

論文・報告

中部横断自動車道興津川橋（仮称）の設計・施工

～波形鋼板・コンクリートウェブ混合桁橋～

Design and Construction of Okitsugawa Bridge

今井 平佳 *1
Hirayoshi IMAI

狩野 兼良 *2
Kaneyoshi KANOU

栗田 善央 *3
Yoshio KURITA

阿部 啓介 *4
Keisuke ABE

村上 賢二 *5
Kenji MURAKAMI

中部横断自動車道 興津川橋(仮称)は、中部横断自動車道の新清水ジャンクションと富沢インターチェンジ間の二級河川・興津川渡河部に位置するPC5径間連続ラーメン箱桁橋である。5径間のうちA1～P3間が波形鋼板ウェブ、P3～A2間がコンクリートウェブを有する混合構造の橋梁である。当橋梁の設計上の配慮としては、高強度PC鋼材の採用により鋼材本数の低減を図り、工事コストの削減・省力化を実現している。また、外ケーブルの張力測定として高次振動法による測定を採用しており、その適用性に関する検証を実施している。本文は、これらの設計・施工における検討および対策の概要について報告するものである。

キーワード：高強度 PC 鋼材，外ケーブルの張力測定

1. はじめに

興津川橋(仮称)は、中部横断自動車道のうち、静岡県静岡市清水区の山岳部に位置しており(図1)、二級河川興津川、県道大向・富士線などを大きく跨ぐ、最大橋脚高57 m・最大支間144 mのPC5径間連続ラーメン箱桁橋である。

当橋梁の構造形式は、波形鋼板ウェブ箱桁とコンクリートウェブ箱桁を、接合部にて連結する混合桁橋である。交差条件により県道大向・富士線および興津川を横架するA1～P3径間には波形鋼板ウェブPC箱桁を採用し、P3～A2 径間についてはコンクリートウェブ箱桁を採用している。そのほかの特徴として、内ケーブルにおいて高強度PC鋼材(SWPR7HT 12S15.2)を採用しており、PC鋼材の高強度化によって架設外ケーブルを不要としている。高強度PC鋼材による高い定着力に対する耐力および定着

