

(79) 前谷橋-全外ケーブル方式波形鋼板ウェブPC橋-の設計

日本道路公団 九州支社 構造技術課 前田 良文
 日本道路公団 九州支社 構造技術課 前原 直樹
 オリエンタル建設(株)福岡支店 正会員 手嶋 和男
 オリエンタル建設(株)福岡支店 ○三浦 泰博

1. はじめに

前谷橋は、東九州自動車道の国分IC~末吉IC間の福山地区に位置する橋長163m(上り線)、160m(下り線)のPCT型ラーメン橋である。本橋では、PC橋の耐久性向上を図る目的により、特にPC鋼材の防錆を確実にし、検査できる構造とすることを設計の基本方針とした。そこで、①主方向PC鋼材はグラウトの充填を容易に確認・検査できる全外ケーブル構造とする、②せん断補強PC鋼材は波形鋼板ウェブ構造とすることで配置しない、③床版横締めPC鋼材はグラウト作業の不要なプレグラウトタイプとするとして、世界で初めて「全外ケーブル方式波形鋼板ウェブPC橋」を採用した。ここでは、前谷橋の設計概要を報告する。全外ケーブル方式波形鋼板ウェブPC橋の概念図を、図-1に示す。

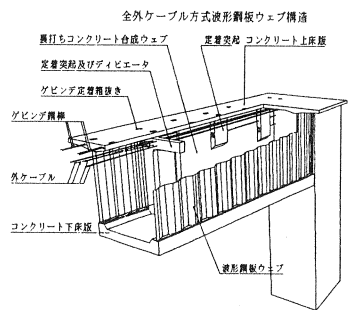


図-1 概念図

2. 工事概要

工事概要を以下に示す。また、主桁断面図および全体図を図-2および図-3に示す。

工事名：東九州自動車道前谷橋(上部工)工事
 発注者：日本道路公団 九州支社 鹿児島工事事務所
 道路規格：第1種第2級 (V=100km/h)
 荷重：B活荷重
 構造形式：波形鋼板ウェブPC箱桁T型ラーメン橋
 橋長：163.000m(上り線) 160.000m(下り線)
 支間：77.300m+84.300m 75.300m+83.300m
 幅員：22.900m(有効幅員：9.25m)

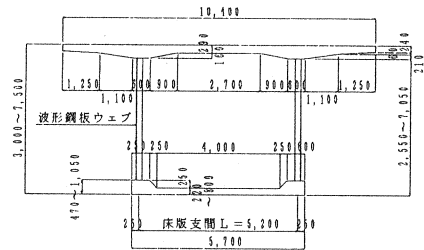


図-2 主桁断面

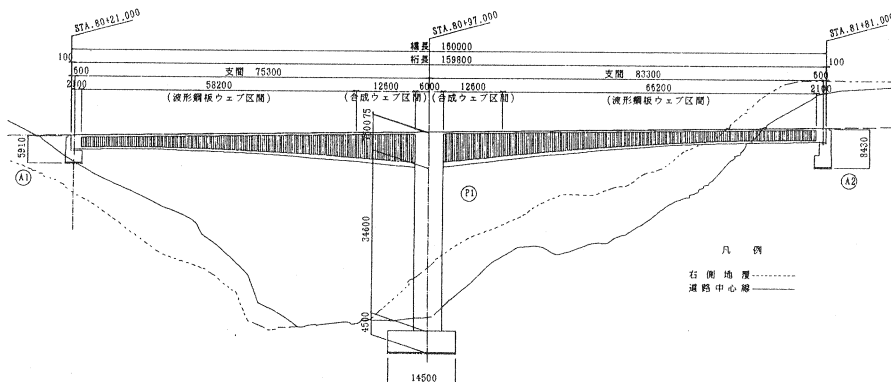


図-3 全体図

3. 前谷橋の特徴

前谷橋では全外ケーブル方式および波形鋼板ウェブ構造の採用以外にも、施工方法や外ケーブル定着構造、ずれ止め等に新たな方法を採用している。その主なものとしては、

- ①架設工法に仮設P C鋼材と大容量の外ケーブルを併用した特殊張出し架設工法（図-4 参照）を採用。
- ②外ケーブルの防錆方法は透明シースを用いたグラウトタイプを採用。
- ③外ケーブルの定着部は軽量化のため複合構造を採用。
- ④波形鋼板高5.0m以上となるウェブ部分は、コンクリートと合成されたウェブを採用。
- ⑤波形鋼板のずれ止めには、ドール橋で用いられているアングル接合（写真-1 参照）を採用¹⁾。

