

論文・報告

複合トラス格点構造に関する実証実験

～ハッ場ダム湖面2号橋建設にあたっての技術検討～

Tests on Joint Structure in PC Hyblid Truss-Extradosed Bridge

北野 勇一 *1
Yuichi KITANO田中 太郎 *2
Taro TANAKA中谷 睦 *3
Makoto NAKATANI大久保 孝 *4
Takashi OKUBO石田 大 *5
Masaru ISHIDA山中 修一郎 *5
Shuichiro YAMANAKA

ハッ場ダム湖面2号橋は、ハッ場ダム事業に関連した付替道路の湖面橋として架橋されるPC5径間連続鋼・コンクリート複合トラスエクストラード橋である。本橋の建設にあたり複合トラス格点部の設計手法を検証するため、実橋格点部の1/2縮尺試験体を用いた3種類の実験を実施した。その結果、格点構造としては新たに考案した鋼製ボックス「変更案」とするのがよいこと、補強程度は格点構造を全体的に補強筋で覆う「補強2」とするのがよいことなどが確認された。

キーワード：複合トラス橋、格点構造、1/2縮尺実験

1. はじめに

ハッ場ダム湖面2号橋は、ハッ場ダム事業に関連した付替道路の湖面橋として架橋されるPC5径間連続鋼・コンクリート複合トラスエクストラード橋である（図1）。本橋は、複合トラス構造（コンクリート床版と鋼管トラスが格点部で結合された主桁構造）とエクストラード構造（主桁を主塔から吊った斜材により補剛した構造）を組み合わせた世界初の構造形式となっており、主桁の軽量化と耐震性の確保、景観との調和、コスト縮減および工期短縮などが図られている。

一方、新しい構造を採用するには解決すべき技術的課題もあり、とくに複合トラス格点部の設計手法は十分に構築されておらず、採用する格点構造に対し個別に確認

試験を行っている現状である^{1)～4)}。また、本橋は支間長が最大155mと長く、トラス材に作用する軸力も大きい（表1）。このように本橋の複合トラス格点部においては、供用中のひび割れ発生を防止するとともに、大規模地震に際しても他の部材に先行して破壊させないよう万全を期する必要がある。そこで、本橋における格点部設計手法を検証するため、実橋格点部の1/2縮尺試験体を用いた以下の実験を実施した。

