

複合トラス橋の鋼上弦材とP C床版の接合部の構造特性に関する実験的研究

Experimental study on structural characteristic of connection between an upper chord and PC slab of hybrid truss bridge

池田博之*, 能登宥愿**, 梅津健司***, 太田貞次****

Hiroyuki IKEDA, Hiroyoshi NOTO, Kenji UMEZU, Teiji OTA

- * 日本道路公団中部支社 東名古屋工事事務所 (〒465-0025 名古屋市名東区上社一丁目901番地)
 ** (株)宮地鐵工所 技術開発部 (〒290-8580 千葉県市原市八幡海岸通り3番地)
 *** 住友建設(株) 技術研究所 (〒329-0432 栃木県河内郡南河内町仁良川1726番地)
 **** 工博 高松工業高等専門学校 建設環境工学科 (〒761-8058 香川県高松市勅使町355番地)

Tsubakihara Bridge is the three span-continuous hybrid truss bridge that has the deck slab prestressed longitudinally and also transversely to obtain its higher stiffness by connecting the upper chord with PC slab. This deck slab is expected to function as the substitute of floor system and to contribute to cost reduction. The main technical difficulty of the hybrid structure is the rigid connection between upper chord and PC slab. The new type of the connection is proposed as follows and tested by the loading test.

- 1) The connected part of the stud is concrete-casting in order not to decrease longitudinally effective prestress due to the resistance by the steel member.
- 2) Rubber pad is installed along the upper chord except the connected part with stud.

With the static loading test and fatigue test focusing on the durability of new type connection, it is certified that the proposed connection can be functionally applied to the actual Tsubakihara Bridge.

Key Words : hybrid truss bridge, static loading test, fatigue test, prestressed concrete slab

キーワード：複合トラス橋、静的載荷試験、疲労試験、プレストレストコンクリート床版

1. まえがき

複合橋梁「椿原橋」は東海北陸自動車道の富山県との県境に近い岐阜県白川村に建設された3径間連続複合トラス橋(支間割: 82.3 m+155.0 m+82.3 m)である。

設計段階で経済性を目指した合理的な構造として、プレストレストコンクリート(以下、P C)床版を有効に活用することを検討した。そこでは新しい試みとして、トラス上弦材とP C床版を合成し床版に主構上弦材としての機能を持たせる。そして、床版の2方向をプレストレッシングすることによりその剛性・耐力を高め、上横構や床組構造を省略した合理化トラス橋としている。橋梁一般図を図-1に示す。

本橋は中間橋脚に斜ベントを設置してこの部分のトラスを先行架設した後、トラス上弦材とP C床版を合成し、床版にも張り出し時の引っ張り応力を負担させながら施工する方法を採用している。そこで、橋軸方向の所要プレストレス量が大きくなるため、橋軸方向プレストレッシングによって床版に導入されるプレストレス量が鋼部材の抵抗により減少しない構造上の工夫が要求された。なお、本橋の現場施工は平成13年5月に開始され、平成14年7月(但し、13年12月~14年4月は冬季休止期間)に無事完了した。

2. 上弦材とP C床版接合部の構造の提案

床版に導入されるプレストレス量が鋼部材の抵抗により減少しないようにするためには、プレストレッシング時にスタッドとコンクリートを一体化させないことと、上弦材上フランジとコンクリート床版間の付着を切ることが必要である。白鳥橋の施工では、遅延硬化ジベルを使用するとともに接合部に樹脂を塗布することにより有効プレストレスの減少を防いでいる^[1]。

本橋では応力伝達機構を明確にするために、3次元FEM解析を行った。その結果、トラス上弦材格点部に大きな力が作用することが明確になり、格点部にまとめてスタッドを配置することにした。そのため遅延硬化ジベルを使用することが出来ず、また箱抜き施工の面から考え、一様にスタッドを配置することは難しいので、格点部、格間部にグループにまとめて配置することにした。そこでスタッド部を箱抜きし、それ以外の上弦材上にゴムパッドを敷いて上弦材とコンクリート床版を縁切りした状態でプレストレッシングする施工方法を採用した。図-2に示す構造・施工方法を採用することにより、プレストレス量が容易に導入されると同時に、鋼部材の抵抗による床版に導入されるプレストレス量の減少を防ぐことが可能となる。また箱抜き部のコンクリート施工時期を調整することにより、鋼

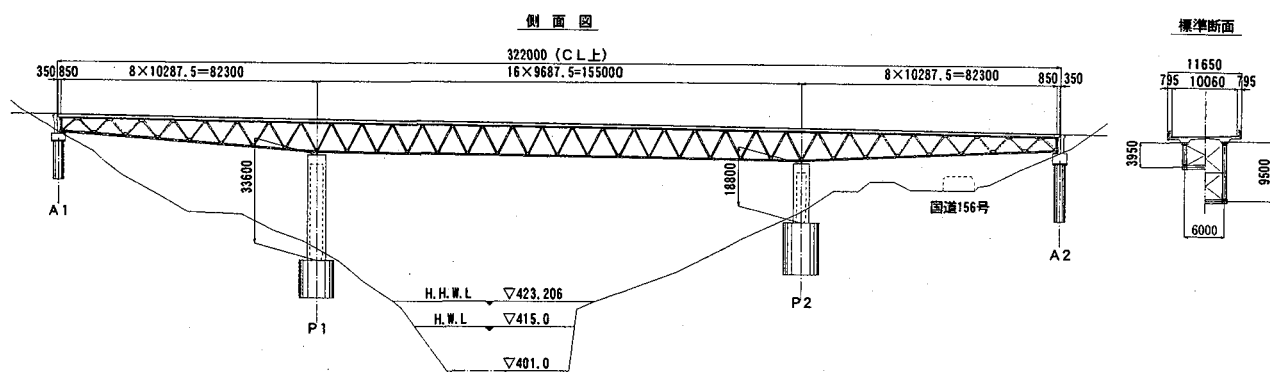


図-1 橋梁一般図

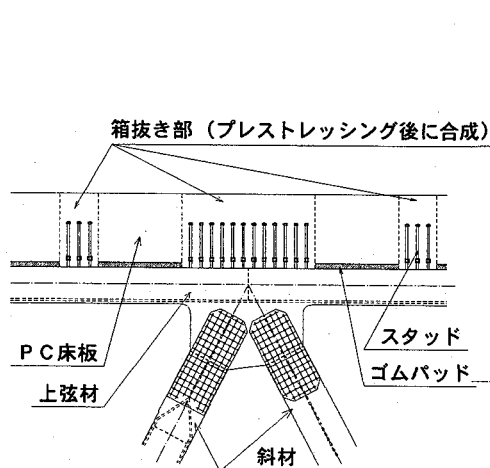


図-2 鋼上弦材とP C床版接合部の構造

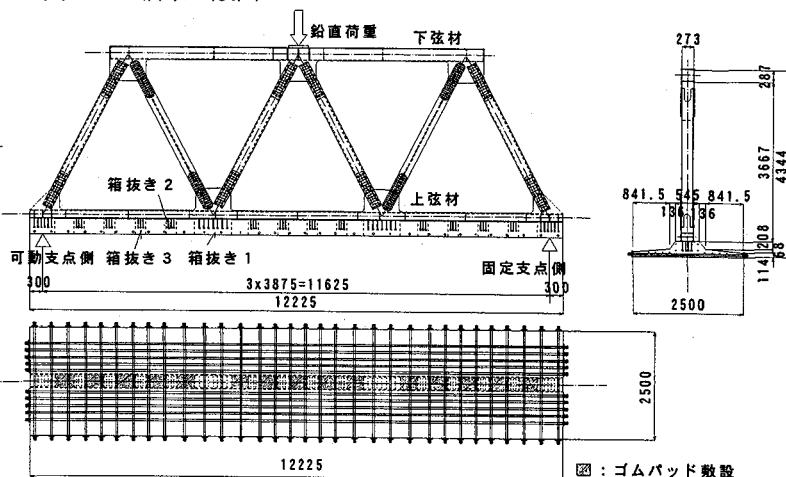


図-3 試験体諸元 (試験体A, B)