等が挙げられる。

特に、全外ケーブル方式の採用においては、張出し施工方法への対応が重要な課題となる。そこで、前谷橋では、①従来実績のあるP C鋼棒を用いた張り出し施工と同様に、上床版内に仮設P C鋼材を配置して張出し施工を行い、②2～3ブロック施工毎に大容量の外ケーブルを配置・緊張してプレストレスを外ケーブルへ移行させ、③不要となった仮設P C鋼材は張力を解放して次の張出しブロックまでに引出し・転用するというサイクルを繰り返す施工方法とした。なお、仮設P C鋼棒は、橋体完成後には完全に撤去を行う構造としている。

前谷橋では、以上のように施工方法を含めて日本で初めての試みとなるものも多いため、実物大の模型供試体を製作し、施工性の確認および部材応力測定等の試験を行い、設計に反映させている²⁾。

4. 設計概要

4.1 主方向構造解析

主方向の構造解析は、平面骨組解析で行った。解析において、外ケーブルは部材として評価し、定着部および偏向部で仮想部材により主桁に結合されているものとした。主桁軸線に関しては、通常の橋梁では軸線の変化は考慮しないが、本橋では外ケーブルプレストレス力の偏向成分を適切に評価するために、図-5に示すように主桁断面図心位置の変化を考慮して解析を行った。また、波形鋼板の橋軸方向の断面剛性は無視し、せん断剛性のみ考慮した。コンクリートと鋼板の合成ウェブについては、コンクリート部材のみの剛性を考慮し、ウェブ厚は波形状の平均厚とした。

終局荷重時に対する断面耐力は、部材の変形に伴う外ケーブルの張力増加を見込んで算定した。ここで、外ケーブルの張力増加としては、DIN4227, Teil1 の規定³⁾を参考にし、張出しケーブルは 50N/mm^2 、連続ケーブルは 100N/mm^2 を見込むものとした。なお、この張力増加を見込んで決定した鉄筋配置に対して、複合非線形解析により終局時の張力増加量を算出し、妥当性を確認している⁴⁾。

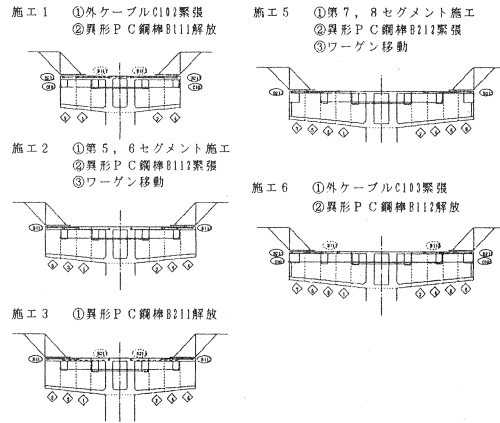


図-4 張出し架設手順

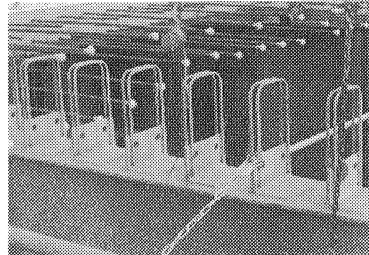


写真-1 アングルジベルの構造

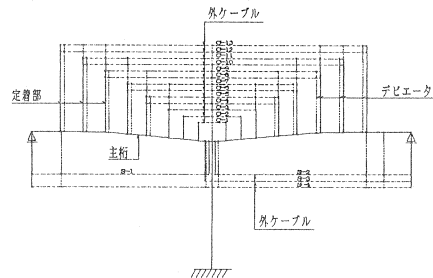


図-5 解析モデル

4.2 PC鋼材の配置

主方向の外ケーブルは 19S15.2mm (SWPR7BL) とした。鋼材本数は、主方向を PC 構造として設計し、上下線とも、張出しケーブルを 28 本、連続ケーブルを A1-P1 径間に 6 本、P1-A2 径間に 8 本配置した。外ケーブルの防錆は、保護管に透明シースを使用しグラウト充填を行う方式とした。

