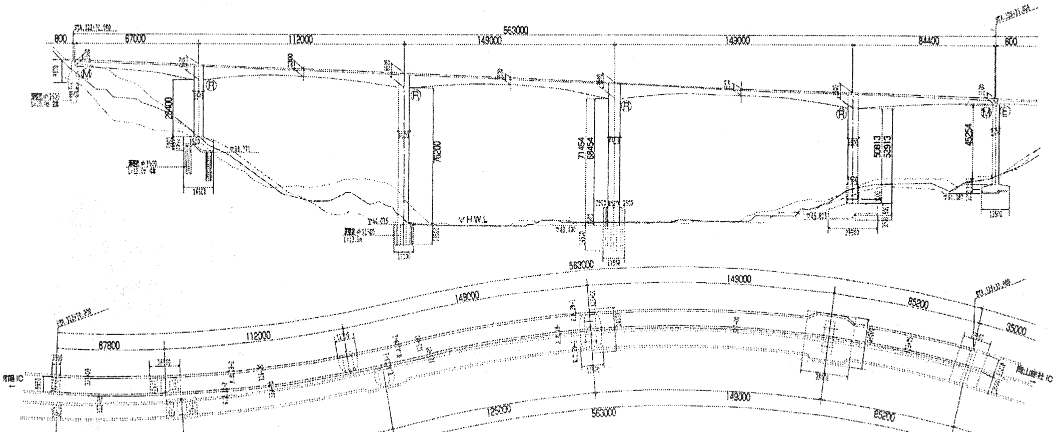
１．はじめに

中国横断自動車道岡山･米子線は、岡山県岡山市を起点に中国地方を横断し鳥取県米子市に至る延長108kmの路線で、暫定２車線が平成８年に供用を開始している。中国横断自動車道見延橋は、本路線の４車線化に伴う２期線工事で現在の供用線に隣接して建設される。

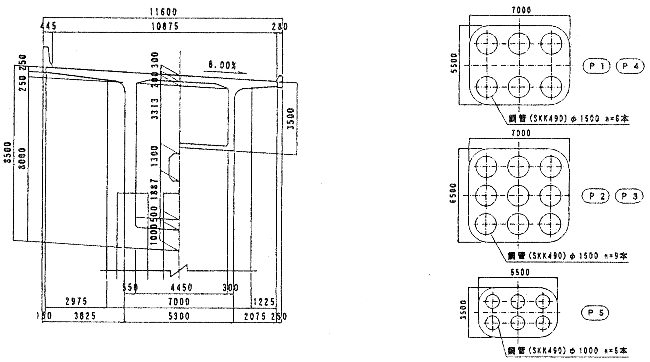
本橋は、岡山を代表する景勝地「豪渓」近くに位置し、一級河川槙谷川をまたぐＰＣ５径間連続ラーメン箱げた橋であり、橋脚高 76.2m と国内最大級の高橋脚であることから、鋼・コンクリート複合構造を採用している。上部工は、全外ケーブル方式のＰＣ構造を採用し、支間長 149m は国内最大支間長となる。