部材の拘束に起因する乾燥収縮ひび割れの発生を抑制することが可能となる。

3. 上弦材とP C床版接合部に対する実験的検討

3.1 実験の目的

トラス上弦材上に薄いゴムパッドを敷設しコンクリートを施工する場合、解析モデルではゴムパッド部分をスライドあるいはせん断バネで仮定する。しかし、このようなモデル化の是非については実験で検証する必要がある。また、ゴムパッドを併用した接合部の強度・耐疲労性ならびにグループ配置したスタッド部やゴムパッド敷設部における施工の確実性についても実験で検証する必要がある。

ここでは、提案した施工手順により製作した試験体を使用して、以下の項目に着目して実験を行った。

- I 床版への橋軸方向プレストレス導入量に及ぼす箱抜き・ゴムパッドの影響
- II 鋼コンクリート合成作用の確認と接合部の設計法
- III 設計荷重時、終局荷重時 (道路橋示方書で規定する「降伏に対する安全度の照査荷重」時) の性状 (コンクリートと上弦材のズレ量・変形・ひび割れの進展・スタッドの挙動)
- IV 接合部の疲労性状 (繰り返し载荷に伴う部材ひずみ

・ひび割れ・スタッド挙動の変化)

V 格点箱抜き部における橋軸直角方向プレストレスの有無に伴う強度・耐疲労性の比較

VI 施工性と設計で規定した品質が満足される事の確認

3.2 試験体

(1) 試験体の概要

格点位置・格間におけるトラス上弦材とP C床版間の力の伝達を追跡できる試験体として、上弦材3格間を取り出した縮小トラスモデルを使用した。試験体は、箱抜き後打ち部 (以後箱抜き部と称す) の橋軸直角方向プレストレス導入時期をパラメータとした2種類と、箱抜き部を設けない比較用試験体の合計3体とした。箱抜きを設ける試験体ではプレストレス時に床版に作用する有効プレストレス量を高めるために、箱抜き部以外の上弦材上フランジ上にゴムパッドを敷設し、鋼コンクリート間を縁切りし

表-1 実験パラメータ

試験体	ゴムパッド	スタッド部 箱抜き	プレストレス導入時期		
			橋軸方向	橋軸直角方向	
				一般部	箱抜き部
A	有	有	先締め	先締め	先締め
B	有	有	先締め	先締め	後締め
C	無	無	橋軸直角、橋軸方向の順		

た。実験パラメータを表－１に示す。表中、プレストレス導入時期の先締め、後締めはそれぞれ箱抜き部コンクリートの打ち込み前、打ち込み後にプレストレッシングすることを意味する。

(2) 試験体の設計

格点位置のスタッドに作用する水平せん断力が実橋と試験体で等価となるように、試験装置の載荷能力（静的最大荷重：6200 kN、動的最大荷重 3900 kN）ならびに試験体設置可能領域に対する制約を勘案して、一主構面とし着目格点と載荷荷重及び試験体の縮尺（骨組寸法縮尺 1/2.5、部材寸法縮尺 1/2.2）を決定した。試験体の形状寸法を図－３に示す。また相似比率は断面積比とした。

(3) 使用材料

試験体に使用した材料をそれぞれ表－２に示す。

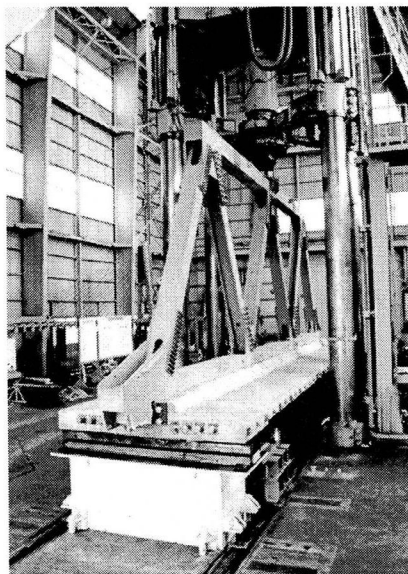
表－２ 使用材料

鋼材	SM490 (t=9～32mm), SM400 (t=9～22mm)
スタッド	SM570 (φ16×220)
鉄筋	SD345 (D22, D16, D13), SD295A (D10, D6)
P C鋼材	縦締め 1S21.8(SWPR19) 注) 鉄筋、P C鋼材スタッドは断面積と本数で評価
	横締め 1S12.7(SWPR7B)
コンクリート	早強ポルトランドセメントコンクリート 設計基準強度 40 N/mm ² , スランプ 8 cm 空気量 4.5%

3.3 実験内容および実験要領

実験は次の４項目について実施した。

- ① P C床版のプレストレッシング時を対象としたプレストレス導入量の確認
- ② 設計荷重：3785kN（死荷重＋活荷重（B活荷重，L荷重）最大＋衝撃）を対象とした静的載荷
- ③ （死荷重＋活荷重最大＋衝撃）：3785kN，（死荷重＋活荷重最小＋衝撃）：2193kN を上下限とする 200 万回繰り返し載荷
- ④ 終局荷重（1.3×死荷重＋2.5×（活荷重＋衝撃））を対象とした静的載荷：6200kN