性能を確認するため、実施工に先立ち性能確認試験を行っている¹⁾。



図1 架橋位置

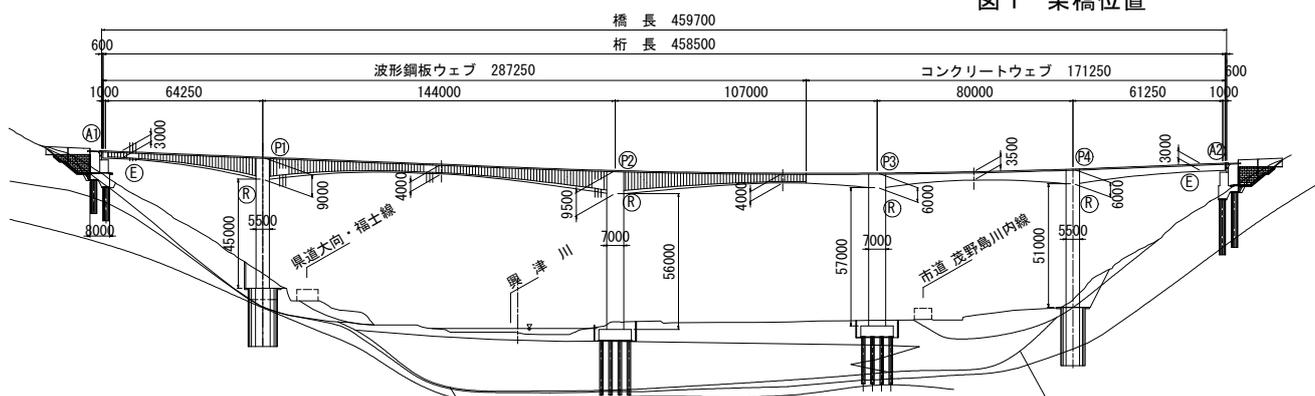


図2 橋梁一般図

*1 川田建設(株)東日本統括支店事業推進部 部長

*2 川田建設(株)東日本統括支店事業推進部 次長

*3 川田建設(株)東日本統括支店(名古屋支店) 事業推進部工事課 工事長

*4 川田建設(株)東日本統括支店技術企画室 課長

*5 川田建設(株)東日本統括支店事業推進部技術課 課長

さらに、外ケーブル(SWPR7BL 19S15.2)の張力測定として高次振動法による測定を採用しており、その適用性に関する検証を実施している²⁾。

2. 橋梁概要

当工事の橋梁概要は以下のとおりであり、橋梁一般図を図2に示す。

工事名：中部横断自動車道 興津川橋(PC上部工)工事
架橋位置：静岡県静岡市清水区

工期：2011年4月～2016年1月

発注者：中日本高速道路（株）

施工者：川田建設（株）

道路規格：第1種第3級 B規格（設計速度 $V=80$ km/hr）

橋長：459.700 m

支間長：64.25 m+144.0 m+107.0 m+80.0 m+61.25 m

有効幅員：9.500 m

構造形式：PC5径間連続ラーメン波形鋼板ウェブ箱桁橋

架設工法：張出架設工法（径間部）

吊支保工施工（側径間閉合部, 径間閉合部）

使用PC鋼材：内ケーブル12S15.2（高強度PC鋼材）

外ケーブル19S15.2（エポキシ樹脂被覆鋼材）

床版横締め鋼材1S21.8（プレグラウト鋼材）

横桁横締め鋼材1S28.6（プレグラウト鋼材）

交差条件：県道 大向・富士線（P1-P2間）

二級河川 興津川（P1-P2間）

市道 茂野島河内線（P3-P4間）

3. 高強度 PC 鋼材定着具の開発

当橋梁の定着具にはVSL工法³⁾を採用している。VSL定着具と高強度PC鋼材を組み合わせるにあたり、定着具の耐力および定着性能を確認するため定着具性能試験を行った。以下に、定着具ブロック性能試験・定着効率試験・疲労試験について試験概要および試験結果について報告する。

(1) PC 鋼材配置

当橋梁の断面図を図3に示す。当橋梁はP2-P3径間の閉合部より起点側は波形鋼板ウェブ、終点側はコンクリートウェブとなっており、張出し架設工法により施工している。高強度PC鋼材の採用は内ケーブル（架設ケーブルおよび下床版ケーブル）のみとした。内ケーブルは配置本数が多いため、高強度PC鋼材とした場合に経済的となるが、外ケーブルは本数が少ないことから経済的な優位性が見られなかった。よって、外ケーブルは通常のB種鋼材を用いた。PC鋼材配置山形図を図4に示す。高強度PC鋼材重量は101 526 kgであり定着箇所数は254箇所となる。またPC鋼材は裸線としグラウトを行うものとしている。

(2) 高強度 PC 鋼材定着具について

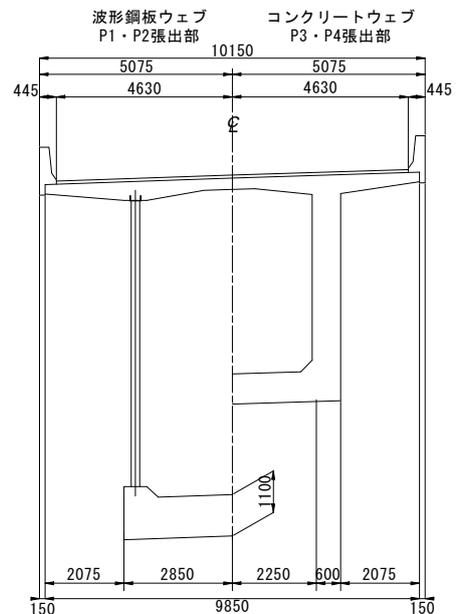


図3 断面図

VSL工法の定着具は高強度PC鋼材用のECHタイプを使用した。図5に定着具図を示す。被覆のない高強度PC鋼材15.2 mmを12本まで定着できるタイプである。

(3) 定着具ブロック性能試験

a) 試験概要

定着具ブロック性能試験は定着体がPC鋼材の規格引張荷重の100%以上に耐えられることを確認する。

図6に試験体の形状寸法および定着具・補強筋配置図を示す。

載荷試験は10 MN試験機を使用し、アンカーヘッドを介して定着具に直接圧縮力を加える方式で行った。試験結果の評価は、土木学会「コンクリート標準示方書・施工編（2007年制定）」⁴⁾の「12.7.1.2 定着具および接続具の受入検査」に準拠した。また、具体的な載荷荷重は（財）日本建築センター「プレストレストコンクリート造技術基準解説及び設計・計算例（2009年版）」⁵⁾に準拠した。表1に載荷試験の荷重段階と各荷重段階の適合条件を示す。