【実験A】格点構造の静的載荷実験

【実験B】圧縮トラス材先端部の耐力確認実験

【実験C】圧縮トラス材の引抜き耐力確認実験

本稿では、これらの実験を実施した結果と、これを受け実橋設計に反映した事項について紹介する。

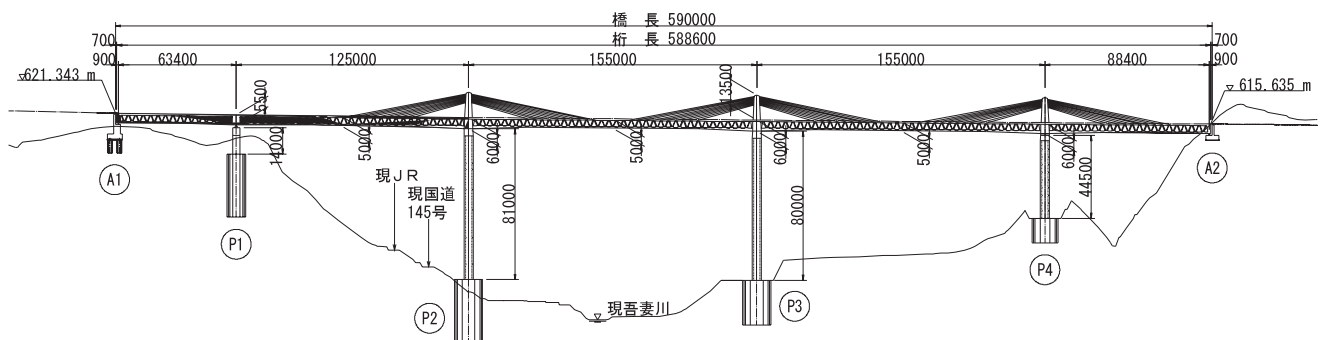


図1 橋梁一般図（ハッ場ダム湖面2号橋）

*1 川田建設(株) 技術部技術課 係長
*2 川田建設(株) 東日本統括支店事業企画部 課長
*3 川田建設(株) 東日本統括支店事業推進部 係長

*4 川田建設(株) 西日本統括支店事業推進部技術課 課長
*5 川田建設(株) 東日本統括支店事業推進部
*6 川田建設(株) 技術部技術開発課

2. 格点部の設計

(1) 格点構造の概要

本橋に用いる格点構造は、鋼製ボックス構造とした（図2参照）。この構造では、引張トラス材は引き抜けないように鋼製ボックスに溶接されており、圧縮トラス材は鋼製ボックス内のコンクリートに埋め込まれている。また鋼製ボックスには、圧縮・引張両トラス材の偶力による回転力に抵抗し、圧縮トラス材の軸力をその先端部コンクリートに伝達する機能が要求される。

(2) 鋼製ボックス構造の検討

格点部の設計に用いるトラス軸力は、本橋の場合、約6,000kNとこれまでの実績（表1中のNo. 1）の2倍に達する。このような高耐力が要求される鋼製ボックス構造を検討した結果を表2に示す。表中の「従来案」は、側板に設けたジベル孔がパーフォボンドリブ（以下、PBL）として回転力に抵抗する構造であり、文献5）に示される方法にて鋼製ボックスの形状寸法を決定した。一方、「変更案」は今回新たに考案した構造であり、鋼製ボックスの小口面にフランジ板とリブ板を取り付け、リブ板のジベル孔がPBLとして機能することを期待した構造で、側板の孔は耐力に寄与せず、コンクリートの充填性と一体性を図ることを目的とした。このほか「従来案」は、鋼

表1 複合トラス橋の施工実績（国内・PC箱桁橋）

No	橋梁名	支間長	格点構造	トラス軸力	竣工年
1	木ノ川高架橋	85.0m	鋼製ボックス	3,000kN	2003年
2	志津見大橋	75.0m	リング・キー	1,100kN	2005年
3	猿田川橋・巴川橋	119.0m	二面セット／二重管	4,800kN	2006年（下り線）
4	ハッ場ダム湖面2号橋	155.0m	鋼製ボックス（改良型）	6,000kN	2010年

