

(67) 波形鋼板ウェブPC連続箱桁『松の木7号橋』の模型実験

秋田県土木部 大館能代空港建設局長 花田 宥
 秋田県土木部 監理課技術管理室 加藤 修平
 アジア航測（株） 道路・橋梁部 ○正会員 高橋 恵悟
 横河工事（株） 技術本部技術一部 正会員 山崎 正直

1. はじめに

近年、鋼とコンクリートの材料特性を活かした合成構造や複合構造が、新しい橋梁構造の方向性を示すものとして注目され、国内でも実施例が増えつつある。本論文において報告する波形鋼板ウェブPC箱桁構造も、PC箱桁のウェブ部材をプレストレスによる変形を拘束しない波形鋼板で置き換えることにより、自重の軽量化を図った、新しい合成構造のひとつである。

秋田県は山間積雪地の国道改良工事に伴う橋梁（松の木7号橋）の建設にあたり、道路景観と自然環境の保全を重視する設計思想から、図-1に示す押し出し架設の高架橋を計画し、橋梁の構造には、主桁の軽量化による構造特性や施工性の改善が可能な、波形鋼板ウェブPC連続箱桁を採用した。

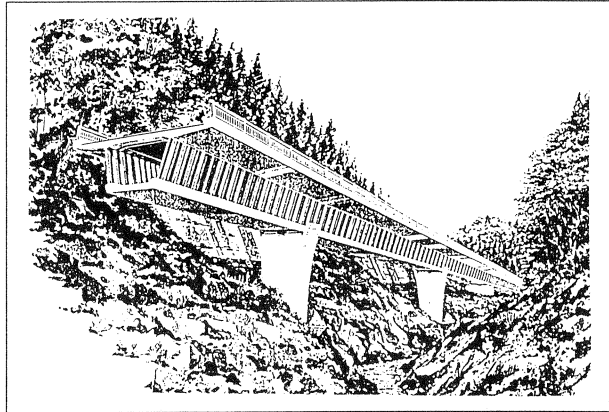


図-1 松の木7号橋完成予想図

建設に先立ち、このキャンプノンベルナル社（フランス）が橋梁構造として実用化した新しい技術を国産化するにあたり、その特異な構造特性を把握し、設計方法の妥当性を確認することを目的とした模型実験を行ったので、その概要について述べる。

2. 概要

模型実験は、表-1に示す2種類の載荷実験を行った。また模型桁載荷実験と並行して、1/2スケールの模型桁のFEM解析を行い、載荷実験の結果を検証した。

表-1 載荷実験の種類と実験方法

実験の種類	実験供試体	目的
模型桁載荷実験	模型桁 (1/2スケール)	・弾性梁としての挙動および設計方法の確認 ・終局状態の確認
波形鋼板パネル載荷実験	波形鋼板ウェブパネル (実寸大)	・せん断全体弾性座屈に関する安全性の確認 ・せん断終局状態の確認

3. 模型桁載荷実験（1/2スケール）

3.1 実験方法

模型桁載荷実験は図-2に示すような、カンチレバー状の模型桁（1/2スケール）と載荷台からなる実験装置を製作し、曲げモーメントとせん断力が同時に卓越する中間橋脚の支点付近をモデル化した。また荷重強度は、模型桁の支点上断面に最大応力度が発生するように逆算して設定した。表-2に実験の種類および載荷重の位置と大きさを示す。

表-2 実験の種類と載荷方法

実験の種類	載荷重	載荷位置
曲げ実験	90 tf	CL + 4.5 m
せん断実験	130 tf	CL + 3.0 m
曲げ破壊実験	170 tf	CL + 4.5 m