本稿は、複合構造橋脚および全外ケーブル方式を採用した長大ラーメン橋の設計概要について報告するものである。

２．橋梁概要

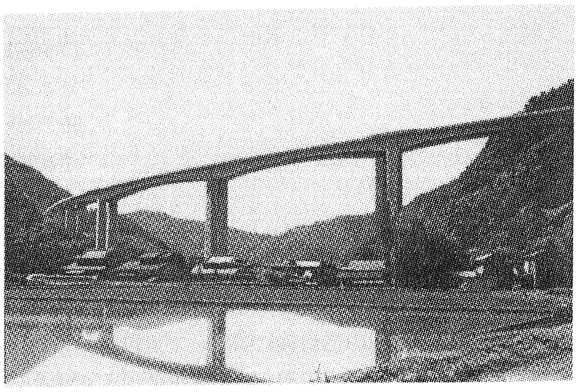


図－1 一般図



図－2 標準断面図

【工事概要】



工 事 名：中国横断自動車道　見延橋工事
路 線 名：中国横断自動車道　岡山米子線
道路区分：第１種第３級Ｂ規格（V=80km/h）
荷　　重：Ｂ活荷重
構造形式：ＰＣ５径間連続ラーメン箱げた橋
橋　　長：563m
支 間 長：67.0m＋112.0m＋149.0m×2＋84.4m
有効幅員：9.140m～8.665m
横断勾配：-6.0%～+6.0%
縦断勾配：3.5211%～3.7839%
平面曲線：700m～700m（Ｓカーブ）
下部構造：逆Ｔ式橋台(A1)、柱式橋脚(P1～P5)
基礎形式：直接基礎(P4～P5)、深礎杭(A1，P1，P2)、ニューマチックケーソン(P3)
架設工法：［上部工］張出し架設工法（外ケーブル方式）、［下部工］ハイブリッド・スリップフォーム工法

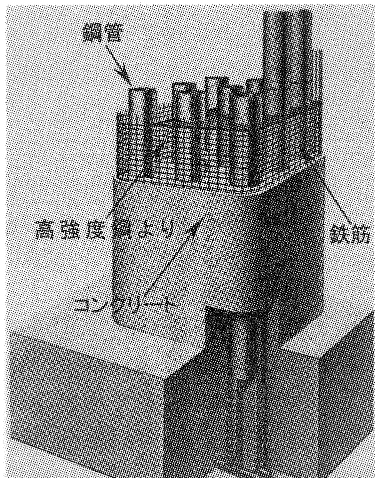
橋梁一般図を図－1、図－2、完成予想図を写真－1に示す。

３．下部工の設計

本橋の下部構造は、鋼・コンクリート複合構造橋脚を採用している。本橋脚は、図－３に示すとおり、鉄筋コンクリート断面に鋼管を配置し、帯鉄筋に螺旋巻き高強度鋼より線（ＰＣストランド）を採用した構造である。

本構造の特性を以下に示す。

①高強度鋼より線を連続螺旋巻きにすることにより、せん断補強鋼材として高い性能を発揮する。
②外周のPCストランド帯鉄筋と内部の鋼管でコンクリートを拘束することで、じん性向上が期待できる。
③内部に配置した鋼管のせん断耐力の付加により、部材のせん断耐力の向上が期待できる。
④せん断ひび割れ発生後、荷重の繰返しに対してひび割れ幅の増大、コンクリートの損傷を抑制することが期待できる。
⑤鋼管をコンクリート内に配置することにより、鋼管の局部座屈を防止することができる。



図－3　鋼管コンクリート複合構造

なお、一般部の鋼管内部は、重量軽減のため中空としているが、橋脚とフーチングおよび上部構造との接合部は、応力の伝達を円滑に行い、断面合成の急変を避けること、鋼管の局部座屈防止および鋼管の変形による抜けだし防止のため、鋼管内部にもコンクリートを充填している。

また、基礎構造については、本工事が４車線化に伴う２期線工事のため、Ｐ３（ニューマチックケーソン）およびＰ４（直接基礎）が１期線と供用しており、Ｐ１およびＰ２（ともに深礎杭）が新設となっている。

したがって、Ｐ３およびＰ４においては、１期線時の反力で２橋分の基礎構造が既に施工されているため、２期線の上部工反力に制限を受けている。２期線の上部ＰＣ構造は、内ケーブル構造から全外ケーブル構造へ変更しているため、定着突起等による重量増への配慮が必要となった。