注）表中の支間長は最大支間長を、トラス軸力は設計荷重時の最大値を示す。

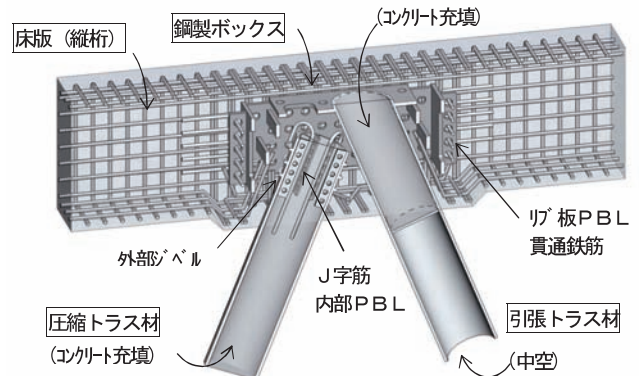


図2 格点部の構成（鋼製ボックス構造）

表2 鋼製ボックス構造の比較

項目	鋼製ボックス「従来案」	鋼製ボックス「変更案」
鋼製ボックス形状	外形寸法：長さ1566×高さ650×幅650mm	外形寸法：長さ1720×高さ570×幅650mm
荷重伝達概念図	ジベル：φ80mm 有効数：n=62ヶ、平均距離：y=0.35m	ジベル：φ60mm（貫通鉄筋：D25） 有効数：n=20ヶ、平均距離：y=0.80m
格点部回転曲げモーメントに対する照査方法	外力：$M = C \sin \theta \times L$ L：底板位置での斜材軸心距離 ジベルに作用するせん断力：$P = M / (y \times n) \leq V_{RL}$ ジベルせん断力の許容値（Leonhardt 式）： $V_{RL} = 2\pi \phi^2 / 4 \times 1.14 \sigma_{sk} / 3 \times \beta$ β：低減係数=0.7（貫通鉄筋なし）	外力：$M = T \times L$ L：圧縮トラス材基部中心と引張斜材軸心の距離 ジベルに作用するせん断力：$P = M / (y \times n) \leq V_{RL}$ ジベルせん断力の許容値（土木学会式）⁶⁾： $V_{RL} = [1.45 \times \{(\phi^2 - d^2) \sigma_{sk} + d^2 \sigma_{sl}\} - 106.1] / 3$ d：貫通鉄筋の直径、σ_{sl}：貫通鉄筋の引張強度

製ボックス内にトラス材が配置されるために側板ジベル孔に貫通鉄筋を配置できないが、「変更案」は鋼製ボックス外側のリブ板にジベル孔を設けており、貫通鉄筋を配置できる構造となっている。また「変更案」は、ジベル孔を一列配置としている。

3. 実証実験の実施

3.1 実験方法

2章に示した格点部の設計手法を検証するため、実橋の1/2縮尺の試験体を用いた3種類の実験を実施した。各実験の概要は表3の通りである。

実験Aは、トラス軸力が最大となるP3柱頭部に近接する格点のうち、形状寸法が小さく設計余耐力の少ない上床版側の格点を対象とし、格点構造全般に着目した実験を行うものとした。試験体は、床版（縦桁部）と桁高の半分のトラス材を切り出した1格点をモデル化した。この試験体のトラス材下端をピンで支持し、試験体を軸方向に載荷する水平加力試験を実施した。載荷荷重は、対象格点の設計荷重時（6,000kN）と終局荷重時（9,000kN > L2地震時8,700kN）のそれぞれ1/4の荷重に相当するトラス軸力よりトラス角度の換算を行って決定した。最大荷重は、トラス材の設計降伏耐力の1.3倍を目標とした。

実験Bは、圧縮トラス材先端部の支圧挙動を詳細に調査するため、実験Aの試験体を転回させて圧縮トラス材を直接載荷する鉛直加力試験を実施した。この試験では、設計荷重の3倍までの荷重を載荷させるものとした。

実験Cは、圧縮トラス材に正負交番載荷が作用する格点のうち、最大引張力が生じるP2-P3間支間中央付近の上床版側の格点を対象に鉛直引抜き試験を実施した。最大荷重は、終局荷重の1.3倍を目標とした。

各実験とも設計荷重と終局荷重を3回ずつ繰り返し、その後最大荷重を目標に載荷した。載荷ステップの一例を図3に示す。また、実験中には、荷重を100kN（実験Cのみ50kN）増す毎に試験体の状況を目視確認するとともに、試験体に予め設置した各種計器の測定を行った。

3.2 試験体

試験体は、表4に示すように鋼製ボックス形状（前出の表2参照）や補強程度（図4参照）の組み合わせを考慮して決定した。補強程度は、床版（縦桁部）に配置するスターラップをトラス材間（＝大きなせん断力が作用する領域）で増加させる「補強1」と、鋼製ボックス全体（＝

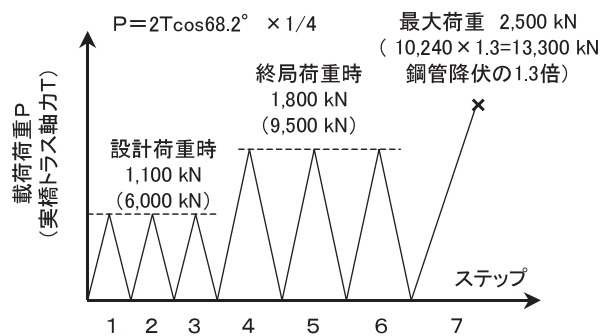
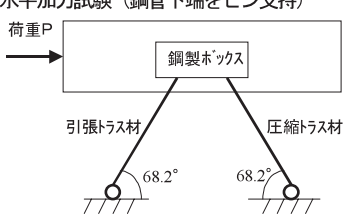
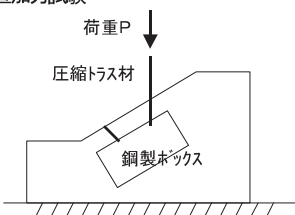
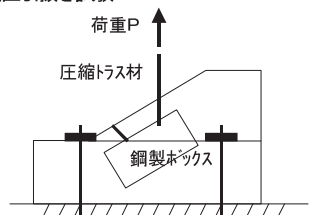
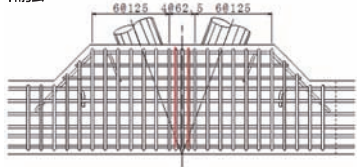