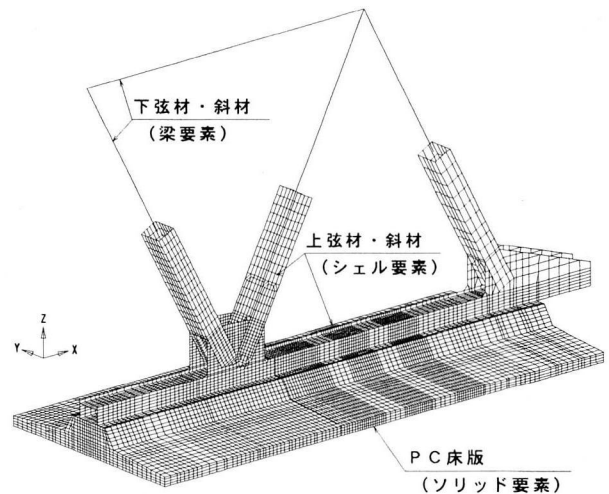
写真－１ 実験状況

象とした静的載荷：6200kN

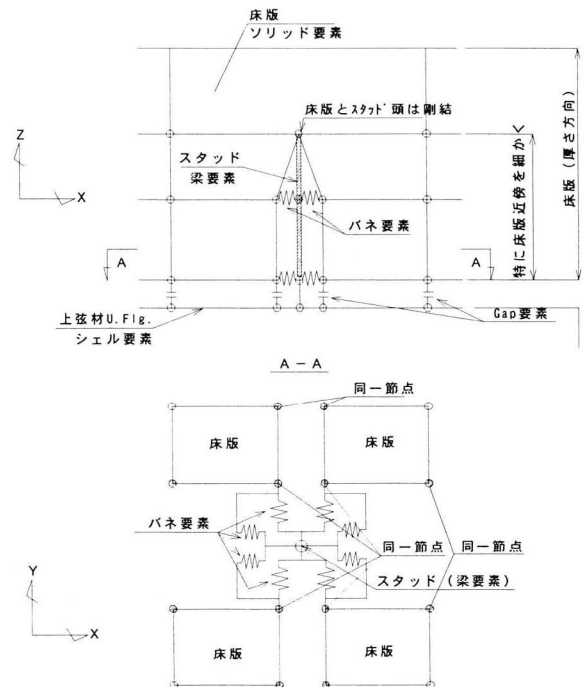
載荷要領および実験要領を次に述べる。①についてはコンクリート床版を型枠・支保工で支持した状態で橋軸直角方向、橋軸方向の順にプレストレッシングした。また②～④については、試験体を上下反転させ、線支承で単純支持した状態で下弦材の中央格点に鉛直下方向に荷重載荷した。実験状況を写真－１に示す。

3.4 F E M解析

実験に先立ち、試験体の変位や各部材に発生する応力状態等を把握するために３次元弾性F E M解析を行った。試験体A, Bについてはプレストレッシング時のスタッド箱抜き部の影響を考慮するため、箱抜き部をモデル化し、コンクリート硬化後は箱抜き部でトラス上弦材と合成させることとした。試験体Cについては箱抜き部を設けず、



図－４ FEM解析モデル



図－５ スタッドのモデル化

レストレッシング時に鋼部材が抵抗するとして解析した。

解析モデル図-4は対称性を考慮して橋軸方向に1/2とし、床版はソリッド要素、上弦材はシェル要素、斜材はシェル要素と梁要素、下弦材は梁要素で、それぞれモデル化した。スタッドは、梁要素を用いて詳細なモデル化を図-5に示すように行った。なお、スタッド以外の床版と上弦材を、接触面で鉛直方向の圧縮力のみ伝達可能なギャップ要素により結合した。解析結果については、3.5の中で実験結果とともに示す。

3.5 実験結果および考察

3.5.1 プレストレッシング時の挙動 (着目項目1)

(1) 鋼上弦材に伝達される応力

図-6にトラス上弦材のひずみゲージ位置を、また表-3にプレストレッシングにより上弦材上フランジ及びウェブに発生した橋軸方向ひずみをそれぞれ示す。

表-3より、フランジ (SUF04) は試験体Cで -170μ (-35.0N/mm^2) のひずみが発生するのにに対して、ゴムパッドを敷設した試験体A, Bでは最大 -18μ と小さい。このことから、スタッド部の箱抜きとゴムパッドの敷設により、上弦材に伝達される応力が大きく低減されることがわかる。

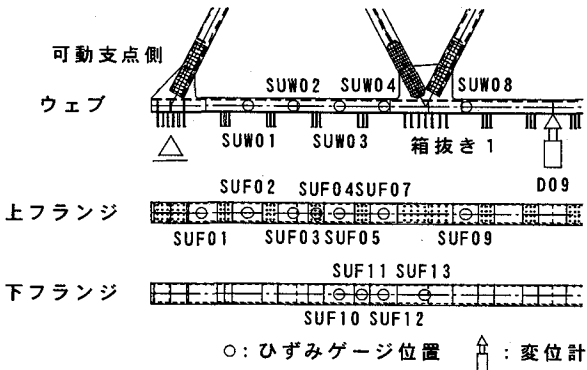


図-6 トラス上弦材ひずみゲージ位置

表-3 上弦材上フランジ・ウェブの橋軸方向ひずみ

計測位置	試験体	プレストレッシングの方向	
		橋軸直角方向	橋軸方向
SUF03	A	16	-19
	B	29	-14
	C	14	-159
SUF04	A	18	-18
	B	29	-16
	C	13	-170
SUW03	A	6	-3
	B	10	0
	C	10	-185

単位: μ (+: 引張, -: 圧縮)

(2) ゴムパッドの挙動

橋軸方向プレストレッシング時に試験体A, BのゴムパッドがPC床版の弾性変形に追従してせん断変形したと仮定し計算すると、ゴムパッド表面に作用する水平力は摩

擦力より大きくなり、摩擦力は水平力に抗しきれない結果となる。また、橋軸方向プレストレッシング時のトラス上弦材の実測ひずみは -3μ (試験体AのSUW03)であり、ゴムパッドのせん断変形から計算したひずみ (-163μ)と比較すると遙かに小さい。したがって、橋軸方向プレストレッシング時にPC床版とゴムパッドの表面において滑りが発生しているものと推察される。

(3) PC床版に導入されるプレストレス

図-7にPC床版上面ひずみゲージ位置を、また図-8, 9にプレストレッシングによる橋軸方向ひずみの橋軸方向、橋軸直角方向分布をそれぞれ示す。

図-8より構造中心線上における床版上面のひずみは

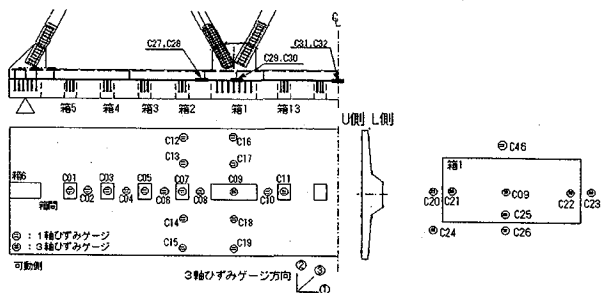


図-7 PC床版上面ひずみゲージ位置

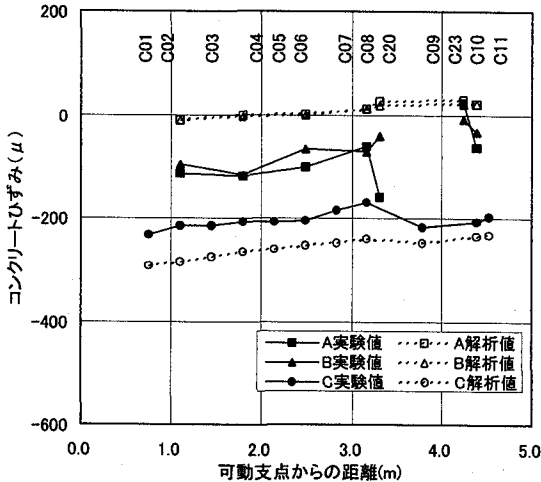


図-8 PC床版橋軸方向ひずみ分布 (橋軸方向)

