

(34) 波形鋼板ウェブエクストラード橋の 斜材定着構造及び振動実験

黒岩 正¹・西川 孝一²・高木 康宏³・飯島 基裕⁴

¹ 日本道路公団 九州支社 建設事業部 技術管理チーム (〒810-0001 福岡県中央区天神1-4-2)
E-mail:tadashi.kuroiwa@jhnet.go.jp

²正会員 日本道路公団 関東第一支社 管理事業部 改良チーム (〒110-0014 東京都台東区北上野1-10-14)
E-mail:kouichi.nishikawa@jhnet.go.jp

²正会員 三井住友建設株式会社 土木本部 P C設計部 (〒164-0011 東京都中野区中央1-38-1)
E-mail:ytakaki@smcon.co.jp

²正会員 三井住友建設株式会社 東北支店 (〒980-8608 宮城県仙台市青葉区春日町9-15)
E-mail:mijjima@smcon.co.jp

本稿は、新しい構造形式である波形鋼板ウェブエクストラード橋の斜材定着構造の安全性を確認する目的で行った実験と、その振動特性を把握することを目的として行った実験について報告するものである。斜材定着部の実験では、設計荷重時および終局時において提案した斜材定着構造の安全性が確認できた。また、終局時においては鉄筋が降伏すると波形鋼板ウェブが引張力を負担し、圧縮破壊と同時に波形鋼板ウェブに亀裂が生じ脆性的な破壊形態を示す可能性があることが明らかとなった。また、波形鋼板ウェブP C箱桁構造は今後長大化が期待される構造形式であり、その振動特性を把握しておくことは、耐風および耐震設計のためにも重要であることから、車両踏台落下実験および常時微動計測を行った。その結果、基本振動数および減衰定数は、既存の同規模のエクストラード橋およびP C斜張橋と同程度の値を示した。

Key Words : *corrugated steel web, extradosed bridge, extradosed anchorage structure, vibration characteristics, eigen value analysis*

1. はじめに

近年、公共投資の縮減により土木構造物のコスト縮減および省力化が強く要求されている。このような背景の中、コンクリート材料と鋼材料の双方の利点を活かした複合構造が合理的な構造形式として注目されている。

この複合構造の一つとして、P C箱桁橋のコンクリートウェブを波形鋼板ウェブに置き換えた波形鋼板ウェブ橋が挙げられる。これは、コンクリートウェブ橋と比較して自重を低減でき、また、プレストレスを効率的に導入できる合理的な構造として近年注目されており、これまでに施工中を含め30橋程度が建設されている。一方、エクストラード橋や斜張橋といった吊構造は、これまでに多くの実績があり、特にエクストラード橋は箱桁橋と斜張橋の中間的な特徴を持つ合理的な構造として、その採用が増加している橋梁形式である。そして、吊構造と波形鋼板ウェブ構造を併用することにより、さ

らなる合理的な構造が可能となり、橋梁の長大化を図ることができると考えられる。

波形鋼板ウェブ構造は、その普及とともに力学的特性が解明されつつあると言える。せん断力に対して補剛材無しで高い座屈耐力を有していることが確認されている。また、床版コンクリートと波形鋼板ウェブの接合部は、主桁に作用する水平せん断力に対する耐力および活荷重により床版ウェブ付け根に作用する曲げモーメントに対する耐力が要求される構造上重要な部位であり、その研究報告¹⁾も多く発表されている。しかし、これまでに波形鋼板ウェブエクストラード橋構造の研究例や施工実績はなく、その力学的特性については明らかとなっていない。従って、波形鋼板ウェブエクストラード橋の実用化のためには、斜材張力を波形鋼板ウェブに確実に伝達させる斜材定着構造を開発するとともに、斜材も含めた波形鋼板ウェブ構造の終局時までの非線形挙動を把握することが重要と思われる。

また、本構造はPC箱桁橋と比べ支間の長大化が可能となることから、今後の耐震および耐風設計において、その振動特性を把握することは非常に重要であると考えられる。さらに、完成直後における振動特性データの蓄積は、今後の供用中における曲げ剛性の変化、減衰定数の変化を確認できるなど、維持管理を行う上でも有用であると考えられる。

本稿は、波形鋼板ウェブエクストラード橋の斜材定着構造と曲げ破壊に至るまでの挙動に着目して行ったモデル実験と、その振動特性を把握するために実橋にて行った振動実験について述べるものである。

2. 橋梁概要

本稿の検討は、長崎県に建設された世界初の波形鋼板ウェブエクストラード橋である日見夢大橋の設計・施工の一環として行ったものである。日見夢大橋は、九州横断自動車道長崎大分線の起点長崎ICより約2kmに位置し、長崎市内への主要道路である一般国道34号線と日見バイパスを跨ぐ、中央支間180mのPC 3 間連続エクストラード橋であり、長崎市内への玄関口としてのランドマークとなる橋梁である。図-1 に日見夢大橋の全体一般図を、写真-1 に日見夢大橋の完成写真を示す。