全外ケーブル方式では、PC 鋼材が箱内部のみに集中して配置されているために張出し床版先端部にプレスト

レス力が有効に伝達されない懸念がある。また、外ケーブルの集中配置に対する安全性を持たせるために、張出し床版先端付近にフェールセーフ PC 鋼材を配置した。この鋼材は、桁内部と違い紫外線や風雨にさらされることから、耐久性に優れ斜張橋等で使用実績のあるプレハブ PC ケーブル (19W7mm) を選定した。

張出し施工時の仮設 PC 鋼材には、異形 PC 鋼棒 $\phi 36\text{mm}$ を使用した。配置本数は、1 セグメントに対して最小 4 本を配置している。異形 PC 鋼棒を用いた理由としては、通常の PC 鋼棒を用いた場合に繰り返し転用による定着部ネジの損傷が考えられたためである。仮設 PC 鋼材は従来の張出し架設用 PC 鋼材と同様に主桁上床版内に配置するが、完成後に配置したシースが腐食しないように硬質塩化ビニール管 (VP-50) を用いている。また、本施工方法では仮設 PC 鋼材の解放・引出しが必要であるため、上床版に箱抜きを設けることとし、写真-2 に示す双胴ジャッキにより緊張および解放作業を行うこととした。箱抜き寸法は、双胴ジャッキの寸法より、橋軸方向 340mm、直角方向 280mm である。

床版横締め PC 鋼材にはプレグラウトタイプの 1S21.8S (SWPR19L) を使用し、配置間隔は波形鋼板ウェブ部で 600mm、合成ウェブ部で 750mm とした。

4.3 波形鋼板ウェブの設計

波形鋼板の波形状 (波長・波高) は、波形鋼板ウェブ橋の実績の中から橋梁規模が近いフランスのドル橋の形状に合わせることにした (図-7 参照)。ただし、波型鋼板の曲げ半径は、道路橋示方書の規定により $r=120\text{mm} \geq 7t$ とした。波形鋼板には曲げ半径に対するシャルピー吸収エネルギーを満足する SM490Y の材質の鋼板を使用した。その板厚は「波形鋼板ウェブ PC 橋計画マニュアル」¹⁾ に準じ、全作用せん断力を波形鋼板ウェブのみで負担するものとしてせん断応力度、局部座屈および全体座屈の検討を行い、最小厚さの 9mm および 12mm とした。ただし、波形鋼板製作時の初期不整やプレストレス等による面外変形の座屈強度に及ぼす影響が現時点では不明確であるため、座屈強度に対して余裕を見込んだ板厚とした。

フランジプレートは設計において構造部材として考慮していないため SM400 の材質の鋼板を使用し、その板厚はウェブおよびアングルジベルの溶接ひずみによる不陸を抑えるために 16mm とした。なお、波形鋼