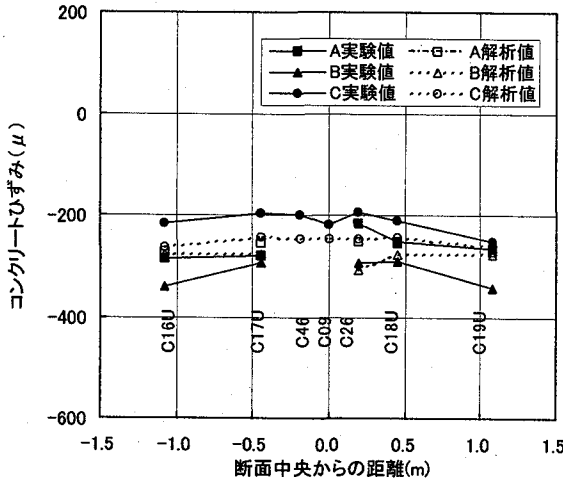


図-9 PC床版橋軸方向ひずみ分布 (橋軸直角方向)

試験体Cと比較して試験体A, Bでは1/2程度と小さい。また、試験体A, Bでは橋軸方向プレストレスによる箱抜きと箱抜きとの間の部位のひずみ(図-8のC02, 04, 08: -60~120 μ)は張り出し部のひずみ(図-9より-250~-350 μ)の3~4割程度となった。これは、箱抜きに伴う部材欠損の影響により上弦材の箱抜き間にはプレストレスが導入されにくくなっていることを示している。

3.5.2 鋼コンクリート合成作用の確認と接合部の設計法 (着目項目II)

(1) 静的載荷時の荷重～鉛直変位関係

図-10 に終局荷重載荷時における試験体A～CのP C床版中央位置(D09)の荷重～鉛直変位関係を示す。

図より、いずれの試験体においても顕著な非線形性は見受けられず、残留変位をほとんど生じていないことがわかる。また実験結果はF E M解析値ともよく一致している。これより、終局荷重載荷の範囲では全ての試験体で合成構造として挙動しているとともに構造全体に顕著な剛性低下はなく、箱抜き部およびゴムパッドの有無が構造全体の変形に及ぼす影響は微細なものであったと判断できる。

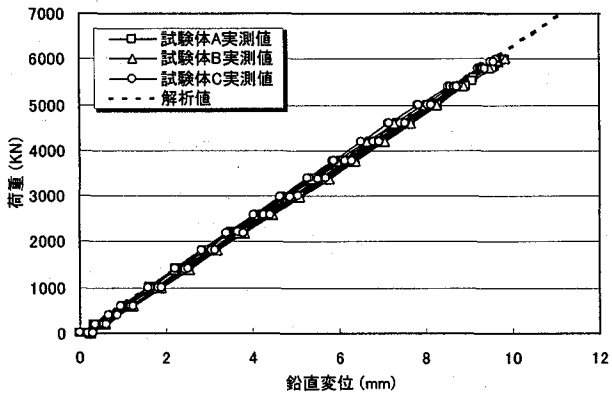


図-10 終局荷重載荷時の荷重～鉛直変位関係

(2) トラス上弦材への力の伝達

図-11 に設計荷重載荷時のトラス上弦材上フランジの橋軸方向ひずみを橋軸方向位置をパラメータとして示す。

図より、格点箱抜き部のSUF07, SUF09のひずみ分布で試験体毎のひずみ分布に多少のばらつきが見受けられる

表-4 格点部スタッドにおける曲げひずみ ϵ_b と分担比率

	試験体	計測スタッド位置			平均値 ①	最大値 ②	比率 ②/①
		I	II	III			
設計 荷重 載荷	A	460	487	291	450	487	1.08
	B	359	526	140	434	526	1.21
	C	519	534	243	483	534	1.11
終局 荷重 載荷	A	733	785	453	721	785	1.09
	B	666	896	319	761	896	1.18
	C	717	769	375	694	769	1.11

が、格間部では全ての試験体で同様の分布形状を示している。また、F E M解析との比較においても、ほぼ同様な傾向を示す。このことから、格点部では箱抜きの有無による影響を受けるが、格間部においては箱抜き・ゴムパッドの有無に係わりなく各試験体のP C床版から上弦材への力の伝達はほぼ同様な挙動を示すと考えられる。

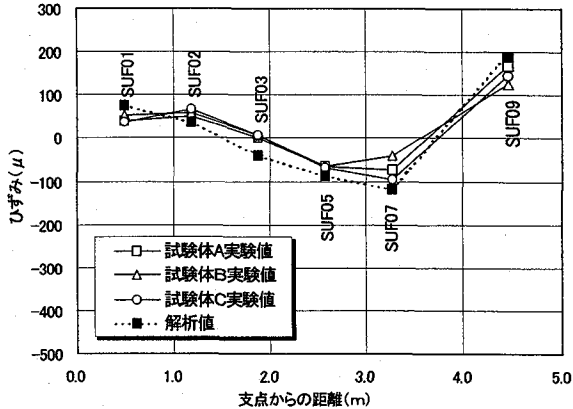


図-11 上弦材上フランジの橋軸方向ひずみ分布

(3) 格点部スタッドのせん断力分担特性

設計荷重 3785kN 載荷時における各試験体の、スタッドのフランジ上面から25mmの高さに貼付した3軸ゲージより算出したスタッドST1, ST3, ST5, ST7, ST9のせん断ひずみの橋軸方向分布を図-12に示す。また、格点部の各ス

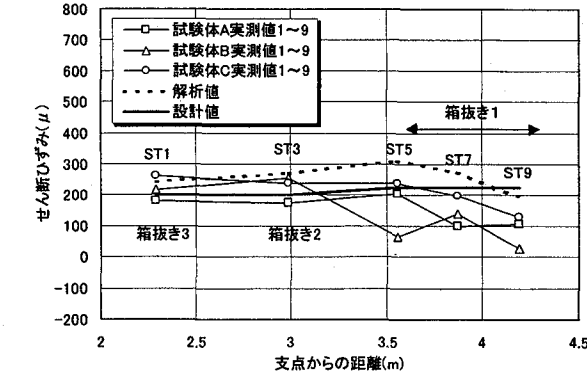


図-12 スタッドせん断ひずみの橋軸方向分布 (設計荷重 3785kN 載荷時)

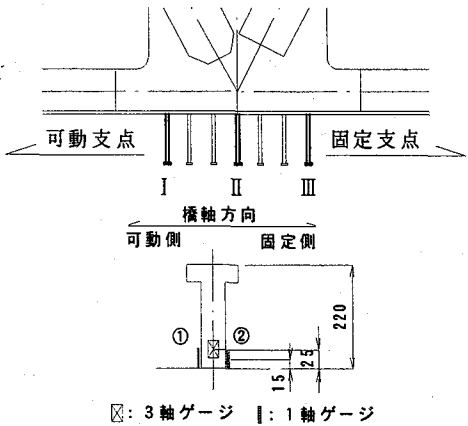


図-13 計測スタッド位置図

タッドのせん断力分担割合を調べるため、スタッドの1軸ゲージより算出した曲げひずみ ε_b を表-4に、そのゲージ位置を図-13に示す。表中、曲げひずみ ε_b は $\varepsilon_b = (\varepsilon_2 - \varepsilon_1) / 2$ (ここで、 ε_1 :スタッド1軸ゲージの引張ひずみ、 ε_2 :スタッド1軸ゲージの圧縮ひずみ)により計算した。これより格点部のスタッドについて以下のことが考察された。