模型桁の応力度は、図-3に示すような波形1サイクルごとに計測断面を設定し、上下床版コンクリート、鉄筋、波形鋼板ウェブの各部に貼りつけたひずみゲージより計測した。

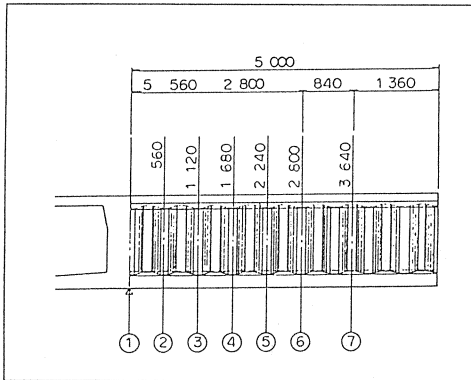


図-3 ひずみゲージ配置

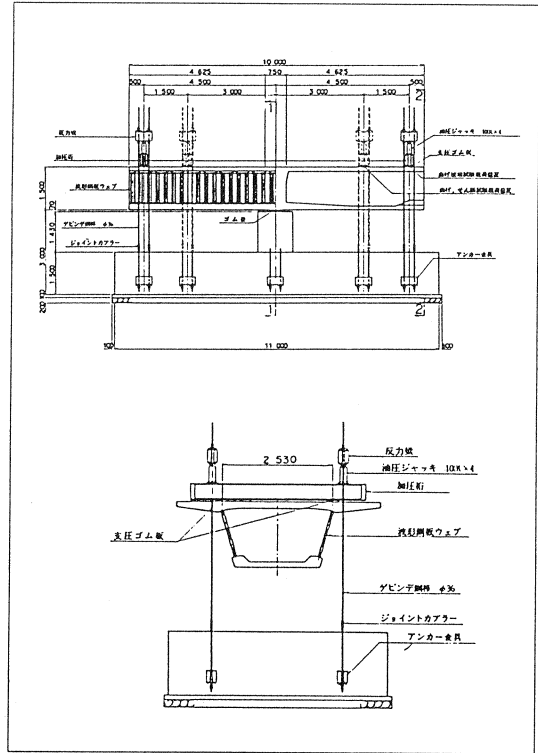


図-2 実験装置

3.3 実験結果

(1) 波形鋼板ウェブの軸方向剛性

構造部材としての波形鋼板ウェブの最大の特徴は、波形に折り曲げられた鋼板のアコーディオン効果によって軸方向に自由に変形できることである。したがって、波形鋼板ウェブの見かけの軸方向剛性は床版コンクリートに比べて著しく小さくなるため、プレストレスの導入に伴う波形鋼板ウェブの軸方向応力度は小さくなるはずである。

図-4は模型桁にプレストレス導入した直後の⑤断面の軸方向応力度分布を、上床版上側から下床版下側まで連続的に示したものである。実験値と計算値やFEM解析値との対比から、波形鋼板特有の構造特性がわかる。

- ① 設計計算上無視しているウェブの軸方向応力度はFEM解析では発生していないが、実験値では微小なレベルで生じている。
- ② FEM解析ではウェブとフランジの接合部付近に局部的な引張応力度が生じているが、実験値では確認されていない。
- ③ 実験値ではウェブの軸方向圧縮応力度は、ほぼ均等に分布している。

このような計測結果から、実際の波形鋼板ウェブは全く無応力状態にはならないことがわかった。しかしながら、発生する応力度レベルが微小であり、実用上問題にならない範囲と判断できるので、波形鋼板ウェブの軸方向剛性を無視した設計上の仮定は妥当であることが確認された。

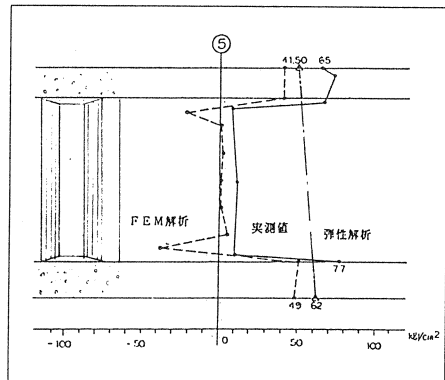


図-4 ⑤断面の軸方向応力度分布

（2）曲げ応力度

波形鋼板は軸方向に自由に変形できる性質をもつが、ウェブ部材としてせん断力を伝達することができるため、全体としては弾性梁としての挙動を示すものと考えられる。したがって、設計では曲げモーメントによる断面内の維ひずみは中立軸からの距離に比例する、『平面保持』が成立することを前提とし、上下の床版のみを有効断面と考えると、理論的には図-5のような応力度分布になる。

図-6は曲げ実験最大荷重時（90tf）における、載荷重や支点反力の影響の小さい③断面の曲げ応力度分布である。実験値、FEM解析値、弾性解析値の対比から、下記のような傾向がわかる。

- ① 上下床版内のひずみは中立軸からの距離に比例した分布となっており、実験値と他の解析結果がほぼ一致している。
- ② 最大荷重時においても波形鋼板ウェブに生ずる軸方向応力は微小である。