b) 試験結果

試験体のらせん鉄筋および用心帯鉄筋にはひずみゲージを設置している。図7および図8に、荷重-ひずみ関係グラフを示す。荷重段階a到達時におけるらせん鉄筋のひずみ値は 361μ であり、鉄筋応力に換算すると 72 N/mm^2 程度の応力状態となる。荷重段階cにおけるひずみ値は 593μ であり、鉄筋応力としては 119 N/mm^2 となる。用心帯鉄筋については荷重段階aにおいてひずみ値は 455μ となり鉄筋応力度で 91 N/mm^2 となる。荷重段階cにおけるひずみ値は 671μ であり鉄筋応力としては 134 N/mm^2 となり降伏強度 345 N/mm^2 以下となる結果が得られた。

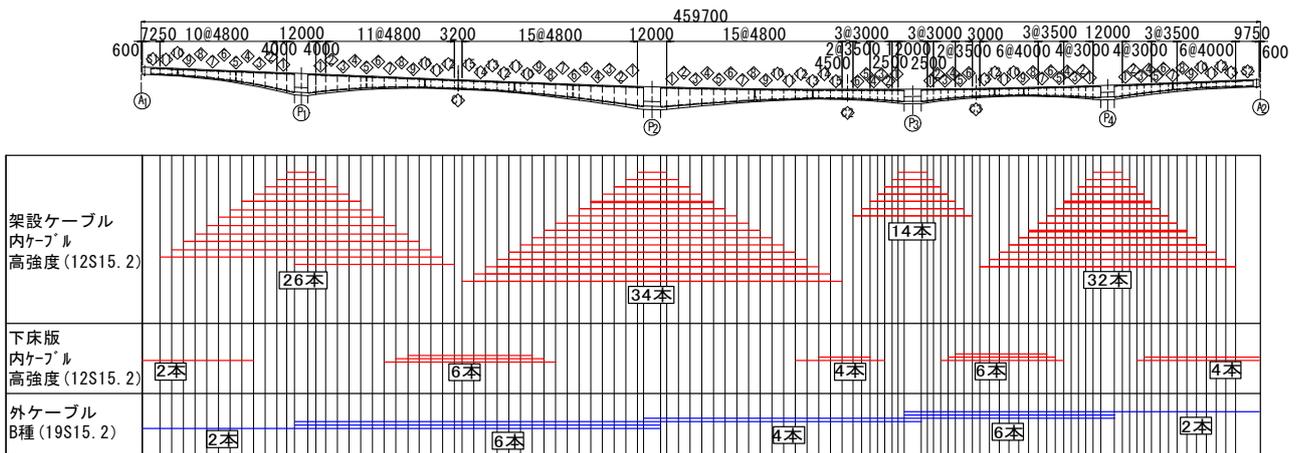


図4 PC鋼材配置山形図

表2に各荷重段階におけるひび割れ幅の測定結果を示す。荷重段階aの到達時および5分間の持続荷重後、荷重段階bでは試験体にひび割れの発生は見られなかった。荷重段階bから荷重段階cへ荷重を進めると、定着部近傍の側面に縦方向のひび割れが発生したが、ひび割れ幅は0.04 mm以下であった。荷重段階cにおける試験体のひび割れ発生状況を写真1に示す。

荷重段階cにおいて有害な変形・損傷・めり込みなどは見られず、全ての荷重段階において、評価基準を満足する結果となった。

(4) 定着効率試験

a) 試験概要

定着効率試験は、高強度PC鋼材15.2 mmとVSL定着具を組み合わせた状態で引張強度の確認を行う。試験は3 000 kN横型引張試験機によりPC鋼材が破断するまで引張荷重を与えるものとした。試験の判定基準としては土木学会「コンクリート標準示方書・施工編（2007年制定）」の「12.7.1.2 定着具および接続具の受入検査」に準拠し、定着効率（破断荷重／規格最大試験力）が95 %以上であれば合格と判断した。試験体は製作工場の異なるAタイプくさび3体とBタイプくさび3体の計6体について試験を行った。