写真-1 日見夢大橋完成写真

3. 斜材定着構造

エクストラード橋や斜張橋の斜材定着部に要求される性能は、終局時においても確実に斜材張力を主桁に伝達させるということである。一般的に、吊り構造では斜材張力の水平分力は主桁に軸力として作用し、鉛直分力はせん断力として作用する。ここで本橋の場合、図-2の主桁断面図に示すように、斜材定着部を波形鋼板ウェブの近傍に設ける必要性があり、斜材張力の鉛直分力がコンクリートと波形鋼板ウェブの接合部（図-2中のA部）に直接引張力として作用することになる。しかし、一般的にコンクリートと波形鋼板ウェブの接合部に用いられるアンクルジベル²⁾は、接合部に作用する水平せん断力や活荷重による床版ウェブ付け根の曲げモーメントに抵抗する構造であり、斜材鉛直分力のような鉛直方向の引張力に抵抗する構造ではない。従って、吊構造と波形鋼板ウェブ構造を融合させるにあたり、斜材張力を確実に且つ安全に主桁へ伝達させる斜材定着構造の開発が大きな課題であった。

そこで、本橋ではコンクリートと波形鋼板ウェブとの接合部に斜材張力による引張力を直接作用させず、鋼製ダイヤフラムを介してせん断力として波形鋼板ウェブに伝達させる構造を考案した。これは、斜材張力の水平分

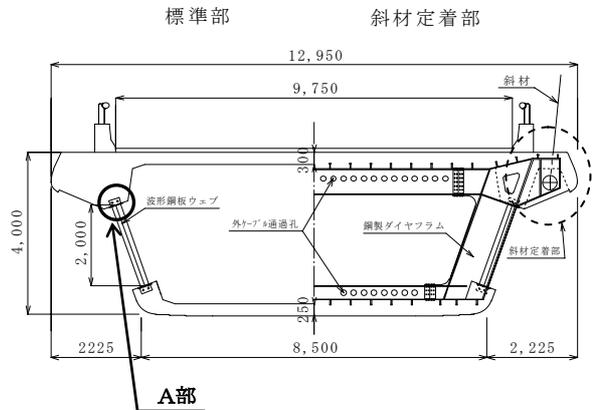


図-2 主桁断面図

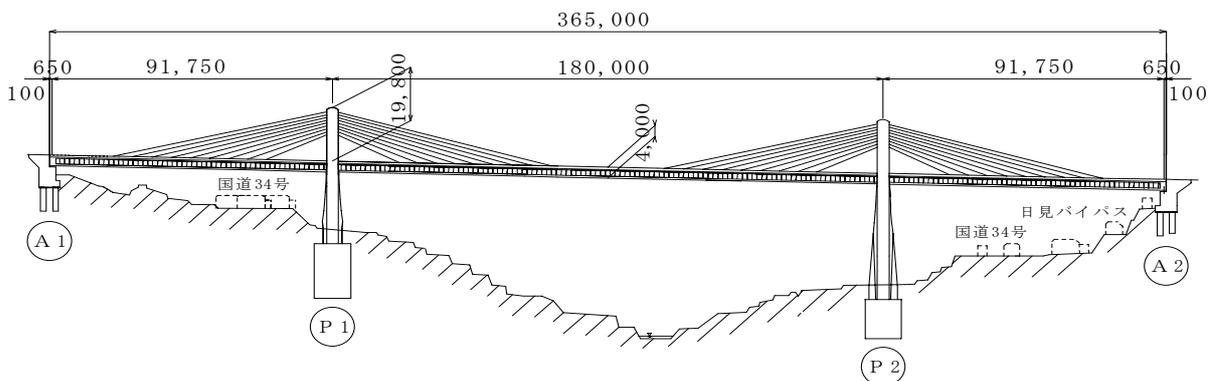


図-1 全体一般図

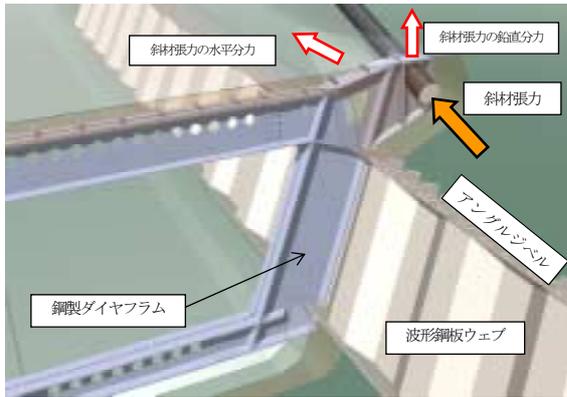


図-3 斜材定着構造の概要

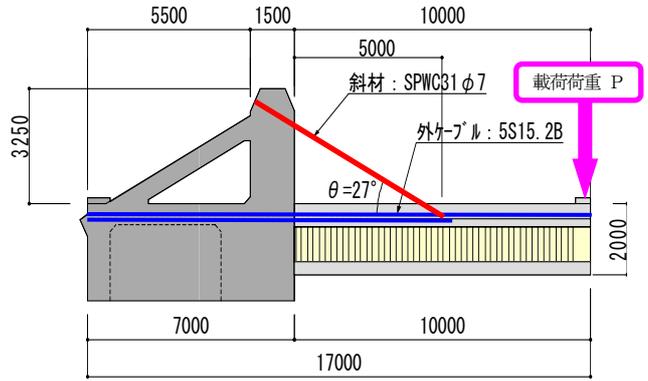


図-4 1/2モデル供試体構造図

力は圧縮に対して優位なコンクリート部材に伝達させ、鉛直分力は引張に対して優位な鋼部材に伝達させる鋼・コンクリートの複合構造である。斜材定着構造の概要を図-3に示す。