図3 載荷ステップ（実験A）

表3 実証実験の実施概要

	実験A：格点構造の静的載荷実験	実験B：圧縮鋼管先端部の耐力確認実験	実験C：圧縮鋼管の引抜き耐力確認実験
実験目的	格点構造の基本性能（主要な荷重伝達機構や終局耐力）の確認	圧縮トラス材先端部の支圧耐力および荷重伝達機構の確認	L2地震時正負交番載荷に対する圧縮トラス材引抜き耐力の確認
実験方法	水平加力試験（鋼管下端をピン支持） 	鉛直加力試験 	鉛直引抜き試験 
載荷荷重P（実橋トラス軸力T）	$P = 2T \cos 68.2^\circ \times 1/4$ 設計時 $P = 1,100 \text{ kN}$ ($T = 6,000 \text{ kN}$) 終局時 $P = 1,800 \text{ kN}$ ($T = 9,500 \text{ kN}$) 最大荷重 $P = 2,500 \text{ kN}$ ($T = 13,300 \text{ kN}$ ・・・鋼管降伏の1.3倍)	$P = T \times 1/4$ 設計時 $P = 1,500 \text{ kN}$ ($T = 6,000 \text{ kN}$) 終局時 $P = 2,400 \text{ kN}$ ($T = 9,500 \text{ kN}$) 最大荷重 $P = 4,500 \text{ kN}$ ($T = 18,000 \text{ kN}$ ・・・設計時の3倍)	$2P = T \times 1/4$ 設計時 $2P = 250 \text{ kN}$ ($T = 1,000 \text{ kN}$) 終局時 $2P = 1,100 \text{ kN}$ ($T = 4,400 \text{ kN}$) 最大荷重 $2P = 1,500 \text{ kN}$ ($T = 6,000 \text{ kN}$ ・・・終局時の1.3倍)
実験状況			

補強1



補強2

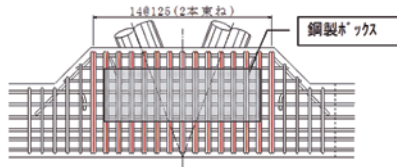


図4 補強程度のパターン

表4 試験体一覧

	試験体	鋼製 ボックス	補強 程度	圧縮トラス材先端ジベル		圧縮トラス材引抜き補強	
				外部ジベル	内部ジベル	J字筋	PC鋼棒
実験A	A1	変更案	補強1	φ9×3巻	PBL8枚		
	A2		補強2	φ13×3巻			
	A3	従来案					
実験B	B1	変更案	補強1	φ9×3巻	PBL8枚		
	B2		補強2	φ13×3巻			
実験C	C1	従来案	補強1	φ9×3巻	PBL4枚	D10×4本	φ15×4本
	C2		補強2				
	C3	変更案	補強1	φ13×3巻		D13×4本	φ17×4本
	C4		補強2				

注) 外部ジベルはSR235, 内部PBLはSM490, J字筋はSD345, PC鋼棒はC種1号とした。

回転挙動でコンクリートにひび割れ発生が懸念される領域)を覆う「補強2」の2パターンとした。また、圧縮鋼管先端の外部ジベルと引張補強のJ字筋・PC鋼棒は、径を変えて効果の差異を確認するものとした。