また当試験では、くさびに段差が生じた場合の定着効率試験も行い、くさび間にあらかじめ3.5 mmから4.0 mmの段差を設けた状態で定着効率試験を行った（写真2）。試験体数および判定基準は段差がないものと同様とした。

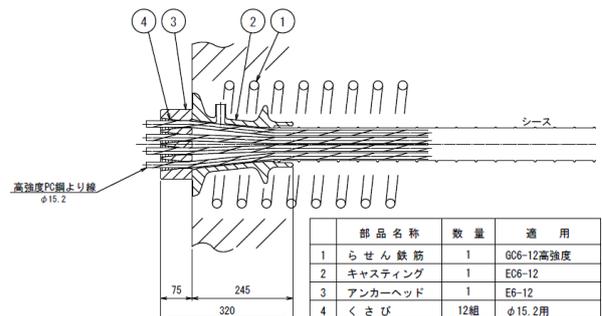


図5 VSL定着具

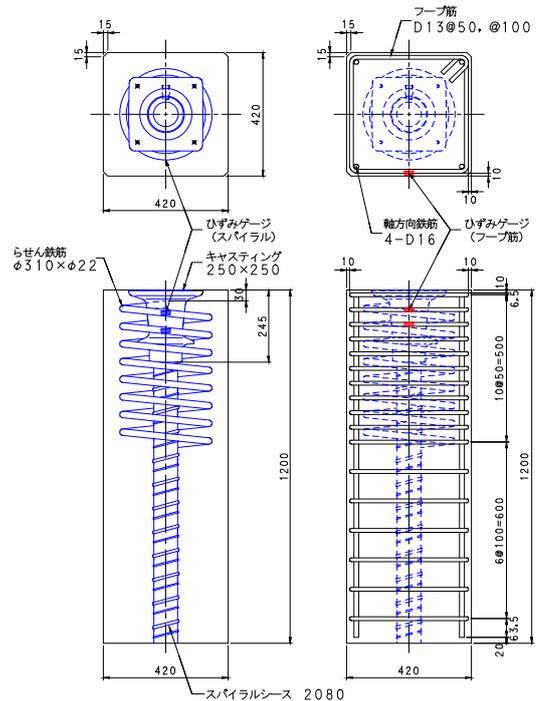


図6 定着ブロック試験体

表1 荷重段階および適合条件

荷重段階		載荷荷重	適合すべき条件
a	当該定着装置とともに用いる PC 鋼材の許容引張荷重(0.85Py)の 110%	2 996kN	コンクリート表面に 0.1mm を超えるひび割れが生じないこと。ひび割れが生じた場合は、当該荷重により 5 分間以上の持続載荷を行い、ひび割れが著しく進展しないことを確認する。
b	当該定着装置とともに用いる PC 鋼材の規格降伏荷重(Py)	3 204kN	コンクリート表面に 0.2mm を超えるひび割れが生じないこと。
c	当該定着装置とともに用いる PC 鋼材の規格引張荷重(Pu)	3 768kN	定着具の最大耐力に達していないこと。定着部が破壊しないこと。