①格点部と格間部に分散配置したスタッドのせん断ひずみ分布は、格間部では各試験体とも同様な傾向を示し、弾性FEM解析値とも対応している。しかし、試験体Bでは格点部のスタッドIでせん断ひずみが小さい値と

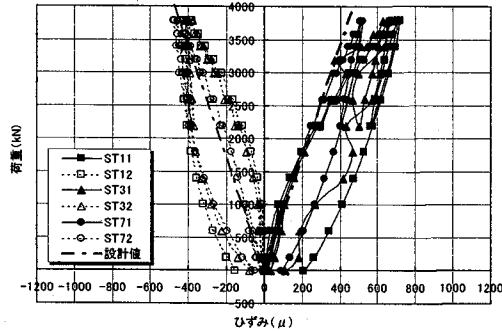
なった。

②格点部のスタッドに生じる曲げひずみの最大値と平均値との比率は、設計荷重最大時で1.08~1.21、終局荷重時で1.09~1.18となる。一方、弾性FEM解析では両者の比率は1.21となり、スタッドは全体作用力の平均値の1.2倍で簡易に設計できることが示された。

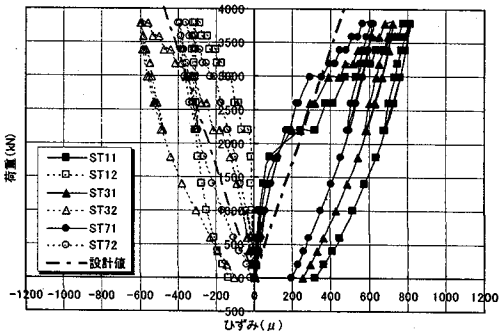
3.5.3 設計荷重時および終局荷重時の挙動 (着目項目Ⅲ)

(1) スタッドの荷重～ひずみ関係

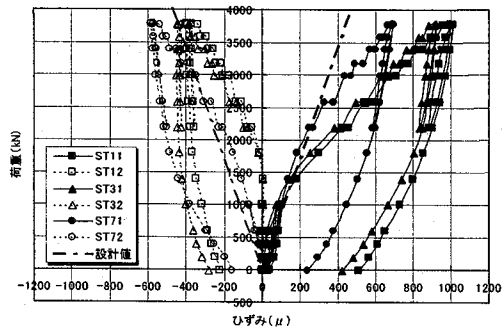
図-14に設計荷重時におけるスタッドの荷重～ひずみ関係を示す。図-16にスタッドの位置と相対変位の



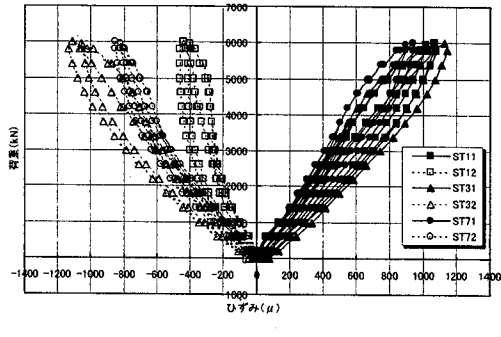
試験体A (設計荷重時)



試験体B (設計荷重時)

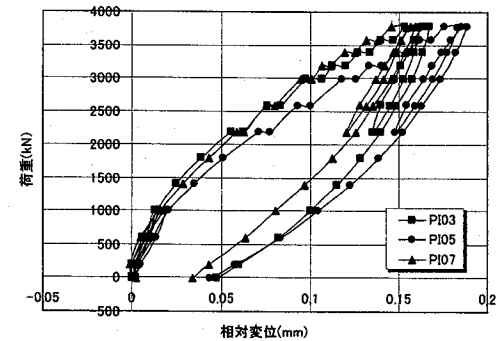


試験体C (設計荷重時)

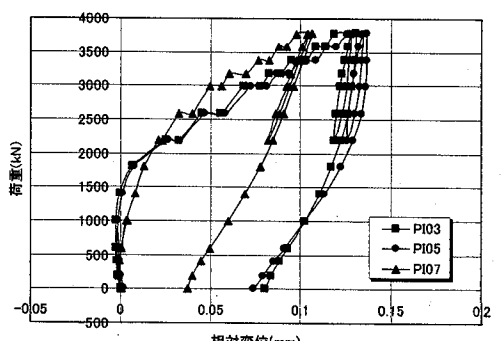


試験体B (終局荷重時)

図-14 スタッドの荷重～ひずみ (1軸ゲージ) 関係



試験体A



試験体C

図-15 PC床版と上弦材間の荷重～相対変位関係 (設計荷重時)

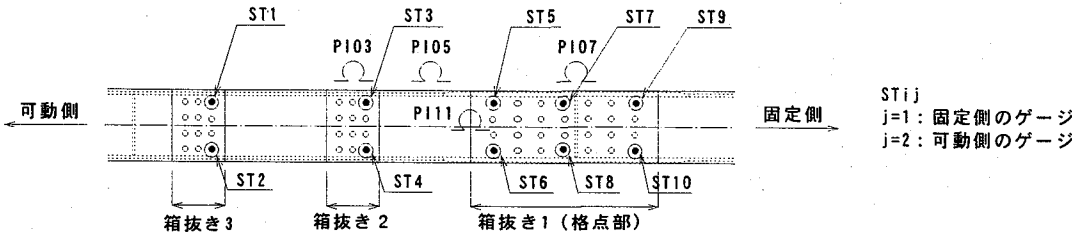


図-16 スタッドと相対変位の計測位置

STij
j=1: 固定側のゲージ
j=2: 可動側のゲージ

計測位置を示す。この実験結果より以下の知見が得られた。

- ①各試験体とも、処女載荷時（設計荷重載荷前の 0～1000kN の単調載荷）において試験体のなじみの影響による残留ひずみが生じており、3 試験体の中で試験体 C のそれが最も大きい。しかし、全ての試験体で設計荷重載荷範囲における急激なひずみ増加は見られない。
- ②終局荷重載荷時における結果の 1 例として、試験体 B のスタッドは床版上縁のひび割れ発生荷重（5000kN 付近）以降若干の非線形性が見られるものの、全体的に線形性が認められ、スタッドは十分な耐力を維持していると判断される。
- ③上弦材上フランジにゴムパットを敷設していない試験体 C の格間部のスタッド（ST1, ST3）で、処女載荷時のみ荷重が約 1500kN までひずみが全く増加せず、上弦材上フランジと P C 床版の付着の影響が認められた。一方、格点部のスタッド（ST7）では、この様な付着の影響は認められなかった。