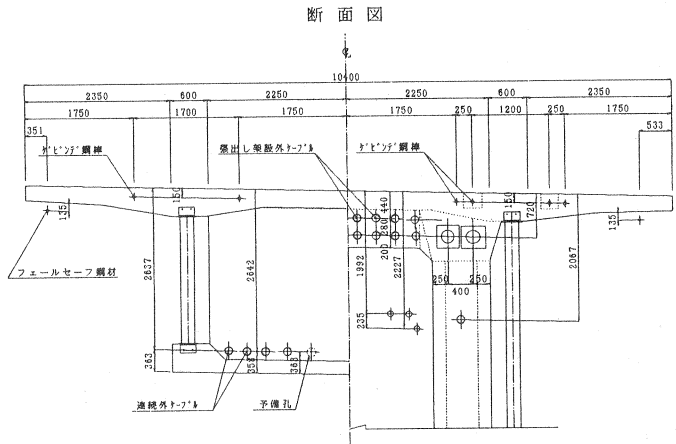


図-6 PC 鋼材配置状況

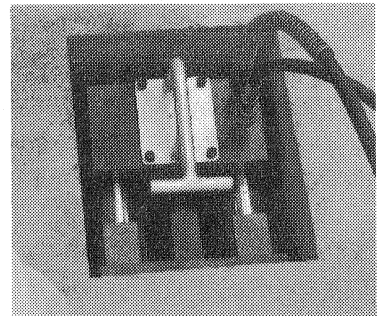


写真-2 双胴ジャッキセット

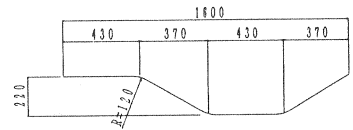


図-7 波形状

板とフランジプレートとの溶接部は、主方向の水平せん断力および横方向の面外曲げに対して許容応力度を満足するように溶接サイズを設定した。

コンクリート床版と波形鋼板のずれ止めには、アングル L-150×150 (SS400 材) を使用し、貫通鉄筋 D19 を 2 本通す孔および U 字鉄筋 D13 を 2 組溶接した構造としている。ずれ止めは、主方向の水平せん断力に対してはアングルの支圧力により負担する剛ジベルとして、横方向の面外曲げ (首振りモーメント) に対しては貫通鉄筋と U 字鉄筋による抵抗曲げモーメントにより負担するものとして設計した。

4.4 合成ウェブの設計

鋼板とコンクリートの合成ウェブ部は、FEM解析よるとコンクリートウェブと鋼板ウェブのせん断剛性 (弾性係数×厚さ) 比率に応じてせん断力が分担されていることから、それぞれの分担せん断力に対して設計を行った。コンクリートウェブに対しては、道路橋示方書に準じた設計とした。ただし、平均せん断応力度および斜引張応力度の照査は、波形状によりコンクリートウェブ厚が一定でないため最小厚さで安全側の設計とした。ここで、最小厚さは、終局荷重作用時の必要厚およびコンクリート打設と鉄筋の配置から決定した。波形鋼板ウェブに対しては、コンクリートウェブ厚との組合せて鋼板厚を種々設定できるが、今回は、波形鋼板ウェブ単独区間となる断面の鋼板厚と同じ厚さとした。

合成ウェブ部の波形鋼板とコンクリートウェブはスタッドジベルにより接合するものとし、その配置間隔および配置本数は、FEM 解析の結果から、道路橋示方書に規定されるずれ止めの最大配置間隔とした。なお、波形鋼板ウェブ単独区間から合成ウェブ区間になる最初のずれ止めには波形鋼板とコンクリートウェブの付着が無い条件では応力集中が生じるため、スタッドの付根に緩衝材を設置している。

4.5 外ケーブル定着突起の設計

波形鋼板ウェブ橋は軸方向力に対して上下床版のみでしか抵抗しないため、外ケーブルの定着方法が問題となる。一般的なコンクリート箱桁構造の場合、連続外ケーブルは支点横桁等の剛な部材に定着され、張出し架設外ケーブルは定着突起を床版とウェブの 2 面で支持する事ができる。しかしながら、波形鋼板ウェブでは、定着突起と波形鋼板ウェブ面を接合するとプレストレス力により過大な局部応力が発生するため、ウェブ面と定着突起は分離する構造とした。一方、これによりプレストレスによる偶力モーメントは上床版のみで負担することになることから、過大な曲げ引張力が上床版に発生する。