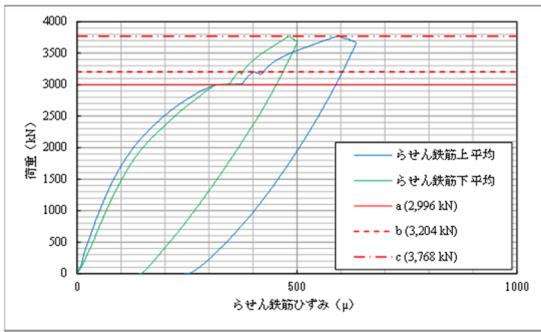


図7 らせん鉄筋ひずみ－荷重関係グラフ

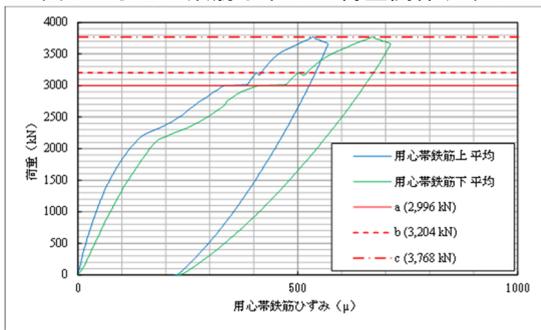


図8 用心帯鉄筋ひずみ－荷重関係グラフ

b) 試験結果

くさび段差無しおよびくさび段差有りの定着効率試験の結果を表3に示す。いずれの試験体の定着効率も規格値である95%以上を満足する結果となった。VSL設計施工基準における許容くさび段差としてはくさび長さの10%となる4 mm以下であれば規格値を満足しているが、実施工における許容段差としてはくさび長さの5%となる2 mm以下とした。

(5) 定着部疲労試験

a) 試験概要

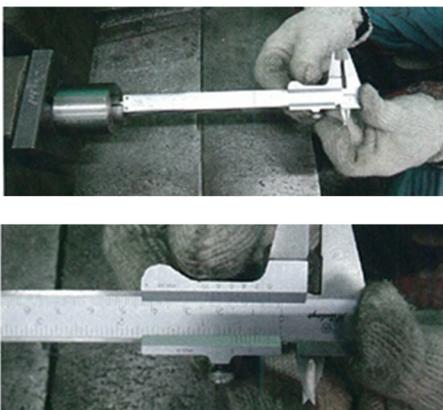


写真2 くさび段差の測定



写真3 疲労試験後の試験体状況

表3 定着効率試験結果

試験体	くさび段差	規格 破断荷重	破断状況		定着効率	規格値 (以上)
			破断荷重	破断状況		
くさび 無し	A	314 kN	312 kN	1本せん断切れ	99.4%	95%
			312 kN	3本せん断切れ	99.4%	
			318 kN	3本せん断切れ	101.3%	
	B		314 kN	1本せん断切れ	100.0%	
			312 kN	1本せん断切れ	99.4%	
			315 kN	3本せん断切れ	100.3%	
くさび 有し	A	4.0 mm	316 kN	1本せん断切れ・2本絞り切れ	100.6%	
		3.9 mm	312 kN	1本せん断切れ	99.4%	
		3.8 mm	308 kN	1本せん断切れ	98.1%	
		3.8 mm	308 kN	1本せん断切れ	98.1%	
	B	4.0 mm	312 kN	1本せん断切れ	99.4%	
		3.8 mm	312 kN	1本せん断切れ	99.4%	
		3.8 mm	314 kN	1本せん断切れ	100.0%	
		4.0 mm	314 kN	1本せん断切れ	100.0%	

表2 ブロック試験結果

荷重段階	荷重値 (kN)	ひび割れ幅 (mm)				有害 変形 損傷	判定	
		東	西	南	北			
a	2,996	緊張材の許容引張荷重 (0.85F _y) × 1.1	0.00	0.00	0.00	0.00	無	合
		5分経過後	0.00	0.00	0.00	0.00	無	合
b	3,204	緊張材の規格臨伏荷重 (F _y)	0.00	0.00	0.00	0.00	無	合
c	3,768	緊張材の規格引張荷重 (P _u)	<0.04	<0.04	<0.04	0.00	無	合
		有害な変形・損傷・めり込み等	有	無	有	無	無	



写真1 荷重段階cにおける試験体のひび割れ発生状況

疲労試験は「FIP : Recommendations for the acceptance of post-tensioning systems, 1993」⁶⁾に従い、上限0.65 P_uに対し変動荷重80 N/mm²を与え、繰り返し回数200万回を超えてもPC鋼材および定着体に破断・破損がなければ合格とした。本試験も製作工場の異なるくさびについて、それぞれ1体ずつ計2体の試験をおこなった。図9に試験機の概要および試験条件を示す。

b) 試験結果

疲労試験の結果、各試験体とも規格値となる200万回以上の繰り返し回数の載荷後もPC鋼材および定着具に破断

上限荷重	0.65P _u (204.1kN)
下限荷重	0.65P _u - 80N/mm ² (193kN)
変動荷重	80N/mm ² (11.1kN)
試験速度	250回/min