4. 1/2モデル供試体載荷実験

(1) 実験目的

考案した斜材定着構造は、新しい構造であるため安全性や応力伝達機構など、その挙動を確認する必要がある。また、これまでに斜材を有する波形鋼板ウェブ構造に関する研究報告はなく、終局までの曲げ挙動についても明らかとなっていない。従って、考案した斜材定着構造の設計手法の妥当性と波形鋼板ウェブエクストラード構造が破壊に至るまでの変形挙動や張力増加などの力学的特性を把握することを目的とし、実橋をモデル化した供試体による耐荷力試験を行った。

本実験では、構造的に重要と考えられる以下の項目に着目した。図-4に供試体の構造図を示す。

着目点①：斜材定着部の安全性

着目点②：曲げ破壊に至るまでの非線形挙動

着目点①は、考案した斜材定着構造が設計荷重時および終局時に破壊せず健全であることを確認する。着目点②では、曲げ破壊先行型として設計した供試体において、主桁が曲げ圧縮破壊するまで荷重を載荷し、その破壊形態および破壊に至るまでの非線形挙動を把握する。

(2) 実験方法

供試体は片持ち梁とし、実橋の構造を可能な限り再現できる1/2縮尺とした。表-1に供試体と実橋の比較一覧を示す。また、実験は以下に示す各ステップの荷重状態において、前述した着目点の検証を行った。図-5に荷重ステップの概要を示す。

表-1 供試体と実橋の比較

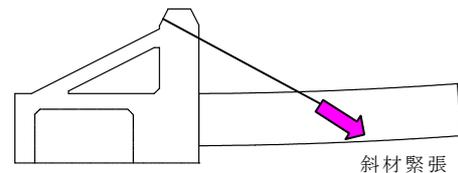
		1/2供試体	実構造物
桁高	—	2000 mm	4000 mm
波形鋼板ウェブ高さ	—	1000 mm	2000 mm
波形鋼板ウェブ板厚	SM490Y	6 mm	9 mm~28 mm
斜材	規格	SPWC31 φ7	SPWC127 φ7
	素線本数	31 本	127 本
	断面積	1190 mm ²	4890 mm ²
外ケーブル	規格	5S15.2B	19S15.2B
	断面積	694 mm ²	2635 mm ²
	引張強度(f_{pu})	1870 kN	7670 kN
		1305 kN	4959 kN

<ステップ1>

目的：設計荷重時における着目点①の検証

方法：外ケーブル張力を $0.6f_{pu}$ まで緊張し定着した状態で、斜材張力を $0.6f_{pu}$ まで緊張

ステップ1：設計荷重時（斜材張力 $0.6f_{pu}$ ）



<ステップ2>

目的：終局時（主桁の曲げ破壊時）に至るまでの着目点①~③の検証

方法：ステップ1の状態から、片持ち梁の先端部に荷重を漸増載荷し、主桁が破壊に至るまで載荷

ステップ2：終局時（主桁の曲げ破壊）

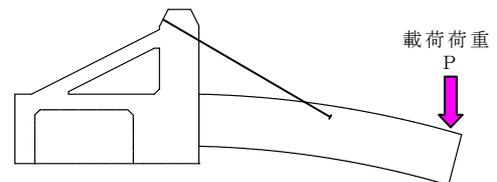


図-5 荷重ステップ概要

5. 載荷実験結果

(1)ステップ1（設計荷重時）の挙動

a) 斜材定着部の安全性

設計荷重時（斜材張力 $0.6f_{\mu}$ 時）において、コンクリートのひび割れや鋼製ダイヤフラムの亀裂等はなく健全であり、斜材定着構造の安全性が確認できた。

b) 鋼製ダイヤフラムの挙動

斜材張力 $0.6f_{\mu}$ における鋼製ダイヤフラムの鉛直方向応力度分布を図-6に、解析結果を図-7に示す。実験の結果、引張材①に大きな引張応力が、圧縮材②には圧縮応力が生じており、①および②をフランジとするI型断面の鋼部材にて斜材張力に抵抗する挙動が明らかとなった。また、図-8に示すように、実験値とFEM解析値は精度良く一致していた。