使用材料は、コンクリートの設計基準強度は40N/mm²、最大粗骨材寸法は13mmで、鉄筋、鋼管、鋼製ボックス材は、実橋相当の材質で形状寸法がほぼ1/2縮尺となるように選定した。

4. 実験結果・考察と設計へのフィードバック

4.1 格点構造と補強程度（実験A）

図5に試験体の水平変位を測定した結果を示す。各試験体とも、支持ピンの余裕で荷重初期に変位が4～6mm増加したが、その後は直線的な変形挙動を示し、終局荷重を超える辺りから非線形性が現れた。その後目標(2,500kN)を超える3,000kN前後まで荷重したが、ひび割れ幅は最大でも0.1mm以下でコンクリートの剥落等もなく、格点部に大きな損傷は生じなかった。なお、図中の“既往”は、設計軸力が3,000kNの場合の鋼製ボックス「従来案」の1/2縮尺試験体と実物大試験体の実験結果⁵⁾である。

表5はひび割れ発生荷重、図6は格点部周辺のひび割れ性状である。格点部周辺には、各試験体ともP=1,500～2,000kNで縦桁側面に0.05mm以下の微細なひび割れが発生し、これが進展した形で鋼製ボックス側板の対角方向に走る斜めひび割れ、さらに縦桁下面のトラス材からの放射状ひび割れと圧縮トラス材による押抜きと考えられる縦桁上面のひび割れが確認された。また鋼製ボックス「従来案」は、ひび割れの発生と進展が早く、ひび割れ発生箇所にジベルを配置している。したがって、実橋に採用する格点構造はより安全であると考えられる鋼製ボックス「変更案」とし、貫通鉄筋の折り曲げ方向はひび割れが生じにくい格点部の外側に向けた。

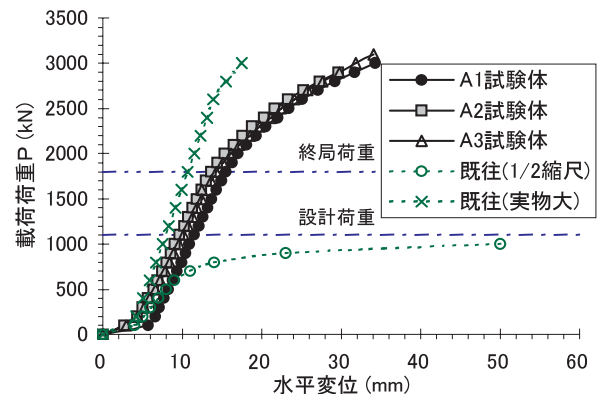


図5 試験体の変形挙動（実験A）

表5 ひび割れ発生荷重（実験A）

試験体	ひび割れ発生荷重			最大荷重*
	1) 側面ひび割れ	2) 斜めひび割れ	3) 放射状ひび割れ	
A1	1,800kN	2,300kN	2,100kN	3,000kN
A2	2,000kN	2,300kN	2,100kN	2,900kN
A3	1,500kN	2,100kN	1,900kN	3,100kN