このことから、波形鋼板ウェブには軸方向応力がほとんど発生しないこと、波形鋼板ウェブを用いた箱桁断面についても平面保持が成立することが検証され、上下床版のみを有効断面とした弾性梁としての計算方法の妥当性が確認された。

（3）せん断応力度

波形鋼板ウェブPC箱桁のせん断力に対する設計は、波形鋼板ウェブがすべてのせん断力を受け持つものとし、道示IIによりウェブの板厚を用いて平均せん断応力度の照査を行っている。

せん断実験の最大荷重時（130tf）の波形鋼板ウェブのせん断応力度の分布を、④断面を図-7に、⑤断面を図-8に示す。実験値・FEM解析値と計算値（平均せん断応力度）とは、どちらの断面においても同じような相関を示しており、下記のような傾向がわかる。

- ① 波形鋼板ウェブのせん断応力度は高さ方向にほぼ一様に分布している。
- ② 実験値とFEM解析値は平均せん断応力度の70～75%の応力レベルである。

したがって、平均せん断応力度による照査は実際よりも若干安全側の設計となるが、ウェブの設計方法としては妥当であると判断することができる。

（4）たわみ特性

波形鋼板ウェブPC箱桁のたわみ特性を把握するため、模型桁の半分を考えた片持梁モデルによる弾性解析を基本に、実験値とFEM解析値との比較を行った。弾性解析値としては、波形鋼板ウェブの構造特性に着目して、曲げたわみ（ δ_m ）に加えてせん断たわみ（ δ_s ）を考慮した。

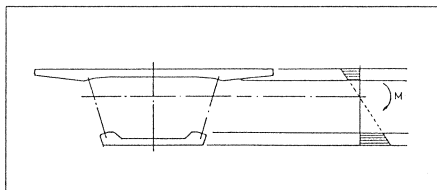


図-5 曲げ応力度の分布形状

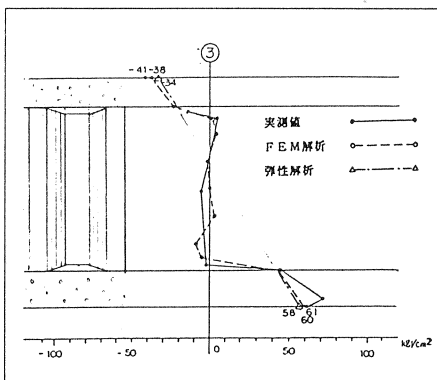


図-6 ③断面の曲げ応力度

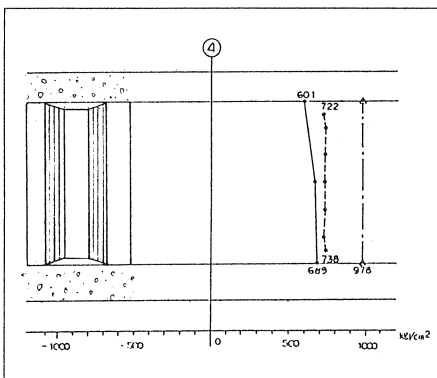


図-7 ④断面のせん断応力度

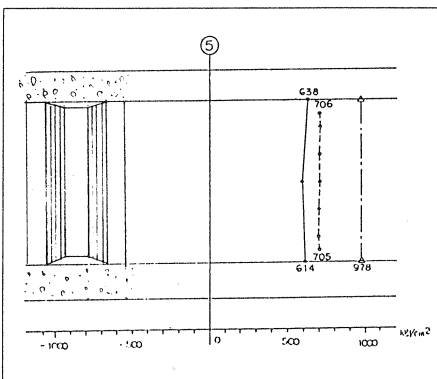


図-8 ⑤断面のせん断応力度

曲げ最大荷重時(90tf)の模型桁のたわみ曲線と解析値を図-9に示す。実験値はFEM解析値やせん断たわみを考慮した弾性解析値とよく一致しており、模型桁の先端では曲げたわみの約4倍になっている。

このことから、波形鋼板ウェブPC箱桁のたわみには、せん断たわみの影響が大きく、曲げによるたわみ量よりも卓越しているため、設計上は必要に応じてせん断たわみを考慮する必要があることがわかった。

(5) 破壊時の挙動

波形鋼板ウェブPC箱桁は、面内曲げ荷重に対してPC箱桁として設計している。

したがって、桁の曲げ破壊によって終局に至るのが望ましく、それ以前に局所的な破壊が先行してはならない。このような考えから、曲げ破壊実験では終局状態に至るまでの各部の挙動と、終局における破壊形態(ローカルな破壊が先行しないか)を確認するための載荷実験を行った。