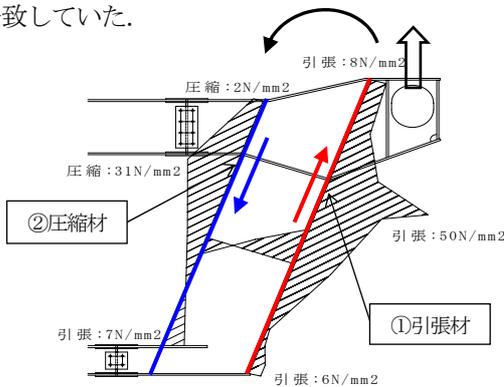


図-6 鉛直方向応力度分布（実験値）

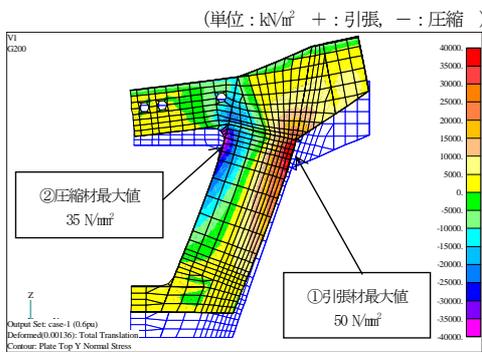


図-7 鉛直方向応力度分布（FEM解析）

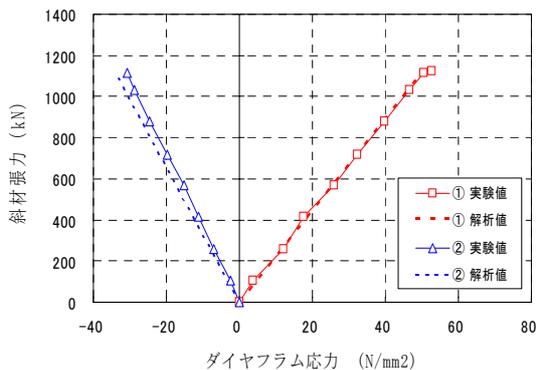


図-8 実験値とFEM解析値の比較

(2)ステップ2（終局時）の挙動

a) ひび割れ正常および破壊状況

ステップ2では、主桁が曲げ破壊に至るまで荷重を載荷した。曲げ破壊時までの挙動は、荷重の増加に伴い主桁基部断面の上縁にひび割れが発生し、次に上床版の軸方向筋が降伏して最終的には下床版コンクリートが圧壊して耐力を失った。主桁のひび割れ状況を図-9に示す。

b) 鋼製ダイヤフラムの挙動

主桁の曲げ破壊時において、斜材張力は最大 $0.9f_{\mu}$ に達したが、鋼製ダイヤフラムの引張材の降伏や圧縮材の座屈などは生じず、十分な耐力を有していた。また、定着部近傍ではひび割れや鉄筋の降伏が生じたが、コンクリートの剥離や圧縮破壊等の損傷は生じなかった。従って、考案した斜材定着構造は、斜材の引張強度程度においても健全であり、終局時までの安全性が確認できた。

c) 波形鋼板ウェブの破断

終局時には、主桁基部断面のコンクリートと波形鋼板ウェブの接合部においてウェブに亀裂（図-10のB部）が

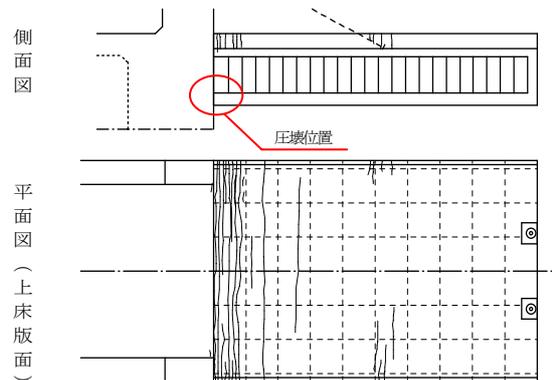


図-9 ひび割れ状況（ステップ2）

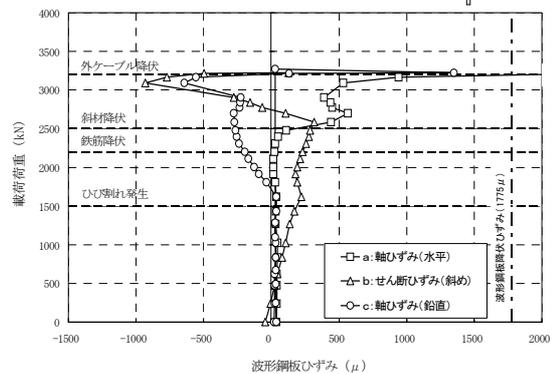
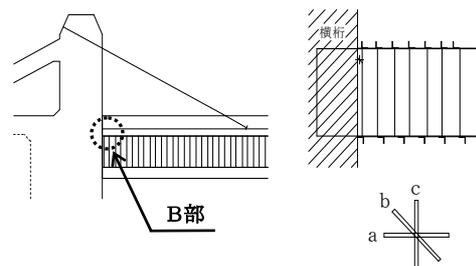


図-10 波形鋼板ウェブのひずみ履歴

生じた。一般的に、柱頭部などの横桁では波形鋼板ウェブのウェブのみを横桁内に埋め込み、フランジは埋め込まない構造としている。しかし、主桁基部断面の上縁近傍では、上床版にひび割れが発生して軸方向鉄筋が降伏すると、ウェブに応力が集中し、水平方向の軸ひずみ α (図-10) が降伏ひずみに達してウェブに亀裂が生じることが明らかとなった。従って、ラーメン橋や連続桁橋などの支点上(柱頭部横桁や端部横桁)では、波形鋼板ウェブの破断を回避するために波形鋼板ウェブのフランジも横桁内に埋め込む構造とすることが必要だと考えられる。