*最大荷重は、試験機の容量より。

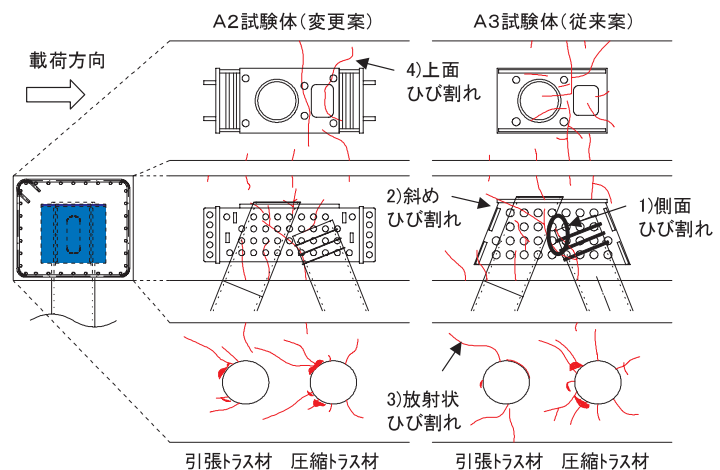


図6 格点部周辺のひび割れ性状（実験A、最大荷重時）

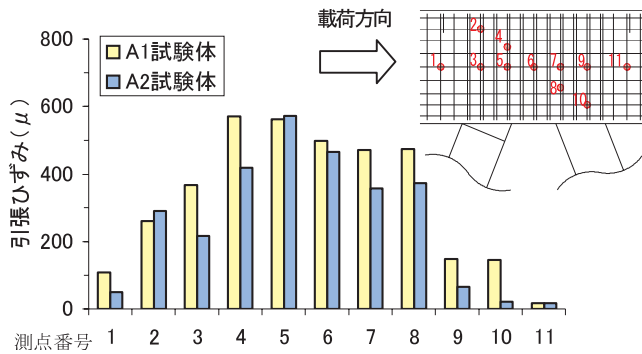


図7 格点周辺のスターラップひずみ (実験A, 最大荷重時)

図7に格点部周辺のスターラップひずみを示す。図には示していないが、スターラップひずみは終局荷重まで微小であり、斜めひび割れ発生以降に増大した。図示した最大荷重時の発生ひずみは、トラス材間で最大となり、A1試験体(補強1)では広範囲で発生ひずみが増大するのに対し、A2試験体(補強2)では発生ひずみが緩和する傾向であった。したがって、補強の程度は、鋼製ボックスを全体的に覆う方法(=補強2)とするのがより良いと判断し、実橋の配筋に反映した。

4.2 圧縮トラス材先端部の支圧挙動 (実験B)

圧縮トラス材の軸圧縮力は、外部ジベルと内部ジベルを介して鋼製ボックス内コンクリートに伝達される。外部ジベルの荷重分担率を図8に示す鋼管内部コンクリートと鋼管外表面ひずみを用いて算出した結果、設計荷重時と終局荷重時ともほぼ同程度で、外部ジベル全体で約60%であった(図9)。また、残り約40%の軸圧縮力は内部ジベルが分担し、鋼管先端部でコンクリートが支圧抵抗する必要がある。これについては、終局荷重までは鋼管先端部で概ね様なひずみ分布となっていることが確認されている(図10)。これらの結果は、B2試験体(補強2)に加え、B1試験体(補強1)でも同じ傾向を示しており、圧縮トラス材先端支圧の分担率は補強程度の違いによる差異がほとんどないものと考えられる。

なお、B1・B2試験体とも、最大荷重4,800kN(試験機の容量より)まで大きな損傷が生じなかったことから、圧縮トラス材先端部は設計荷重の3倍(終局荷重の1.7倍)以上の支圧耐力を有することが確認された。

4.3 圧縮トラス材引抜き耐力 (実験C)

圧縮トラス材では地震時において引張力が作用する。この場合の設計手法は、設計荷重時に鋼管の抜け出しを許容しないよう外部ジベルで端部定着されたコンクリートの押抜きせん断で抵抗し、終局荷重時にはこれとJ字筋・PC鋼棒とが協同して耐力を確保することを前提とした(図11)。

図12に圧縮トラス材の引抜き変位を測定した結果を示す。鋼製ボックス「従来案」を用いたC1試験体は、終

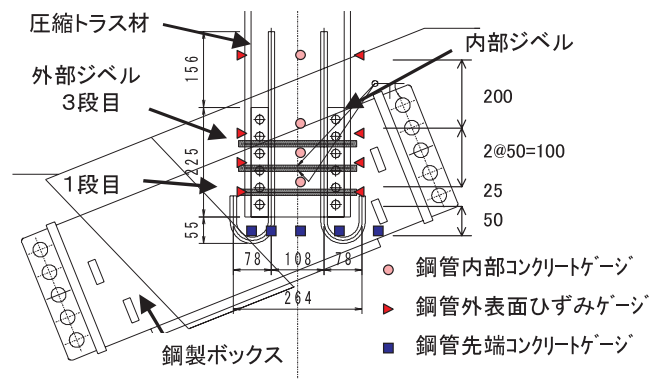


図8 ひずみ計設置位置 (実験B)