４．上部工の設計

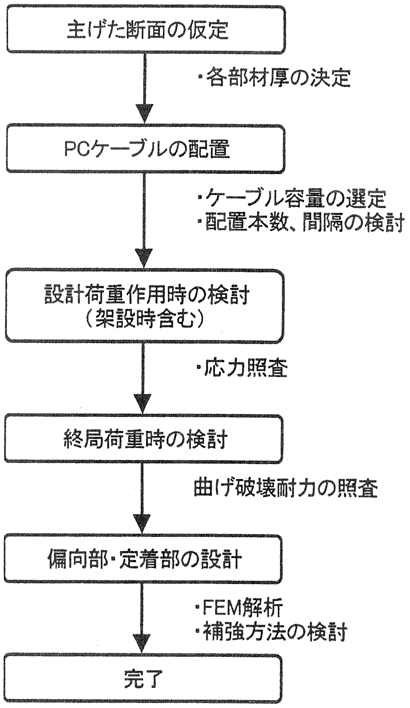
4.1　設計方針

本橋は、床版および横げた部のプレグラウト鋼材を除き、供用後においてもケーブルの健全性が確認可能な構造とするため、緊張材の全てを主げたコンクリート部材の外側に配置する全外ケーブル方式のＰＣ橋とした。

したがって、張出し施工時に必要となる架設ケーブルは、張出しブロックに設置した突起にて定着し、完成ケーブルは、連結完了後、柱頭部もしくは主げた端部横げたにて定着する。全外ケーブルの設計フローチャートを図－４に、配置概念図を図－５に示す。

部材寸法については、ケーブルを部材断面外に配置するため最小ウェブ厚を 300mm、下床版厚を 210mm と部材厚を極力小さくし、自重の軽減を図り、定着突起による重量増に対処している。

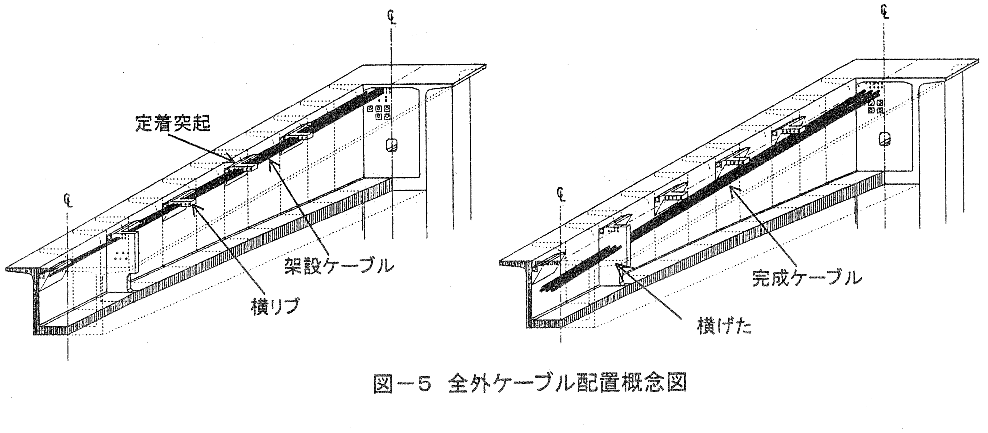
また、本橋は、最大支間 149m と国内最大規模の全外ケーブル橋である。したがって、一般的に使用されているケーブル容量では、配置本数が多数となるため、架設、完成ケーブルとも 27S15.2 の大容量ケーブルを採用している。そのため、定着部の検討は、FEM 解析によりその形状および補強方法を決定し、定着部実物大試験を実施して確認を行うこととした。