(3) 載荷荷重と載荷点変位の関係

載荷荷重 P と載荷点変位 δ について、表-2に示す解析ケースと実験値との比較を行った。解析Iおよび解析IIは、図-11に示すファイバーモデルによる2次元骨組解

析で行った。ここで、斜材および外ケーブルは内力として評価せず、トラス要素としてモデル化している。また、波形鋼板ウェブのフランジとウェブについては同等の強度および同面積となる鉄筋量を算出し、ファイバー要素としてモデル化した。

図-12に実験値と解析値の結果を示す。なお、図中の設計荷重時相当とは、主桁上縁にひび割れが発生した状

表-2 解析ケース一覧

	解析方法	解析モデル	次数	波形鋼板剛性(鉄筋換算)
解析I	非線形骨組解析	ファイバーモデル	2次元	無視
解析II	非線形骨組解析	ファイバーモデル	2次元	考慮
解析III	非線形FEM解析	ソリッドモデル	3次元	考慮

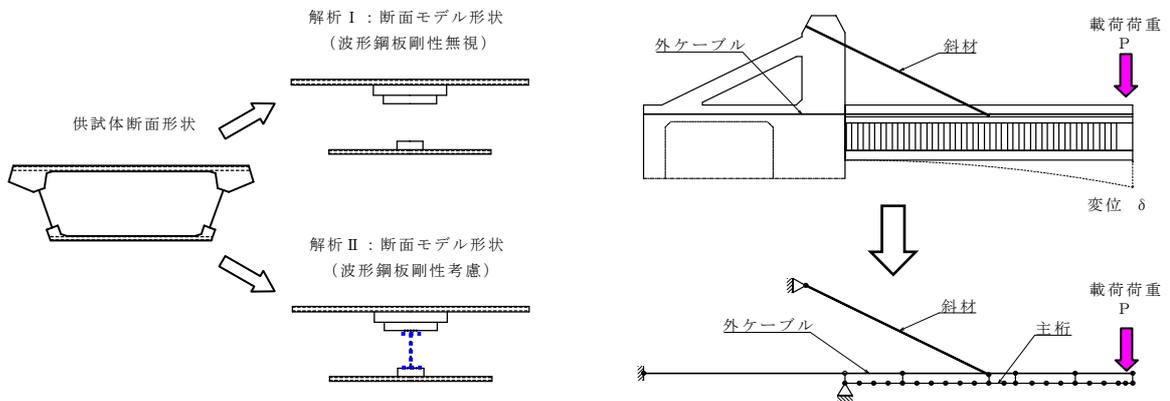


図-11 解析IおよびIIにおける解析モデル

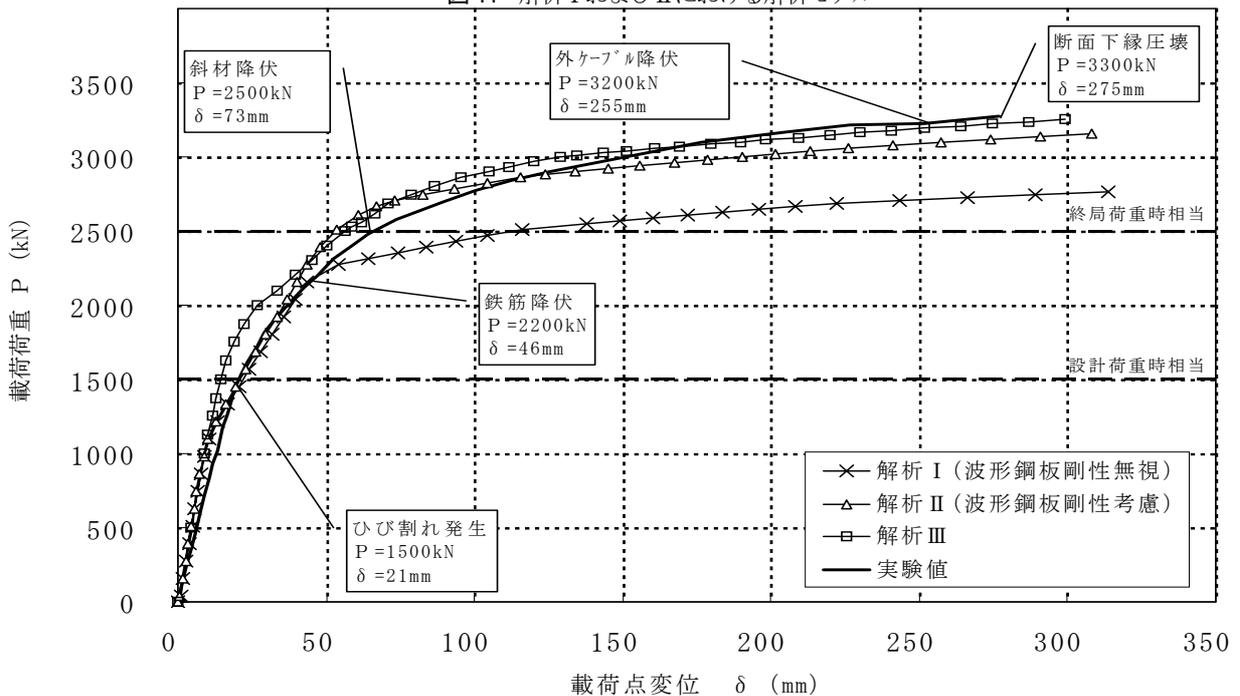


図-12 実験値と解析値の荷重変位曲線

態とし、終局荷重時相当とは主桁の破壊時ではなく斜材張力が実橋の設計における終局荷重作用時の斜材張力 $0.82f_{pu}$ となる状態と定義した。

荷重点変位と荷重荷重の関係は、主桁基部断面の軸方向鉄筋が降伏するまでは全ての解析結果で実験値とほぼ一致し、その後は波形鋼板ウェブおよびフランジの剛性を考慮した解析Ⅱと実験値がほぼ一致した。これは、実験では上床版コンクリートのひび割れが波形鋼板の上フランジ位置まで達し、その後フランジとウェブで構成される I 断面にて曲げモーメントに抵抗したためと考えられる。なお、図-13に示す主桁基部近傍の波形鋼板ウェブの水平ひずみによると、波形鋼板ウェブの水平ひずみは主桁の鉄筋が降伏するまではほとんど変化せず、斜材降伏時より急激に増加していることがわかる。これは斜材が降伏したことにより主桁の負担する荷重が急激に増加した影響であり、以上からも波形鋼板ウェブが曲げモーメントに抵抗していることが確認できる。ここで、一般的に波形鋼板ウェブはその形状から軸方向の剛性が小さく、設計計算においてその剛性は無視することができると考えられていた³⁾。しかし、コンクリート床版のひび割れが貫通するような部位では波形鋼板ウェブのフランジを含めた剛性を考慮することにより、終局時までの変形挙動を精度良く評価できることが本実験より明らかとなった。なお、ソリッドモデルで非線形 FEM 解析を行った解析Ⅲと実験値は良く一致していたが、終局荷重作用時までの曲げ挙動は非線形 FEM 解析より簡易なファイバーモデルによる 2 次元非線形骨組解析により十分評価可能であることが確認できた。