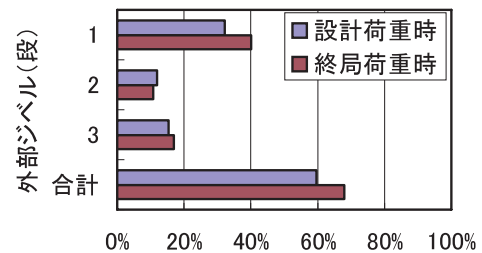


図9 外部ジベルの分担率 (B2試験体)

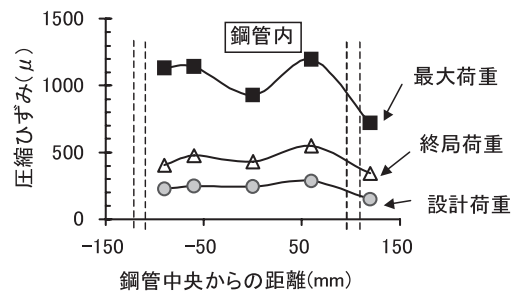


図10 圧縮鋼管先端部コンクリートひずみ (B2試験体)

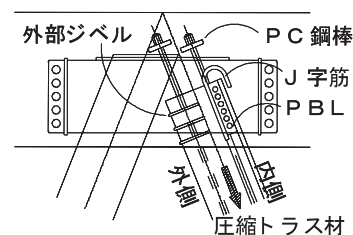


図11 圧縮トラス材の引張補強

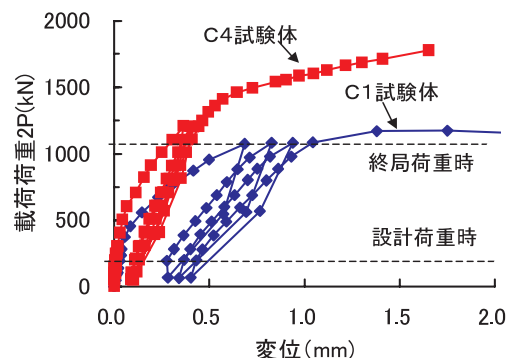


図12 圧縮トラス材の引抜き変位 (実験C)

局荷重を超えた時点で、荷重が増加せずに変位のみが増大した。この傾向はC 2試験体も同様であった。

一方、鋼製ボックス「変更案」を用いたC 4試験体は、終局荷重を超えた後も荷重が増大し、最終的に最大荷重1779kN（終局荷重の1.7倍程度、試験機の容量より）まで載荷することができた。これについては、圧縮トラス材の埋込み深さ、すなわち、外部ジベルのかぶりを長くしたことが耐力向上の主要因と考えられる（図13参照）。

図14に各部位のひずみ測定結果より圧縮トラス材（＝外部ジベルとJ字筋の引張抵抗力が伝達すると想定される）とP C鋼棒が分担した引張力を示す。C 1試験体において最大荷重以降に荷重が増加しなくなったのは、格点部の破壊が進行して鋼管が抜け始め、P C鋼棒のみで引張力に抵抗するようになったためと考えられる。

以上より、実橋に採用する格点構造はより安全であると考えられる鋼製ボックス「変更案」とし、P C鋼棒による引張補強については降伏耐力まで許容すると鋼管が抜け出すほど格点部が損傷を受けるおそれがあるため、P C鋼棒の応力度を鉄筋降伏応力に制限するとともに、圧縮トラス材が抜け出す際のひずみを小さくする観点から異形P C鋼材を採用した。

5. おわりに

八ッ場ダム湖面2号橋の建設にあたり、複合トラス格点部の設計手法を検証するため、実橋格点部の1/2縮尺試験体を用いた3種類の実験を実施した。その結果、鋼製ボックス「変更案」と補強程度「補強2」を組み合わせたケースについては、実験A、B、Cとも終局荷重の1.7倍以上の耐力を有することが確認された。また、この格点構造の採用にあたっては、補強筋の加工形状や配置方法などディテール決定に実験結果を反映させた。