計算より求まる模型桁の曲げ破壊荷重(170tf)を基本とし、190tfまで載荷したときの断面内のひずみ分布の変化を③断面を例として、軸方向ひずみを図-10に、ウェブの斜め方向ひずみを図-11に示す。これによれば、上下床版の軸方向ひずみは荷重にともなって増加しているが、波形鋼板ウェブの軸方向ひずみは終局荷重に近い状態でもほとんど増加せず、斜め方向ひずみのみが増加していることがわかる。

一方、床版内部の引張鉄筋ひずみは、荷重の増加に伴って図-12のように変化しており、支点上断面の鉄筋は降伏しているが、まだコンクリートの圧縮破壊には至っていない。したがって、設計上の破壊荷重に対しては、局部、全体ともに終局状態には至っておらず、計算値以上の安全性が確保されていることがわかった。

また、模型桁の破壊モードは、計測機器を取り除いた状態で破壊に至るまで載荷を行って確認した。この実験では、載荷重を260tfまであげた時点で、まず支点上の下フランジコンクリートが圧壊する曲げ破壊によって終局状態に至り、さらに、荷重を維持すべく負荷をかけた時点で、下フランジコンクリート内部のジベル先端付近で、桁軸方向のずれせん断破壊が生じた。破壊後の供試体の全景を写真-1に、ジベル先端部のずれせん断破壊のクローズアップを写真-2に示す。

このように、計算上の破壊荷重を50%以上も上回る荷重に対しても曲げ破壊で終局状態に至り、局所的な破壊は先行しないことが確認された。

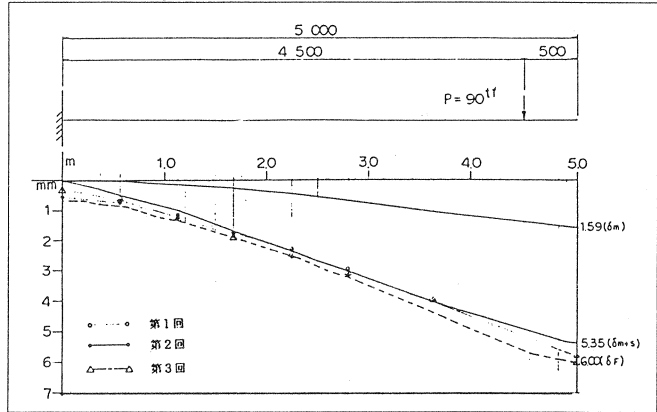


図-9 曲げ実験最大荷重時のたわみ曲線

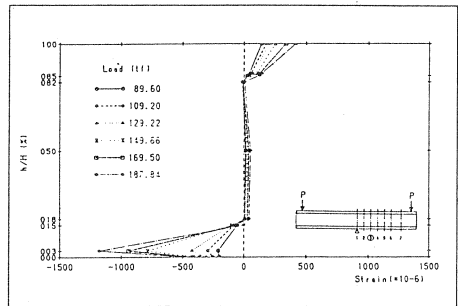


図-10 ③断面の軸方向ひずみの変化

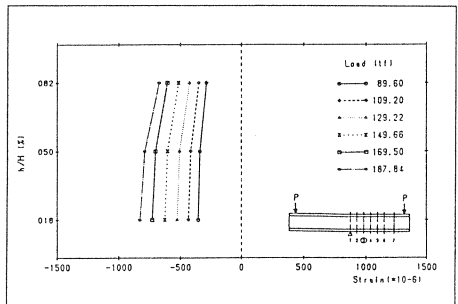


図-11 ③断面のウェブ斜め方向ひずみの変化

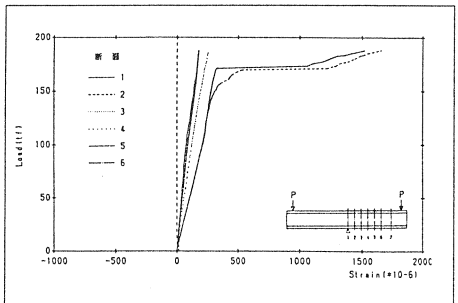


図-12 上床版鉄筋ひずみの変化

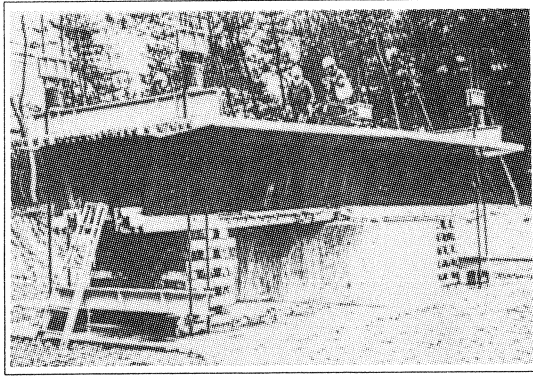


写真-1 破壊後の模型桁 (260tf载荷)