以上の結果より、波形鋼板ウェブ橋の設計手法の一つとして以下の点が言える。終局荷重時の検討の際に、支

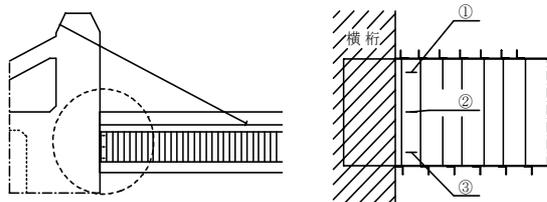
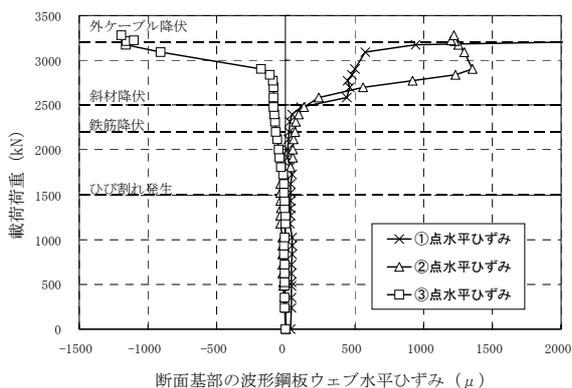


図-13 波形鋼板ウェブの水平ひずみ履歴

点上や支間中央部などの曲げモーメントが大きく作用する箇所（破壊抵抗曲げモーメント÷作用曲げモーメント=1.0 程度の箇所）では、補強鋼材量が多く配置されるのが一般的である。しかし、2次元非線形骨組解析により終局時における補強部位を適切に評価し、当該部位の波形鋼板ウェブのフランジを含めた剛性を考慮することにより破壊抵抗曲げモーメントが向上し、その結果従来の手法にて決定される補強鋼材量（鉄筋および P C 鋼材）を低減でき、より合理的な設計が可能となると考えられる。

6. 主桁振動実験

(1) 実験目的

波形鋼板ウェブ橋およびエクストラード橋それぞれについて振動特性の把握を目的とした実験および解析が行われているものの⁴⁾⁵⁾、その数は他の構造形式である P C 箱桁橋および斜張橋などと比較して非常に少ないのが現状である。また、ウェブに波形鋼板を使用することで、P C 箱桁橋と比べ支間の長大化が可能となることから、今後の耐震および耐風設計においてその振動特性を把握することは非常に重要であると考えられる。そこで、面内振動の固有振動数および減衰定数把握することを目的に、実橋において常時微動計測および車両踏台落下法による振動実験を行った。

(2) 実験方法および結果

本実験では、面内曲げモードを対象として車両踏台落下法および常時微動による振動計測⁶⁾を行った。図-14に車両落下位置および加速度計位置を示す。車両落下実験では 10t クレーン（車両重量 128kN）を中央支間の L/2 および P2 橋脚から L/4 の幅員中央に 200mm の高さから落下させた。

表-3に固有振動数および減衰定数、図-15に振動モードを示す。本実験より全部で 5 つの振動モードを把握することができた。減衰定数は、各モードの最大振幅点位置の加速度波形を用いて自由減衰法より算出した。その結果、面内 1 次モードの値は 0.007 であった。ただし、減衰定数は振幅が小さければ、小さくなるという振幅依存性が存在することから、本実験程度の振幅の場合、減衰数が小さくなることは十分に考えられる。