謝辞：今回報告した実験を含め、本橋の設計・施工にあたっては、「八ッ場ダム湖面2号橋技術検討会」を通じて、座長の加島聡氏を始めとする委員の方々並びに関係各位のご指導を頂きました。紙面を借り、ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 古田健太郎, 古市耕輔, 日紫喜剛啓, 山村正人: 鋼トラスウェブPC橋の格点構造に関する実験的研究, 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, pp. 29-34, 2000. 9
- 2) 野呂直以, 室井進次, 二井谷教治, 江口信三: 複合トラス橋梁の格点部の実験的研究, 構造工学論文集Vol. 47A, pp. 1485-1490, 2001. 3
- 3) 青木圭一, 能登谷英樹, 加藤敏明, 高德祐平, 上平康裕, 山口貴志: 第二東名高速道路猿田川橋・巴川橋の設計・施工—世界初の

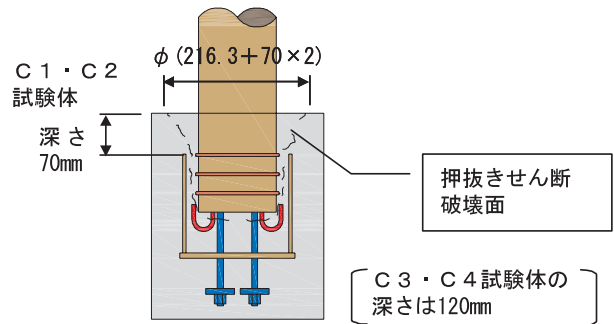


図13 圧縮トラス材の埋込深さ

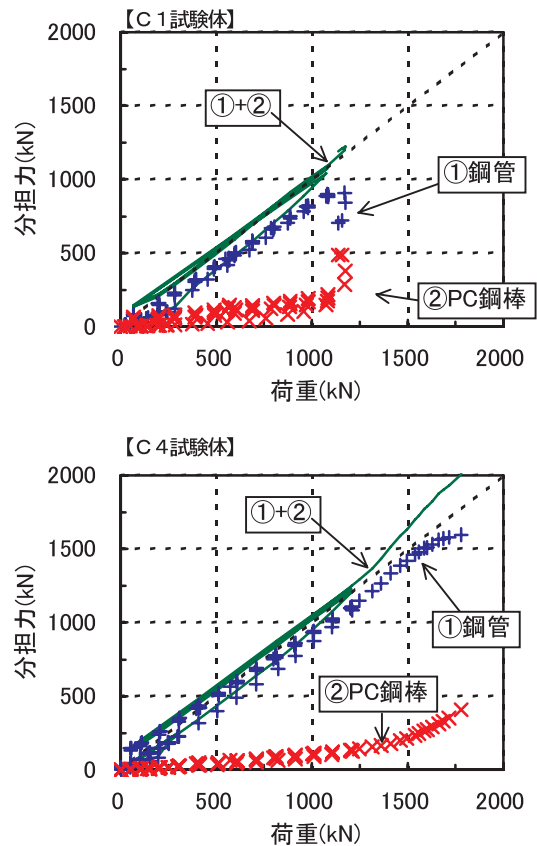


図14 圧縮トラス材引抜き力の分担率（実験C）

- PC複合トラスラーメン橋一, 橋梁と基礎Vol. 39-05, pp. 5-11, 2005. 5
- 4) プレストレストコンクリート技術協会: PC技術規準シリーズ「複合橋設計施工規準」, 2005. 11
 - 5) 古市耕輔, 日紫喜剛啓, 古田健太郎, 本田智昭, 山村正人, 南浩郎: 鋼・コンクリート複合トラス橋の新しい格点構造の開発と設計法の提案, 土木学会論文集F, Vol. 62, No. 2, pp. 349-366, 2006. 6
 - 6) 土木学会: 構造工学シリーズ11「複合構造物の性能照査指針(案)」, pp. 204-205, 2002. 10