(2) P C 床版と上弦材の相対変位および付着の影響

設計荷重載荷試験における試験体 A, C の P C 床版と上弦材の荷重～相対変位関係を結果の一例として図-15 に示す。これらの実験結果より以下の知見が得られた。

- ①設計荷重載荷試験における P C 床版と上弦材の相対変位量は、試験体 A では急激な増加は示さず、最大変位で 0.2mm 以下、残留変位も 0.05mm 以下となった。
- ②試験体 C では 1500kN までほとんど相対変位は増加せず付着の影響が認められた。付着が切れた荷重は死荷重の 40% 程度で、その直後に相対変位が急増し、最大変位は他の 2 体と比較して小さいが、0.08mm の残留変位が生じた。ただし、付着の影響が認められるのは処女載荷においてのみであった。
- ③試験体 B は試験体 C とほぼ同等の相対変位量となっており、橋軸直角方向プレストレスによる一体性の向上が確認された。

3.5.4 耐疲労性（着目項目Ⅳ）

(1) 繰返し載荷に伴うスタッドのひずみおよび P C 床版と上弦材間の相対変位の推移

格間部の箱抜き 3 のスタッド（ST1）と、格点部の箱抜き 1 のスタッド（ST7）におけるスタッド軸方向ひずみ振幅の推移を図-17 に示す。また、格点部および格間における P C 床版と上弦材の相対変位振幅推移の一例として試験体 B の実験結果を図-18 に示す。この結果より次のことがわかる。

- ①スタッドの軸方向ひずみ振幅については、繰返し回数が 0～1000 回時に試験体のなじみにより振幅が多少変動しているが、1000 回以降の繰返し載荷による振幅の増加は認められない。
- ② P C 床版と上弦材間の相対変位の振幅は、載荷回数の増加に伴う振幅の増加は認められない。
- ③上記①、②より、設計荷重 3785kN 載荷時の 42%（スタ

ッドのせん断応力度の振幅は 60N/mm^2 ）の荷重振幅で 200 万回繰返し載荷した後も、全試験体で P C 床版と上弦材の接合部は十分な耐疲労性を有すると判断できる。

(2) 鋼材の腐食に関する耐久性

図-19 に試験体 A, B の中間格点部（箱抜き 1）における打継目のひび割れ幅の推移を示す。

試験体 A, B において箱抜き打継目に生じたひび割れ幅は、載荷回数の増加に伴い、僅かながらであるが徐々に広がった。しかし、200 万回載荷前後の設計荷重 3785kN 載荷時のひび割れ幅の増加量は 0.02mm 以下と小さい。また、疲労試験中の死荷重作用時における鉄筋ひずみは $129 \sim 136\mu$ であり、これはひび割れ幅の検討を省略できる場合の制限値^[4]（ 600μ ）以内であり、耐久性に關与する鋼材の腐食に対しては安全であることが確認された。

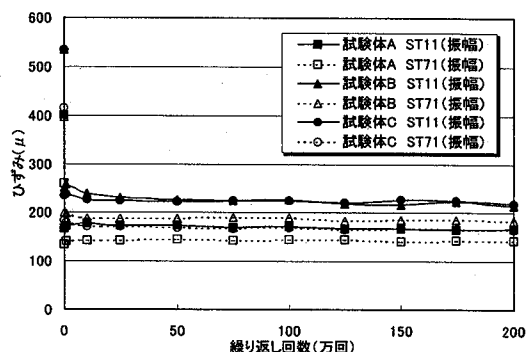


図-17 スタッドひずみ振幅の推移

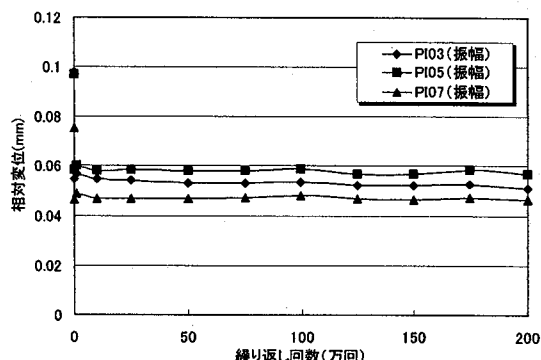
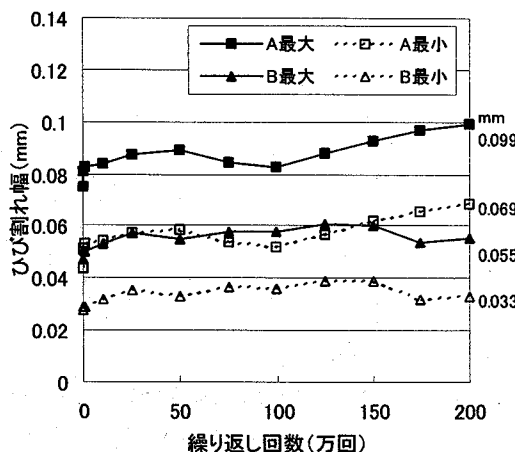


図-18 上弦材と P C 床版間相対変位振幅の推移



P11: 箱抜き 1 のパイゲージ

図-19 ひび割れ幅の推移

3.5.5 PC床版のひび割れ（着目項目Ⅲ，Ⅳ）

(1) ひび割れ状況

1) 設計荷重載荷試験

試験体A,Bでは，RC部材である箱抜き部の打継目と内部にのみひび割れが生じ（実橋は膨張剤対策），PC部材にはひび割れは生じなかった．一方，試験体Cでは一体構造としており，ひび割れは中間格点部（固定支点側）近傍

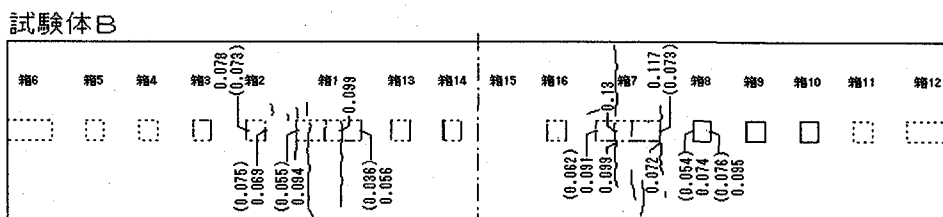
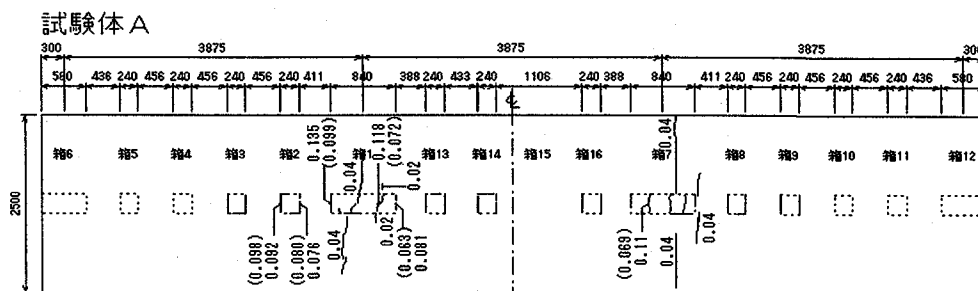
に0.02mm未満の微細なひび割れが一部目視で確認されたのみであった．発生したひび割れ幅の構造中心線沿いの合計値を表－5に示す．表より，試験体A,Bでは箱抜き部の打継目にひび割れが集中していることが分かる．