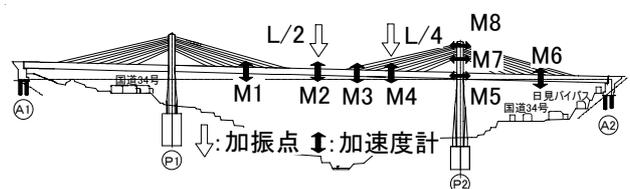


図-14 加振点・加速度計位置

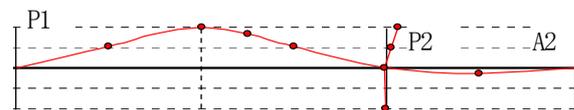
(3) 固有値解析

本実験で得られた振動特性と解析値を比較することは、今後の耐風、耐震設計において有用であることから、本結果を踏まえ、固有値解析を実施した。解析には、ビーム要素を用いた3次元骨組モデルを使用した。コンクリートの弾性係数は、材齢 28 日の材料試験値とし、波形鋼板のせん断分担率を考慮したせん断剛性を使用した。また、より精度を高めるため、換算断面を使用した。さらに、実験時の両桁端のゴム支承の変形量が非常に小さいものと仮定して、両桁端の拘束条件をピン支持とした。

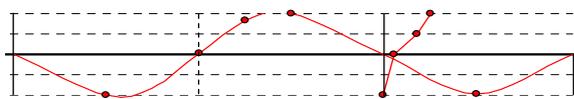
その結果、表-3 に示すように、実験値と解析値との振動モードが一致し、また、固有振動数においても実験値との差が 3%以下と非常に良く一致した。このように、波形鋼板ウェブのせん断変形を考慮し、実験の状態を適切にモデル化することにより、精度良く実験値を再現することができた。

表-3 実験結果および解析結果

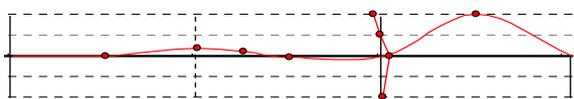
面内モード	実験		解析		
	f (Hz)	減衰定数	f (Hz)	刺激係数	
				橋軸	鉛直
対称 1 次	0.73	0.007	0.71	-1.3	52.9
逆対称 1 次	1.48	0.004	1.47	-5.6	6.7
対称 2 次	1.69	0.005	1.64	5.0	55.1
逆対称 2 次	1.83	0.006	1.82	1.5	-2.9
対称 3 次	3.12	0.008	3.06	-7.5	35.5



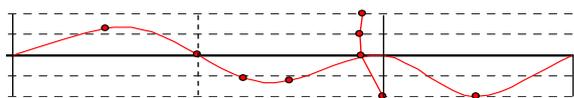
(a) 対称 1 次モード



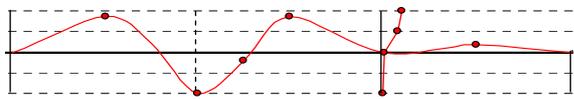
(b) 逆対称 1 次モード



(c) 対称 2 次モード



(d) 逆対称 2 次モード



(e) 対称 3 次モード

図-15 実験固有振動モード

(4) 他橋梁との比較

a) 固有振動数

図-16 に他橋梁⁴⁾との基本振動数比較を示す。他橋梁とは PC 橋が 11 橋、波形鋼板ウェブ PC 橋が 5 橋、エクストラードード PC 橋が 3 橋である。同図内に加藤ら⁷⁾による相関式および耐風便覧式⁸⁾を示す。

本橋の基本振動数は、同支間規模のエクストラードード橋と同程度の値であり、波形鋼板ウェブを有することによる影響は小さかった。これは、基本振動数（対称 1 次モード）では波形鋼板ウェブのせん断変形量が小さいため⁵⁾であると考えられる。これより、本構造の場合においても既往の算定式で基本振動数の推定が可能であると言える。

b) 減衰定数

既往の研究⁹⁾では、エクストラードード橋の減衰定数は PC 斜張橋と同等であると言われている。そこで、図-17 において、PC 斜張橋の減衰特性について振動モードを主塔の曲げ変形の有無により区分した竹田ら¹⁰⁾の提案式との比較を行った。これより、PC 橋および波形鋼板ウェブ橋の場合は何れの式においても相関性が確認されないが、本橋および他のエクストラードード橋における最低次数は主塔曲げ変形ありの算定式との相関が高いことが確認され、本橋においても PC 斜張橋の減衰特性と同程度の結果が得られたものと言える。