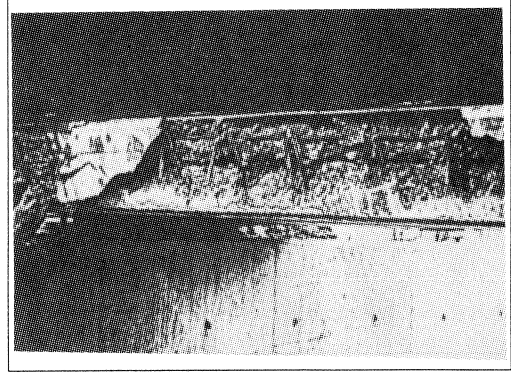


写真-2 下フランジのずれせん断破壊

4. 波形鋼板パネル载荷実験

4. 1 実験の目的

波形鋼板パネル载荷実験は、波形鋼板のせん断特性のみに着目し、鋼板の材質や波の形状寸法とせん断座屈強度の関係を実験的に求め、ウェブの設計方法およびせん断弾性全体座屈の照査式(Easleyの式)の安全性を確認する目的で、実寸大波形鋼板パネルのせん断座屈実験を行った。

4. 2 実験方法

供試体は図-13に示す、長さ6m、高さ2.21mの実寸大ウェブパネルにフランジを接合した桁高支間比の大きい単純梁とし、表-3に示すように、波の深さの異なる3種類の波形鋼板と平鋼板の補剛および無補剛の5種類を製作した。荷重は1200t加圧試験機により、供試体が座屈するまで支間中央部に载荷した。

4. 3 実験結果

各供試体の最大荷重および座屈モードを表-3に示す。平鋼板の供試体では、無補剛のB-0は小さな応力レベルで全体座屈をしているが、これを全強補剛したB-1では降伏点付近で局部座屈が発生している。一方波板の供試体は、波の深いC-75とC-150は、荷重が増加しなくなってから座屈していることから、塑性域に入ってから座屈であることがわかるが、波の浅いC-50は荷重増加中に急激に座屈しているので、弾性域での全体座屈と判断できる。

これらの実験結果から、波形鋼板ウェブは全強補剛した平鋼板と同等以上のせん断座屈耐力を有すること、波の高さを深くすることによって、せ

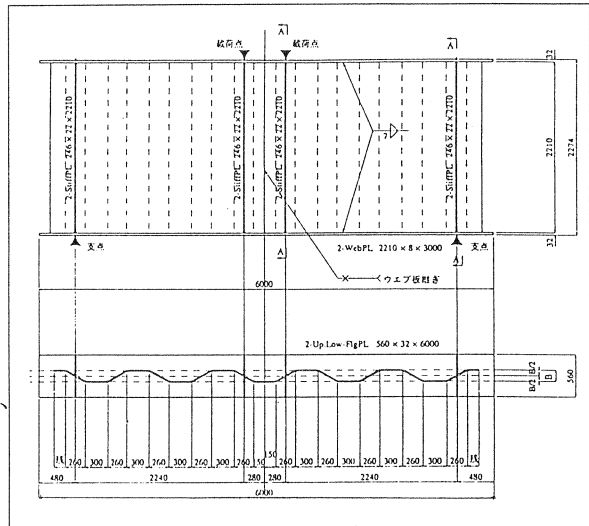


図-13 波形鋼板パネル供試体

表-3 供試体の種類と実験結果 (kgf/cm²)

供試体	C-50	C-75	C-150	B-1	B-0
ウェブ材質	SM490A				
ウェブ種類	波形鋼板			平鋼板	
補剛材	なし			全強補剛	なし
波の深さ	50 mm	75 mm	150 mm	0 mm	
実験値	1 939	2 176	2 228	2 004	1 066
降伏点	2 314	2 499	2 550	2 347	2 367
局部座屈	7 307	7 307	7 307	1 407	230
全体座屈	2 328	4 252	12 181		
座屈モード	弾性域 連成座屈	塑性域 連成座屈	塑性域 連成座屈	弾性域 局部座屈	弾性域 全体座屈