図－４　全外ケーブル検討フローチャート

4.2　全外ケーブル方式の検討

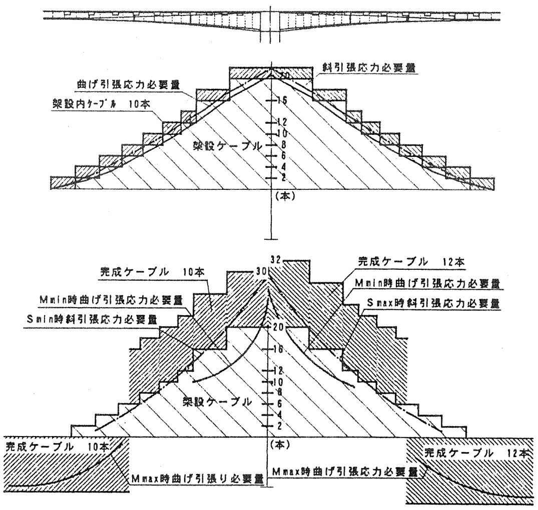
図－６に本橋における必要ケーブル本数概念図を示す。通常の内ケーブル方式の場合、架設時および完成



図－５　全外ケーブル配置概念図

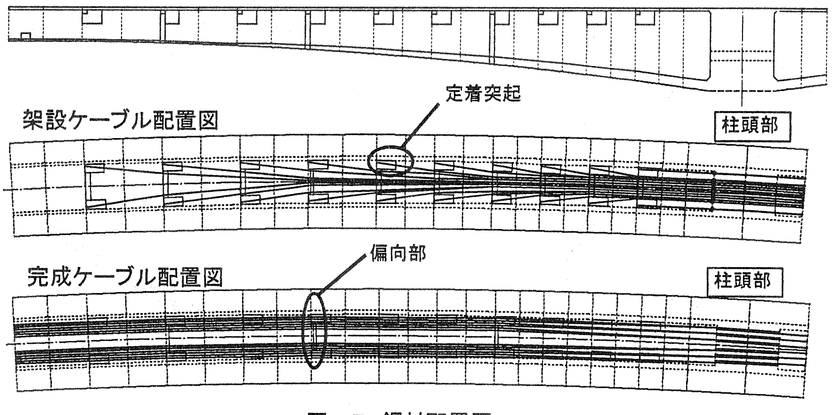
時に必要となる上縁配置鋼材は、すべて張出し施工時に配置し小口断面にて緊張定着を行っている。完成時のみに必要となる下縁配置鋼材は、必要区間のみにケーブルを配置し定着突起にて緊張定着を行うのが一般的である。しかしながら、本橋においては大容量の外ケーブルを使用した全外ケーブル方式であることから、定着突起による外ケーブル配置を極力少なくするため、次のような配置とした。

① 突起定着となる架設ケーブルは、大容量ケーブルの使用により、２ブロック毎に配置する。
② 完成時に不要となる架設ケーブルは、突起が不要な内ケーブル方式とし、完成ケーブル緊張後撤去する。
③ 完成ケーブルは、突起による定着は行わず、連結完了後、柱頭部および主げた端部横げたで定着する。
④ 架設ケーブルは、けた内で上下２段配置とし、横リブおよび横げたで偏向を行う。
⑤ 外ケーブルは、基本的に直線配置となるため、主げたの曲率に対しては横げたで偏向を行う。横げたの設置位置は、外ケーブルによる偏向力およびねじりモーメントを考慮して決定する。



図－6 必要ケーブル本数概念図

なお、本橋は全外ケーブル方式としているため、せん断鋼棒も配置していない。したがって、斜引張応力度の制限値に対しては、外ケーブルによる緊張力により対処するため、図－６に示したように曲げ引張応力度と合わせて配置本数を決定している。以上より決定された見延橋鋼材配置図を図－７に示す。