2) 疲労試験

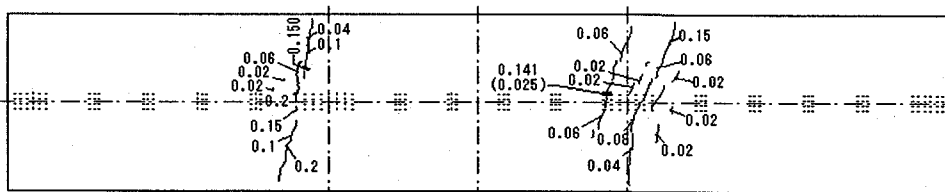
中間格点部に位置する箱抜き1,7（1の対称位置で固定側の箱抜き部を示す）内のひび割れは，試験体Aでは設計

表－5 構造中心線におけるひび割れ幅の合計（mm）

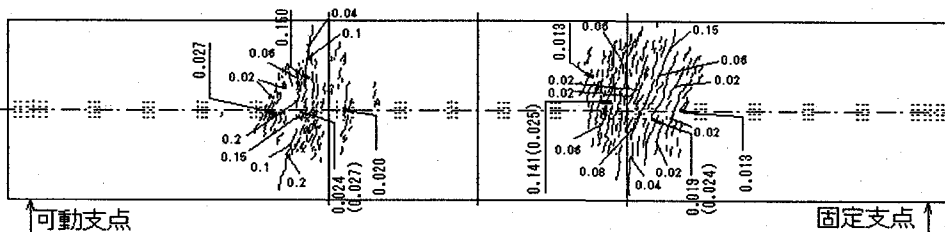
試験項目		試験体A		試験体B		試験体C
		打継目	内部	打継目	内部	
設計荷重載荷試験	小計	0.91	0.18	0.86	0.03	—
	合計	1.09		0.89		0.03
疲労試験	小計	1.53	0.24	1.26	0.04	—
	合計	1.77		1.30		0.90
終局荷重載荷試験	小計	1.73	0.59	1.68	0.58	—
	合計	2.32		2.26		1.84



試験体C（終局載荷試験において進展または顕著に開口したひび割れ）



試験体C（微細ひび割れも描写した場合）



数字：終局荷重載荷時の最大ひび割れ幅（mm）

（ ）は疲労試験200万回終了時の設計荷重3785kN載荷時におけるひび割れ幅（mm）

図中，箱とは箱抜きのことを示す

図－20 終局荷重載荷試験における最終ひび割れ状況

荷重載荷試験時に目視で確認されたが、試験体Bでは設計荷重載荷試験時ではなく疲労試験中に確認された。試験体Cは、中間格点部（箱抜き1,7）から張出し部に至るまで幅0.03mm未満の多数の微細ひび割れが細かい間隔(3～10cm)で分散して徐々に発生し、ひび割れが箱抜き部だけに集中して発生した試験体A,Bとは対照的であった。また、ひび割れ幅の合計値は試験体Aが最も大きく、続いて試験体Bであり、試験体Cが最も小さかった。

3) 終局荷重試験

最終ひび割れ状況を図-20に示す。試験体A,Bとも、設計荷重(3785kN)以上で、一般部（箱抜き部外側）の格点部横に張出し先端まで及ぶひび割れが発生したが、終局荷重(6200kN)時のひび割れ幅は一般部で0.04mmとなっており、箱抜き内のひび割れ幅より小さいものであった。試験体Cでは疲労試験時に発生していた微細ひび割れの一部が、最大荷重時に幅0.1～0.2mmまで広がった。

また、全試験を通じて、床版上面の構造中心線沿いのひび割れ幅の合計値は、RCである箱抜き部を有する試験体A,Bの方が試験体Cより大きかった。なお、いずれの試験体のひび割れも除荷に伴いほとんど閉じ、除荷後の残留ひび割れ幅はほぼ0となった。

(2) ひび割れ制御（着目項目V）

箱抜き部コンクリートに横締めプレストレスを与えた試験体Bは、与えていない試験体Aに比べ、横締めプレストレス導入方向と平行な打継目におけるひび割れ発生荷重が大きく、ひび割れ幅が小さかった。

これはポアソン比の影響や、箱抜き部と一般部とのせん断伝達性の向上による影響等が考えられ、横締めプレストレスの導入は、その箇所でのひび割れ制御に効果があると判断される。

(3) ひび割れ発生後の曲げ挙動

図-21に設計荷重時における鉄筋ひずみの橋軸直角方向分布を示す。

箱1断面における上縁側の鉄筋の実験値に着目した場合、ひび割れの生じた箱抜き内の鉄筋DB3U5,6はひび割れの生じていない張出し部の鉄筋DB1U3,4、DB4U3,4とほぼ等しいひずみを示している。また、全断面有効の剛性を用いた解析値とも極端には違っていない。これより、

箱抜きを有する断面において箱抜き内のひずみ分布、曲率はひび割れの生じていない一般部のひずみ分布、曲率と同様であると推察される。即ち、箱抜きを有する断面では箱抜き部と一般部とを合わせた全体断面で作用力に抵抗しており、箱抜き内にひび割れが生じて一般のRC部材のように鉄筋に急激な応力増加が生じるものではないことが確認された。

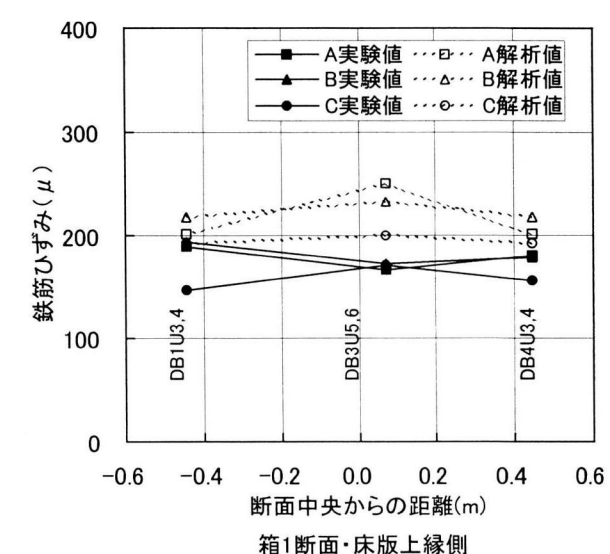
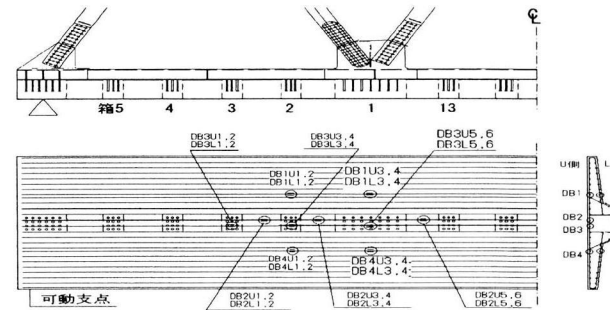