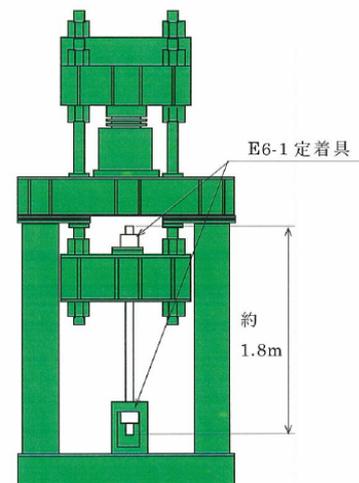


図9 疲労試験機および試験条件

や損傷は見られなかった（写真3）。

(6) まとめ

高強度PC鋼材の使用にあたりVSL定着具の性能確認試験を行い、以下の結果を得た。

①定着具ブロック性能試験：判定基準を満足する結果を得た。また、緊張材の規格引張荷重（Pu）時においてもらせん鉄筋の応力は119 N/mm²と降伏強度345 N/mm²以下であることが確認できた。しかし、形状鉄筋として配置している用心帯鉄筋にも134 N/mm²と降伏強度345 N/mm²以下ではあるが応力が発生しており、らせん鉄筋だけではなく用心帯鉄筋も補強鉄筋としての役割を担っている。実施工においても、用心帯鉄筋を補強鉄筋として配置することとした。

②定着効率試験：規格値を満足する結果を得た。また、くさび段差が生じた場合でも十分な定着効率を得られることを確認できた。

③定着部疲労試験：200万回を超える繰り返し载荷に対してもPC鋼材および定着具に異常は見られなかった。

以上の結果から、当試験によりVSL工法の定着具を用いて高強度PC鋼材を使用することに対する十分な定着性能および安全性が確認できたが、従来のB種鋼材と違い定着具補強鉄筋など個別の検討を行った上での採用を行う必要があることがわかった。実施工においては、補強筋の検討により確実な施工を実施することができた。

4. 外ケーブルの張力測定

従来、PC外ケーブルの張力測定は1次振動法により行われていた。しかし、従来の振動法は、曲げ剛性値が既知であることが前提であるため事前に実物大試験などにより曲げ剛性値を計測する必要があった。それに対し、高次にわたる複数の固有振動数を測定することで、PC外ケーブルの曲げ剛性値と張力を同時に算定できる「高次振動法」⁷⁾が開発された。高次振動法の実橋に対しての適用実績は、緊張定着後のセミプレファブ外ケーブルの張力測定についてあるが、当橋梁では、現場組立型ケーブルを外ケーブルとして採用しており、高次振動法により測定された結果を設計値と比較して、その適用性について検討した。

(1) 高次振動法を用いた張力測定システム

a) 概要

高次振動法を用いた張力測定システムは、PC橋の外ケーブルやエクストラード橋の斜材において、施工時もしくは供用後のケーブル緊張力が確認できる手法である。複数の高次振動数とモード次数の関係（図12）より、ケーブル長とケーブル単位重量がわかれば、式-1より曲げ剛性値とケーブルの張力を同時に求めることができる。

$$f_i = \frac{\pi^2 EI}{4\rho AL^4} i^4 + \frac{T}{4\rho AL^2} i^2 \quad \text{(式-1)}$$