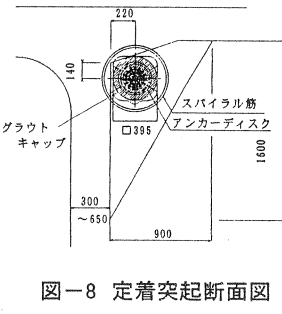
図－７ 鋼材配置図

4.3 外ケーブル定着部の検討

定着突起の基本形状は、FEM 解析による構造検討を行い、図－８に示した三角形形状とした。その理由は、次のとおりである。

①断面積が同程度の台形断面と三角形断面では、三角形断面の方が縁辺距離の確保が容易である。

②縁辺距離が長いことから、上床版およびウェブ剛性が高くなるため、応力集中部での発生応力が小さくなる。



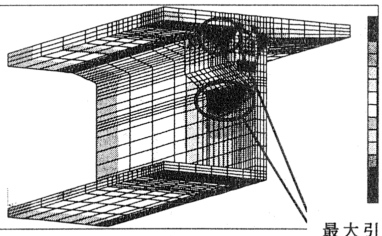
図－8 定着突起断面図

③台形断面と比較して施工性に優れるだけでなく、鋼材による補強も容易な形状である。

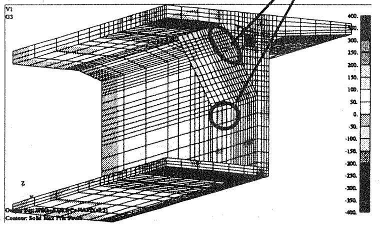
図－9に一般的な台形形状、図－10 に本橋で採用した三角形形状のFEM解析結果を示す。

三角形断面および橋軸方向の部材寸法についても同様に FEM 解析による構造検討を行って最適寸法を決定した。突起形状の断面寸法および突起長さは、大きい形状とした方が緊張力による発生応力を抑えることが可能となるが、外ケーブルを配置する空間の確保や1ブロックの重量制限等によりその大きさが制限される。

また、定着突起を設置する部材寸法等の差違によって発生する応力はそれぞれ異なるため、各要素毎に FEM 解析によるパラメータ解析を実施した。パラメータ解析による検討結果一覧を表－1に示す。その結果を考慮して最も厳しい条件下でも 0.7Pu(=5.0MN) 緊張時にコンクリートに発生する最大引張応力を 2.0N/mm^2 以下(中空 PC 鋼棒による補強を含む) になるように決定した。　実際に発生する応力と FEM 解析値との比較は、実物大試験により検証を行って確認している。本論文中の「中国横断自動車道見延橋の大容量外ケーブル定着部実物大試験報告」で詳述しているので参照されたい。



図－9　台形形状



図－10　三角形形状

表－1　検討結果一覧

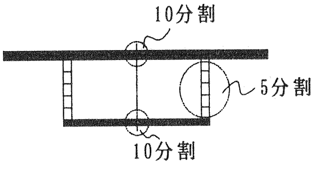
想定されるパラメータ		検討内容	FEM解析結果
主桁の部材寸法	ウェブ厚	300～500mm	小さいほど引張応力が発生する
	桁高	3300～4200mm	ほとんど変化しない
	下床版厚	200～300mm	ほとんど変化しない
定着突起	形状	台形、三角形	三角形状の方が引張応力が低減される
	奥行き長	1.5～2.5m	長いほど引張応力が発生しない
定着	進入角度	0°～12°	角度が小さいほど引張応力は発生しない
	定着方法	突起内での偏向の有無	角度が同じ場合はほとんど変化しない
補強	横リブ	有無	変形が小さくなり、引張応力が低減される
	中空PC鋼棒	有無	引張応力が低減される

4.4　終局時の検討

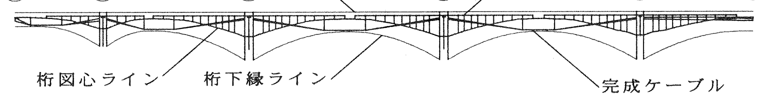
1)検討概要

外ケーブル構造の終局耐力は、内ケーブル構造のように外ケーブルの降伏点まで材料強度を見込むことができないため、一般的終局耐力が低下する。そのため、引張抵抗材として鉄筋を配置し終局耐力を増加させるが、本橋のように長大支間の場合、鉄筋量が増大するために不経済な設計となる可能性がある。そこで、荷重増加に伴う外ケーブルの応力増加量を適切に評価して設計することが必要である。