図-21 設計荷重載荷時における鉄筋の橋軸直角方向ひずみ分布

3.5.6 PC床版の内部観察結果（着目項目VI）

終局載荷実験終了後、PC床版の版厚方向のひび割れ状況ならびにスタッドと接触するコンクリート境界面の付着状況を調べる目的で、スタッド配置部を含む面で試験体を切断した。

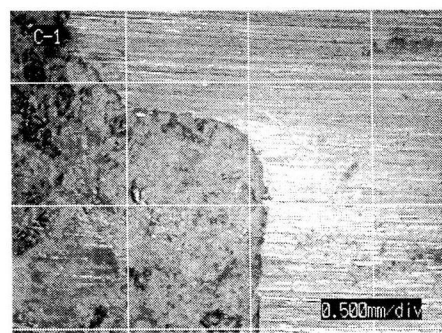


写真-2 スタッド頭部画像

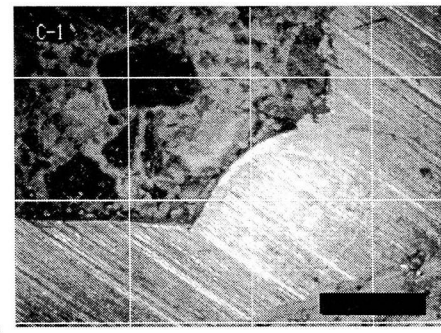
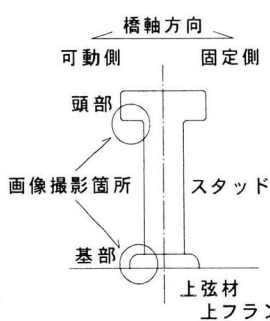


写真-3 スタッド基部画像

内部観察により、次のことがわかった。

【試験体A,B】

1) 箱抜き内部（打継目以外）の曲げひび割れ

床版上面に見られた箱抜き内部のひび割れは、全てスタッド部頭の頭部に到達したものであった。

2) 箱抜き打継目のひび割れ

箱抜き打継目には付着切れによるひび割れが生じたが、その大きさは設計荷重 3785kN 載荷時で 0.077 mm 以下と小さいものであった。

【試験体C】

床版上面に見られたひび割れが、内部に進展している様子は見受けられなかった。これより、試験体Cはひび割れが表面に分散して発生したが、床版全体がPC部材であるために、内部へのひび割れ進展は、プレストレスにより制御できたものと考えられる。

次に、マイクロスコプを使用した試験体内部観察結果について考察を加える。スタッド基部と上部のマイクロスコプの画像を写真-2, 3にそれぞれ示す。写真よりスタッドとコンクリートの間は支圧による破壊やスキ間が生じておらず、健全であることが確認された。

4. まとめ

このような構造・施工方法の採用は、床版に与える有効プレストレスを高める効果があるが、過去に採用例が無いため、トラス上弦材とPC床版間の力の伝達状況を踏まえたスタッドの設計方法の確立と、耐荷力・耐疲労性・施工性の確認、および設計で要求する品質を施工で確保できる保証を得る事を目的として部分トラスモデルを用いた検証実験を行った。

実験結果により次のことが確認された。

- ①スタッド部の箱抜きと上弦材上にゴムパッドを敷設することにより、床版の橋軸方向にプレストレッシングする際に鋼部材の抵抗によるプレストレス量低下を防ぐことができた。ゴムパッド部分の挙動については、そのせん断変形がコンクリートの弾性変形を拘束する機構にはならず、PC床版がゴムパッド上を滑ることがわかった。
- ②荷重～鉛直変位関係は全ての試験体で終局荷重載荷時においても非線形性や、残留変位がほとんど生じず、鋼コンクリートを一体化したモデルに対するFEM解析結果と良く一致した。またPC床版と上弦材間の相対変位は全ての試験体の終局荷重載荷時で最大0.3mm以下であり残留相対変位も0.05mm以下となった。このことから、終局荷重作用時においても鋼とコンクリートが十分に合成されていることが確認された。
- ③スタッド配置に対するPC床版とトラス上弦材間の力の伝達と格点部に集中配置された各スタッドの荷重分担度合いから、スタッドは全スタッドで均等に受け持つ場合の1.2倍の作用力に対して設計すればよいことが

わかった

- ④コンクリート表面のひび割れは、試験体A, Bと試験体Cで様相が異なり、前者では箱抜き部に集中して発生したのに対し、後者は中間格点近傍に幅0.03mm未満の微細なひび割れが分散して発生したが、両者ともひび割れ幅は、鋼材の腐食に関する耐久性に関して問題ない程度のものであった。また箱抜きを有する断面では、箱抜き部と一般部とを合わせた全体断面で作用力に抵抗しており、箱抜き内にひび割れが生じて、一般のRC部材のような鉄筋応力の急激な増加や曲率の増加は生じないことが確認された。
- ⑤全試験体において鋼部材、スタッド、PC床版の全ての部材とも、耐疲労性に問題がないことが確認された。
- ⑦箱抜き部に対する橋軸直角方向プレストレス導入時期を変化させた試験体A, Bを比較すると、箱抜き部の橋軸直角方向にプレストレスの与えられた試験体Bでは一般部と箱抜き部の一体性が高まり、特に境界面のひび割れ発生時期・ひび割れ幅の抑制に効果を有することが確認された。
- ⑧疲労実験、終局載荷実験の後にPC床版を切断して内部観察を行った結果、スタッドとコンクリートの接触面に変状は見られず、設計で要求する品質を施工時に確保できることが確認された。

本実験結果から、スタッド部を箱抜きし橋軸直角方向プレストレッシング後にこの部分のコンクリートを打ち込むとともにゴムパッドを敷設した構造・施工方法の有効性が確認された。また、格点箱抜き部の橋軸直角方向にプレストレスしたタイプが、一般部と箱抜き部の一体性を高め構造上最も優れていることを確認でき、実工事においてこの施工方法（試験体B）を採用することとした。

椿原橋の設計・施工は財団法人高速道路技術センターの「東海北陸自動車道 鋼トラス橋の合理化構造に関する調査研究委員会（依田照彦委員長）」の指導の下に実施されたものであり、委員会メンバーによる多くの貴重な意見をいただいた。また、本実験は社団法人建設機械化研究所の大型疲労試験機を使用して行い、同研究所には多くの協力をいただいた。ここに、謝意を表します。

参考文献

- [1] 渡辺他：遅延合成構造の開発と実用化に関する研究、構造工学論文集 Vol.47A pp1363～1372, 2001年3月。
- [2] 第二東名高速道路 員弁川橋（鋼上部工）工事共同企業体：スタッドせん断耐力試験 報告書, 平成12年12月。
- [3] 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 II 鋼橋編, 平成14年3月。
- [4] 土木学会：コンクリート標準示方書・設計編 平成8年制定。

(2002年9月13日受付)