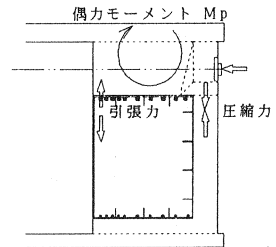


図-8 伝達システム

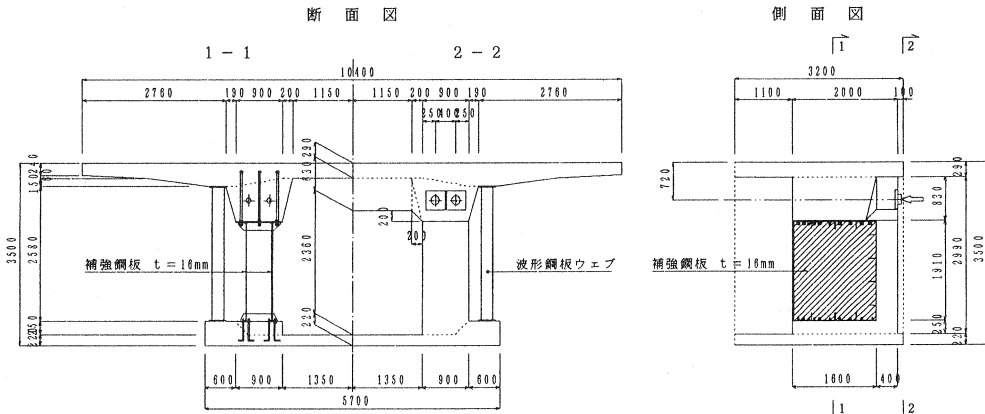


図-9 定着突起構造

そこで、上下床版を結合する補強部材を設けることにより、外ケーブル定着による力を桁全体に伝達させる構造とした。しかし、この構造では補強部材に大きな引張応力が作用し、コンクリートでは部材厚が大きくなり自重の増加となった。さらに、補強鉄筋量も莫大となり配置が不可能なこともあり、補強鋼板を用いた複合突起形式とした。そのプレストレス力の伝達システムを図-8に、定着突起の構造を図-9に示す。コンクリートと補強鋼板の接合は、上床版定着突起部に最も大きな鉛直方向引張力が作用するため、埋込みボルトの引抜き力により抵抗させる構造(図-10参照)とした。下床版部は橋軸方向のせん断力に対するボルトを、定着面の鉛直壁部は鉛直方向せん断力に対するスタッドジベルを配置した。設計段階では、定着突起部の切出しモデルによるFEM解析とその模型実験を行い、構造解析の妥当性および構造上の耐久性に問題がないことを確認した。模型実験の結果を図-11および図-12に示す。実験結果より、外ケーブル定着体の鋼・コンクリート接合部にネジ切り鉄筋(アンカーボルト)を使用する構造形式により、接合部における剛性を確保することができた。アンカーおよび

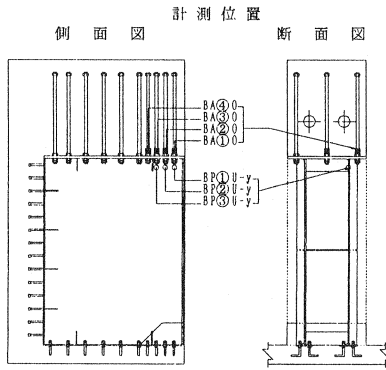


図-11 計測位置

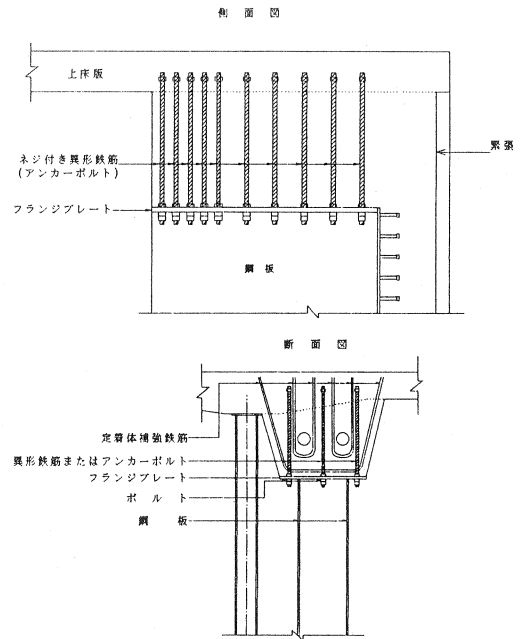


図-10 接合部の構造

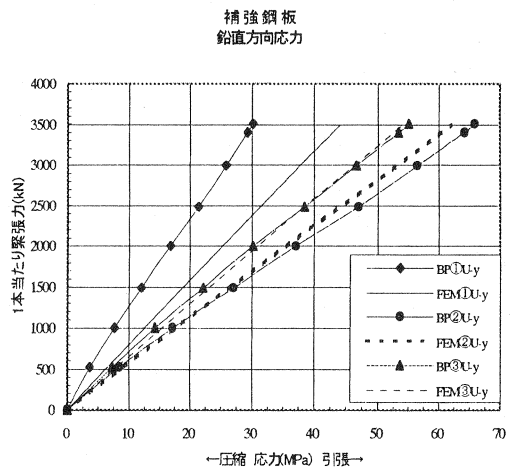
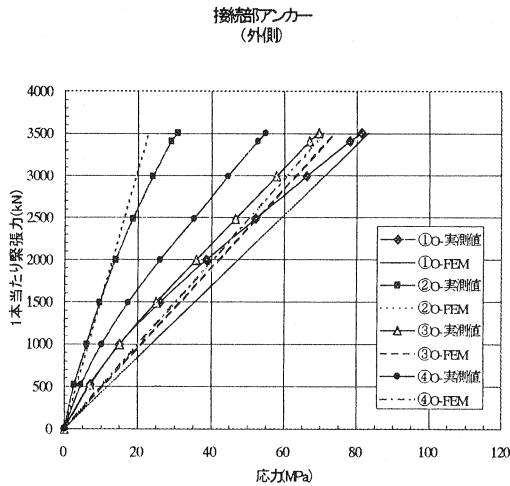