※ 〇〇〇は最小応力度を示す

せん断座屈強度が増し、材料の降伏点に達するまで荷重を受け持てることがわかった。以上をまとめると、波形鋼板ウェブのせん断耐力について図-14のように表すことができるが、ウェブ高2mに対して10cm程度の波の深さがあれば、十分なせん断座屈強度が得られることがわかる。

このことから、平均せん断応力度の照査によって板厚を決定し、面外剛性や外観的な要因から決定した波の形状に対して、局部屈および全体座屈の照査をするという設計方法は妥当であることが確認された。

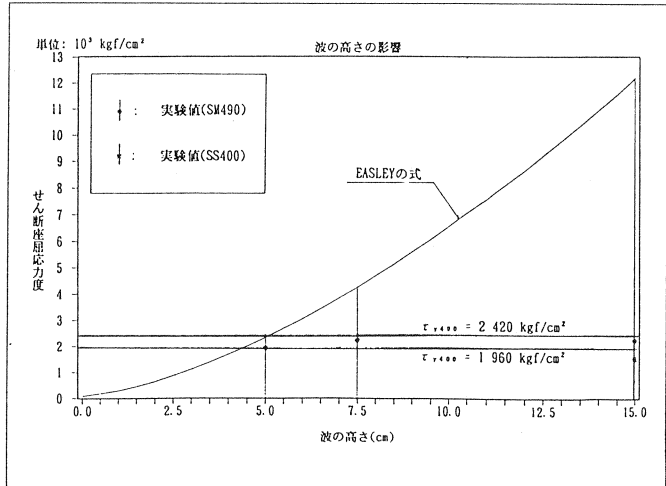


図-14 波形鋼板ウェブのせん断座屈強度

5. おわりに

以上、本研究で行った模型桁載荷実験と波板パネル載荷実験の結果をまとめると、波形鋼板ウェブPC箱桁の構造特性について下記のような結論が得られた。

- ① 波形鋼板ウェブPC箱桁は断面内の平面保持が成立するので、弾性梁として解析し設計することができる。
- ② 波形鋼板ウェブは桁軸方向応力度をほとんど負担しないので、上下のコンクリート床版の断面積を有効として求めた断面2次モーメントを用いて主桁の垂直応力度を計算することができる。
- ③ 波形鋼板ウェブ内のせん断応力度は、計算値よりも若干小さいレベルで高さ方向にほぼ均等に分布するので、平均せん断応力度による照査は妥当である。
- ④ 波形鋼板ウェブを有するPC箱桁はせん断力たわみに敏感な構造であるため、必要に応じて設計に考慮するのがよい。
- ⑤ 適切な剛度をもつ波形鋼板ウェブを用いたPC箱桁は、計算上の破壊安全度よりも大きな破壊耐力をもちかつ局部的な破壊は先行しない。
- ⑥ 適切な波の深さをもつ波形鋼板ウェブは、十分大きなせん断座屈耐力を有するので、材料のせん断降伏点を部材のせん断耐力と考えることができる。

波形鋼板ウェブPC箱桁は、ウェブを鋼材に置き換えることによる軽量化のメリットを生かした、発展性の高い合成構造である。今後はより広範囲な橋梁に適用されるよう、本実験において明らかになった構造特性が、今後の研究の参考となれば幸いである。最後に、本実験にあたり、ご指導をいただいた松の木7号橋技術検討委員会（委員長：池田尚治横浜国立大学教授）の関係各位に厚く感謝致します。

参考文献

- 1) Jacques Combault・大浦隆（訳）：『シャロール近くのモープレ橋』，プレストレストコンクリート，Vol. 34, No. 1, pp63～pp71, Jan 1992
- 2) 服部政昭・大浦隆：『波形鋼板ウェブを用いたPC単純桁の一試設計』プレストレストコンクリート技術協会第2回シンポジウム論文集，pp53～pp58, 1991. 11
- 3) 加藤修平・高橋恵悟・諏訪米二：『波形鋼板ウェブPC連続桁を用いた松の木7号橋の計画と設計』，土木学会第48回年次学術講演会概要集，pp1168～pp1169, 1993. 9