T：張力，EI：曲げ剛性，ρA：単位重量，L：ケーブル長

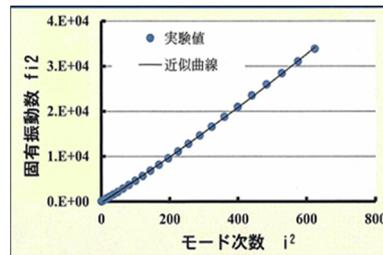


図12 振動数とモード次数の関係

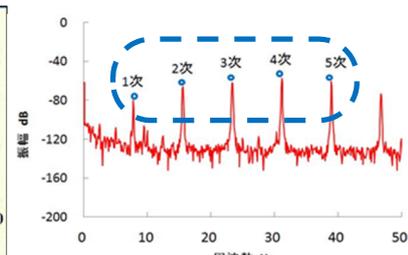


図14 固有振動数測定結果

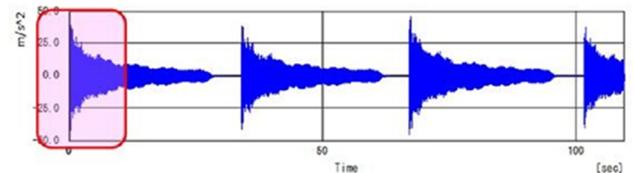


図13 ケーブルの振動波形

b) 測定方法

測定方法は、従来の振動法と同様、ケーブルに加速度計を取り付けハンマーで打撃により加振する。加振により波形データ（図13）を測定し、固有振動数（図14）を検出し、解析ソフトを用いて張力および曲げ剛性を算定する。

c) 特徴

高次振動法は、従来の振動法と違い、広範囲の複数の振動数を使用するため、読取誤差が少ない（図14）。また、張力と曲げ剛性値が同時に算定できるため、テストピースでの事前実験や実橋でのキャリブレーションなどによる曲げ剛性値の把握は不要となる。さらには、加速度計を取り付けてハンマーなどでケーブルを加振することでケーブルの固有振動数を測定するため、任意な箇所でも測

表4 ケーブルの仕様(19S15.2)

項目	値	断面図
ケーブル外径 (mm)	82	
規格破断荷重 (kN)	4,959	
規格降伏荷重 (kN)	4,218	
鋼材断面積 (mm ²)	2,635.30	
ケーブル単位重量 (kg/m)	21.945	

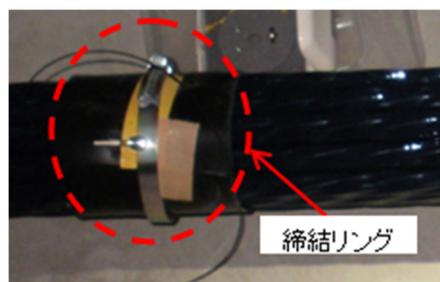


写真4 ケーブル結束状況

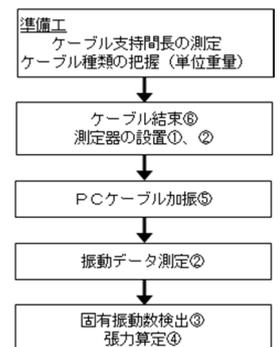


図15 測定フロー

定が可能であるとともに、ケーブル重量およびケーブル長が既知であれば測定可能であるため、データを比較活用することで既設橋の定期的な点検にも適用できる。

(2) 実橋確認試験

a) 測定ケーブル

測定ケーブルは、外ケーブル（エポキシ樹脂被覆PC鋼材）の19S15.2である（表4）。現場組立型ケーブルのため、測定の際は、締結リングで構成ストランドを結束し、ケーブルの一体化を図った（写真4）。締結リングは、ケーブルを打撃する箇所を左右で挟み込むように配置した。緊張力を測定したケーブルは、緊張が完了している14本とし、緊張からの経過日数は、緊張直後～10ヶ月のケーブルとした。測定箇所は、セット量の及ばない支間中央付近下側の偏向部間とした。

b) 測定機材

高次振動法による測定には表5に示す機材を使用した。測定状況を写真5に、測定フローを図15に示す。加速度計は、写真4の締結リングに取り付けた。

(3) 測定結果

表5 測定機材

機材名	用途	数量
① 加速度計	振動測定	2個
② データロガー	振動測定	1台
③ 周波数解析ソフト	固有振動数検出	1台
④ 張力解析用ソフト	張力算定	1台
⑤ プラスチックハンマー	ケーブル加振	1個
⑥ ホースバンド、保護ゴム	加速度計取付治具	適量