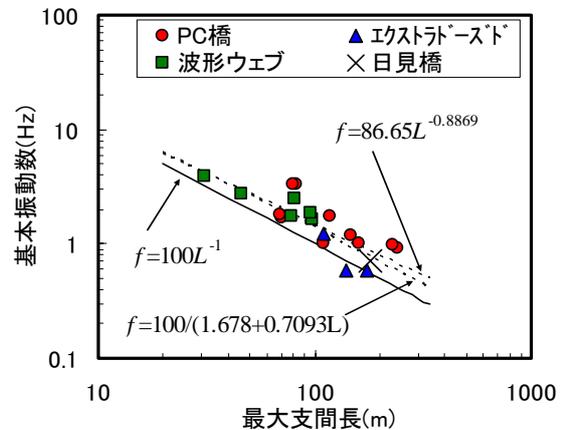


図-16 基本振動数比較

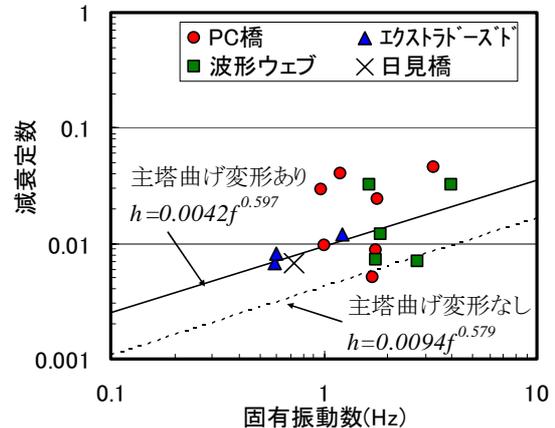


図-17 減衰定数比較

7. まとめ

以下に 1/2 モデル供試体載荷実験および主桁振動実験により得られた知見を示す。

- ①考案した斜材定着構造は、設計荷重時および終局時においても降伏や座屈等の破壊は見られず、その安全性と設計の妥当性が確認できた。
- ②本構造の終局時までの曲げ変形挙動は、ひび割れが上フランジまで貫通した部位の波形鋼板ウェブおよびフランジの剛性を考慮したファイバーモデルによる 2 次元非線形骨組解析にて精度良く評価できることが明らかとなった。
- ③終局時において、主桁コンクリートのひび割れが貫通して波形鋼板ウェブのフランジに達する場合、フランジが連続していない箇所についてはウェブに応力が集中し、波形鋼板ウェブに亀裂が生じることが明らかとなった。従って、支点上において波形鋼板ウェブを横桁コンクリートに埋め込んで接合する場合には、フランジもコンクリートに埋め込むことで、波形鋼板ウェブの亀裂を回避できると考えられる。
- ④面内 1 次モードである対称 1 次モードの振動数 (0.73Hz) は、他のエクストラドーズド橋と同程度の値を示し、既往の算定式で推定可能である。
- ⑤面内 1 次モードの減衰定数 0.007 は、他の PC 斜張橋と同程度の値を示した。
- ⑥実験時の桁端の支持条件および材料特性値を考慮した解析により、実験時の振動特性を評価可能であることが確認された。

参考文献

- 1) 角谷 努, 池田尚治: 長大支間を有する波形鋼板ウェブ PC 橋の波形鋼板とコンクリート床版の新しい接合構造について, プレストレストコンクリート, プレストレストコンクリート技術協会, pp.79-86, 2003.
- 2) 鈴木永之他: 波形鋼板ウェブ橋のせん断座屈挙動に関する実験的研究, 第12回プレレストコンクリートの発展に関するシポジウム論文集, プレストレストコンクリート技術協会, pp.549-552, 2003.
- 3) 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.
- 4) 角谷他: 波形鋼板ウェブ橋の振動特性その 2 - 振動解析 -, プレストレストコンクリート, pp35-43, Vol. 45, No. 3, 2003.5
- 5) 角谷他: 波形鋼板ウェブ橋の振動特性その 1 - 振動実験 -, プレストレストコンクリート, pp90-99, Vol. 45, No. 2, 2003.3
- 6) 橋梁振動研究会: 橋梁振動の計測と解析, 技報堂, 1993.10
- 7) 加藤他: 橋梁実測振動特性の統計解析, 土木学会論文報告集, No.311, pp.49-58, 1981.7
- 8) 日本道路協会: 道路橋耐風設計便覧, 1981.7
- 9) 河野他: 第 2 マカワ橋 (エクストラドーズド PC 橋) の振動特性, 第 10 回プレレストコンクリートの発展に関するシポジウム論文集, pp.685-690, 2000.10
- 10) 竹田他: 実測データに基づく PC 斜張橋の減衰特性について, 土木学会論文集, No.626, I-48, pp.147-161, 1997.7

THE EXTRADOSED CABLE ANCHORAGE AND THE VIBRATION TESTS FOR EXTRADOSED BRIDGE WITH CORRUGATED STEEL WEBS

Tadashi KUROIWA, Koichi NISHIKAWA, Yasuhiro TAKAKI and Motohiro IJIMA

This paper reports experimentation which were conducted for the purpose of grasping the nonlinear behavior at the ultimate state and for the check of the safety of the proposed extradosed cable anchorage structure for extradosed bridge with corrugated steel web. From the experimental results, the safety of the proposed extradosed cable anchorage structure at the ultimate and design load was confirmed. It was also found that the nonlinear behavior of this extradosed bridge with corrugated steel web can be correctly predicted by nonlinear analysis by the fiber model in consideration of the rigidity of a corrugated steel web. Vibration tests were conducted to identify the vibration characteristics of the bridge for wind-resistant design and earthquake-resistant design. As a result, fundamental natural frequency and damping ratio were similar to existing extradosed bridges and PC cable-stayed bridges of this scale.