図-12 実験結果

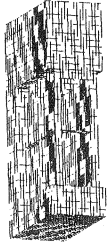


図-13 切り出し(実験体)モデル

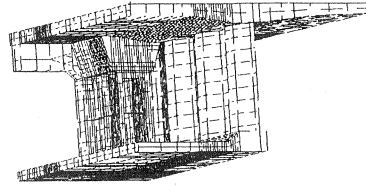


図-14 実橋モデル

表-1 試験モデルと実橋モデル応力度集計表

モデルタイプ (鋼板間隔)	定着部コンクリート				補強鋼板				定着フランジ				接続部 鉄筋応力 σ_{sz} max
	橋軸最大 σ_{cx} max	直角最大 σ_{cy} max	鉛直最大 σ_{cz} max	鉛直最大 σ_{sz} max	鉛直最小 σ_{sz} min	橋軸最大 σ_{sx} max	橋軸最小 σ_{sx} min	直角最大 σ_{sy} max	直角最小 σ_{sy} min	橋軸最大 σ_{sx} max	橋軸最小 σ_{sx} min		
試験モデル	3	2.7	8.6	134	-105	34.2	-30	159	-157	146	-140	121	
実橋モデル	2.4	2.8	7.8	105	-80	34.2	-29.9	133	-130	120	-116	108	
比率(B1/B2)	1.26	0.99	1.1	1.28	1.31	1	1	1.2	1.21	1.22	1.21	1.12	

補強鋼板に発生する応力も許容値以下に抑えることが可能であった。また、プレストレス力による接合部の有害なひびわれの発生は認められず、24時間緊張力保持した状態でのネジ切り鉄筋(アンカーボルト)のひずみの増加も最大で 27μ と小さいものであった。表-1は、切り出しモデル(図-13)と実橋モデル(図-14)のFEM解析による各方向応力の集計結果である。表より、切り出しモデルはやや厳しい条件となっており、実橋ではより安全であることが想定できる。

以上により、補強鋼板を用いた複合構造の外ケーブル定着突起構造を前谷橋では採用した。なお、この定着構造を採用することにより、上部構造重量を内ケーブル方式のPC箱桁橋と比較した場合、前谷橋に関しては波形鋼板ウェブによる軽量化も含め上下線ともに約17%低減される結果となった。

6. おわりに

平成12年7月末現在の前谷橋工事の進捗状況は、下り線側の張出施工を行っている状況であり工事が軌道に乗り最盛期を向かえるのはこれからである。設計においても、日本で初めて実施する事柄が多く試行錯誤重ねて今日に至っている。本橋で採用した張出し架設工法で平面曲線を有する橋梁にどこまで対応可能であるか、また、コンクリート床版を含めた波形鋼板ウェブ構造の座屈耐力の評価等、今後の課題も多く残っている。日本道路公団では現在、橋梁建設に新技術が積極的に取り入れられており、特にPC箱桁橋では全外ケーブル方式および波形鋼板ウェブの橋梁が多くなることが考えられる。本文がその設計・施工に携わる方々の参考になれば幸いです。

最後に、多大なご指導とご協力を頂いた関係各位に感謝いたします。

参考文献

- 1) 波形鋼板ウェブ合成構造研究会：波形鋼板ウェブPC橋 計画マニュアル(案)，1998.12.
- 2) 今泉・兼重・藤木・阿部：前谷橋—全外ケーブル方式波形鋼板ウェブPC橋—の施工性確認実験，第10回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，2000.10.
- 3) DIN4227, Spannbeton, Bauteile aus Normalbeton mit beschränkter oder voller Vorspannung, Teil1, 1988.
- 4) 角谷・青木・正司・丸山：全外ケーブル方式による波形鋼板ウェブPC橋の終局耐力に関する検討，第10回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，2000.10.