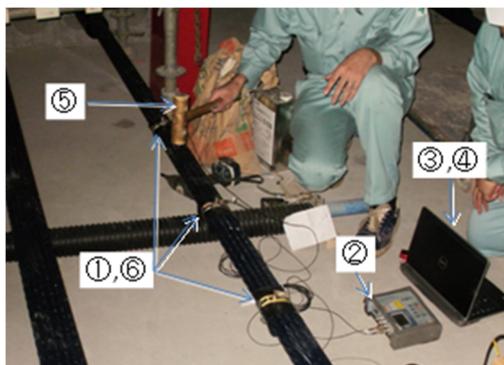


写真5 測定状況

表6 測定結果

径間	測定 No.	ケーブル No.	測定結果 (kN)	設計値 (kN)	設計値との差 (%)	定着部導入張力 (kN)	緊張日	
A1-P2	①	C01-2L	3.085	2.912	105.9	5.9	3,127,950	H27.6.22
	②	C01-2R	3.071	2.912	105.5	5.5	3,023,685	H27.6.22
P1-P2	③	C02-3L	2.949	2.904	101.6	1.6	3,127,950	H26. 8.28
	④	C021L	2.928	2.912	100.5	0.5	3,127,950	H26. 8.29
	⑤	C021R	3.008	2.912	103.3	3.3	3,127,950	H26. 8.29
	⑥	C02-3R	2.986	2.904	102.8	2.8	3,127,950	H26. 8.28
P2-P3	⑦	C02-3L	2.949	2.876	102.6	2.6	3,127,950	H26. 8.28
	⑧	C03-4L	2.928	2.879	101.7	1.7	3,093,195	H25.12.16
	⑨	C03-4R	2.811	2.879	97.6	-2.4	3,127,950	H25.12.16
	⑩	C02-3R	2.956	2.876	102.8	2.8	3,127,950	H26. 8.28
P3-P4	⑪	C03-4L	2.792	2.880	97.0	-3.0	3,093,195	H25.12.16
	⑫	C04-5L	2.873	2.873	100.0	+0.0	3,155,754	H25.10. 7
	⑬	C04L	2.774	2.881	96.3	-3.7	3,127,950	H25.10. 8
	⑭	C04R	2.753	2.881	95.5	-4.5	3,127,950	H25.10. 8
	⑮	C04-5R	2.786	2.873	97.0	-3.0	3,127,950	H25.10. 7
	⑯	C03-4R	2.821	2.880	98.0	-2.0	3,127,950	H25.12.16

測定結果を表6に示す。図14に示す1次～5次の固有振動数より張力を算出した。

(4) まとめ

高次振動法を用いた張力測定システムにより、緊張定

着後のPC外ケーブルを測定した結果、設計値との差が概ね5%以下となった。

緊張日からの経過時間で測定結果と設計値との差を見ると、緊張直後（H26. 8）の差の平均は+2.3%、緊張直後（H25. 12）から8ヶ月後の差の平均は-1.4%、緊張直後（H25. 10）から10ヶ月後の差の平均は-2.8%であり、設計値との差は時間が経過するとともに-（マイナス）の値が大きくなっている。これはコンクリートのクリープ乾燥収縮による変形の影響により、緊張力が減少したためと考えられる。

以上のことより、高次振動法を用いた張力測定システムは、ケーブルが一体化されていない現場組立型外ケーブルであるエポキシ被覆外ケーブルの張力測定においても有効である。また、既設橋の診断技術の一つとしての活用が期待できる。



写真6 完成写真（下流側より）

5. おわりに

当橋梁は、2016年1月に無事、無事故・無災害にて、竣工を迎えている。完成写真を写真6に示す。本稿が今後同様の橋梁の設計・施工に関する一助となれば幸いと考える。

最後に、当橋梁の設計・施工にあたり、貴重なご助言・ご協力を頂きました関係各位に対しまして、厚く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大植健, 今井平佳, 狩野兼義, 渡邊芳樹: 興津川橋における高強度PC鋼材の定着具性能試験結果報告, プレストレストコンクリート工学会 第21回シンポジウム論文集, PP. 315-318, 2012.
- 2) 石橋亜希子, 今井平佳, 金崎孝行, 小林大助: 高次振動法によるPC外ケーブルの張力測定, プレストレストコンクリート工学会 第24回シンポジウム論文集, PP. 437-440, 2015.
- 3) VSL 工法設計施工基準, VSL 協会, 2012.
- 4) コンクリート標準示方書・施工編, 土木学会, 2007.
- 5) プレストレストコンクリート造技術基準解説及び設計・計算例, 日本建築センター, 2009.
- 6) Recommendations for the acceptance of post-tensioning systems, FIP, 1993.
- 7) NETIS TH-140005-A「橋梁用ケーブルの張力測定・モニタリング技術(高次振動法)」