したがって、本橋の全径間に対して非線形解析を実施し、外ケーブル応力増加量の算出および終局時の断面耐力照査を行った。



図－11　ファイバーモデル



図－12　全体骨組図

2)検討方法

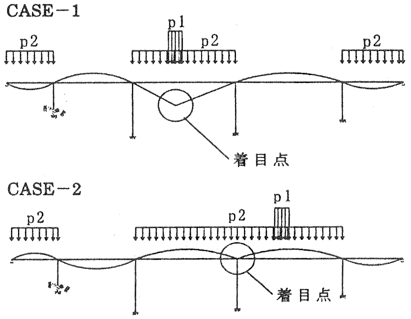
解析は、個々の材料要素の非線形特性を考慮したファイバーモデル法を用いた二次元骨組解析により行った。各材料モデルは、道路橋示方書に示す材料特性を使用した。

図－11にファイバーモデル図を、図－12に全体骨組図を示す。

荷重載荷は、荷重増分法により自重、橋面荷重、活荷重を載荷し、着目点により以下のケースに分類する。それぞれの荷重載荷ケースを図－13に示す。

CASE-1 ：P2－P3 径間中央Mmax に着目した活荷重載荷

CASE-2 ：P3 中間支点Mmin に着目した活荷重載荷



図－13 載荷ケース

3)解析結果

表－2に解析結果を示す。着目点における外ケーブルの張力増加は、コンクリート終局ひずみ時において完成ケーブルで平均190N/mm^2、架設ケーブルで平均320N/mm^{2}程度の値であった。また、終局耐力についても、終局荷重時以上の曲げ耐力があることも確認された。

表－2 解析結果

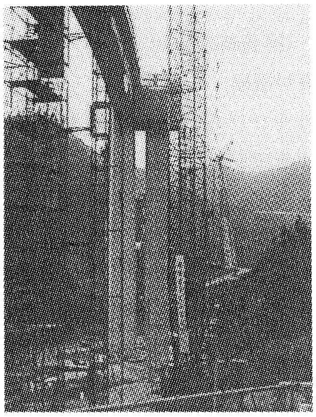
		荷重係数 γ	応力度増加量(N/mm^2)		応力度(N/mm^2)	
			完成ケーブル	架設ケーブル	完成ケーブル	架設ケーブル
CASE-1; P2-P3径間中央Mmax に着目した活荷重載荷	終局荷重作用時	1.700	129.0	181	1144.3	1201
	コンクリート終局ひずみ到達時	1.870	203.7	270	1219.0	1290
CASE-2; P3支点Mmin に着目した活荷重載荷	終局荷重作用時	1.700	90.3	206	1100.7	1229
	コンクリート終局ひずみ到達時	1.958	184.3	367	1194.6	1390.0

5．おわりに

全外ケーブル橋は、今後のPC橋の耐久性を向上させるものとして期待されている構造である。

本報告が、全外ケーブル橋における設計の一助となれば幸いである。

なお、現在、見延橋は、P3、P4橋脚の施工が完了し、平成12年８月より柱頭部の施工が開始された。施工中ではあるが本橋の設計および施工にあたり、多大なご指導、ご協力を賜った関係各位に感謝の意を表する次第である。



写真－2 現場進捗状況

参考文献

1)熊谷義次、佐伯博三、下川多米男：見延橋の設計と施工、橋梁、pp.73～83、1996.10

2)加藤敏明：鋼管・コンクリート複合構造を用いた高橋脚の新工法、橋梁と基礎、pp.145～146、1999.8

3)日本道路公団技術部：鋼管・コンクリート複合構造橋脚設計マニュアル、1998.8

4)大中英揮、岡隆延、加藤敏明、小川整：中国横断自動車道見延橋の大容量外ケーブル定着部実物大試験報告、プレストレストコンクリート技術協会　第10回シンポジウム論文集