

複合トラス橋のトラス上弦材と場所打ちPC床版の 接合部に関する載荷実験

Loading Test for Connection between an Upper Chord and a Cast-in-Place PC Floor Slab in a Composite Truss Bridge (Tsubakihara Bridge)

永谷 秀樹*¹ 坂根 秀和*¹ 能登 宥愿*² 太田 貞次*³
Hideki NAGATANI Hidekazu SAKANE Hiroyoshi NOTO Teiji OTA

Summary

The Tsubakihara Bridge is a composite truss bridge in which the upper chord of the truss and the cast-in-place PC floor slab are combined with stud shear connectors. This bridge is constructed by the following method: First, rubber pads are provided on the upper chord after the erection of the truss to introduce the prestressing into the floor slab effectively. Next slab concrete is cast with making voids, which are used in conjunction with the upper chords around the stud shear connectors. Then, by casting concrete into the voids of the slab after the prestressing work, the floor slab and the upper chord are combined to create composite action. Static and repeated loading tests were carried out on specimens produced by the above method. This paper reports on fatigue resistance and the structural behavior of the connection between the upper chord and the floor slab in the ultimate state on the basis of the loading tests for the Tsubakihara Bridge.

キーワード：複合トラス橋，PC床版，接合部，スタッド，静的載荷実験，疲労載荷実験

1. 実験の目的

椿原橋は、スタッドを用いてトラス上弦材と場所打ちPC床版を合成した複合トラス橋である。ここでは、PC床版に主構としての機能を持たせるとともに、床版の2方向をプレストレスングすることにより床版の剛性・耐力を高め、上横構や床組構造を省略し構造の合理化・コスト削減を図っている。また現場施工は、トラス上弦材とPC床版を合成させながら張り出し架設する方法を採用している。そのため、橋軸方向の所要プレストレス量が非常に大きくなり、橋軸方向プレストレスング時に有効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。その方法として、スタッドを格点部に主に配置するとともに格間部にもある程度分散配置し、床版打設時にスタッド部の箱抜きを行う。さらに、箱抜き部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スングする施工方法を採用している。

本実験では、この施工方法により施工した試験体を使

用して、橋軸方向プレストレス導入量に対する箱抜きおよびゴムパッドの影響を調べるとともに、スタッドによる応力伝達状況を調べ接合部の設計法に関する知見を得るとともに、上弦材とコンクリート床版の接合部の耐疲労性、終局荷重載荷状態での挙動について検証する。

2. 実験の概要

(1) 実験の着目点

実験では、次の各項目に着目している。

- ①コンクリート床版に導入される軸方向プレストレス量と鋼材の応力変化
- ②スタッドによる鋼とコンクリート接合部の応力伝達機構
- ③格点部の疲労性状（載荷回数の増加に伴う部材ひずみ・ひび割れ・スタッド挙動の変化）と耐疲労性
- ④格点部の終局状態（終局荷重載荷時のコンクリートと上弦材のズレ量・変位量・ひび割れの進展・スタッド

*技術本部設計部設計一課

*技術本部技術開発部部長

*技術本部技術開発部技術開発課課長

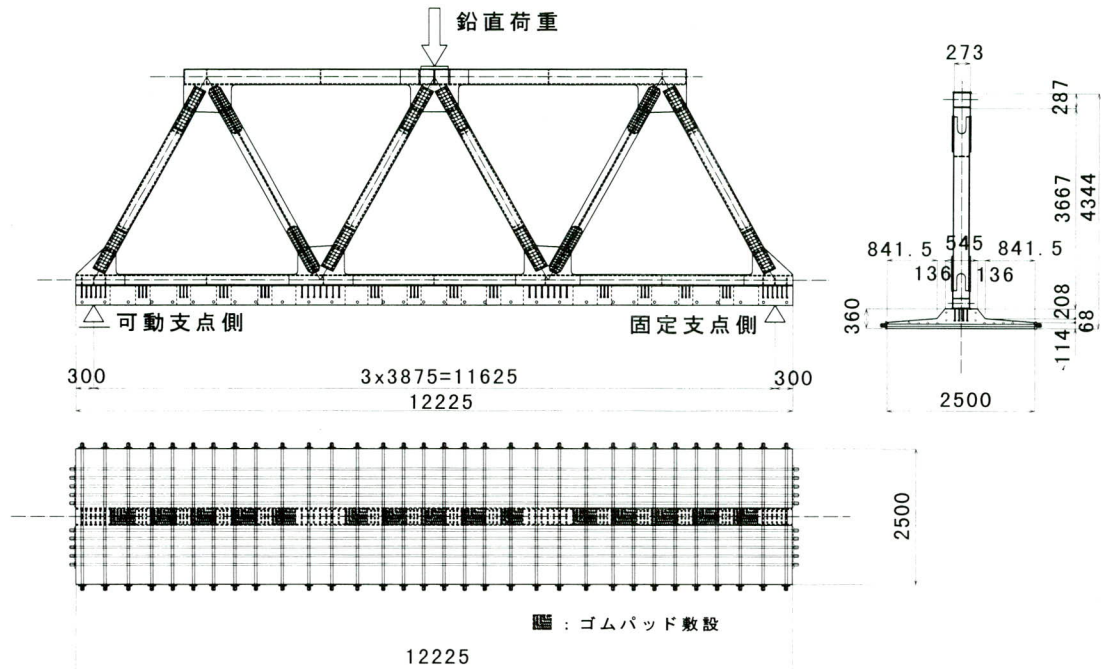


図-1 試験体諸元 (試験体A, B)

の挙動)

- ⑤ 格点の箱抜き部における橋軸直角方向プレストレッシングの有無に伴う強度・耐久性の比較

(2) 試験体

試験体は、実橋における中間支点部近傍の着目格点に対して、格点位置・格間におけるトラス上弦材とPC床版間の力の伝達を追跡できるように、上弦材3格間を取り出した縮小トラスモデル（骨組寸法縮尺1/2.5、部材寸法縮尺1/2.2）を使用した（図-1参照）。なお、試験体は、箱抜き部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・ゴムパッドを設けない比較用試験体の合計3体とした。実験パラメータを表-1に示す。

表-1 実験パラメータ

試験体	ゴムパッド	ジベル部箱抜き	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	同時期	同時期	同時期

鉛直荷重Vは、格点部のスタッドに作用する水平せん断応力が試験体と実橋で等価となるよう決定した。

(3) 使用材料

試験体に使用した材料およびコンクリートの配合をそれぞれ表-2, 3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)
PC鋼材	縦締め 1S21.8 (SWPR19) 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%

表-3 コンクリートの配合

種別	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	水 W (kgf)
P2-2	41.1	40.5	142
セメント C (kgf)	細骨材 S (kgf)	組骨材 G (kgf)	混和剤 AD (kgf)
345	752	1,104	2,588

(4) 実験項目および実験要領

実験は次の4項目に対して行った。

- ① PC床版のプレストレスング時を対象とした静的載

荷実験

- ②設計荷重（死荷重+活荷重最大： $V_U=3785\text{kN}$ ）を対象とした静的載荷実験
- ③（死荷重+活荷重最大： $V_U=3785\text{kN}$ ）、（死荷重+活荷重最小： $V_L=2193\text{kN}$ ）を上下限とする200万回繰り返し載荷による疲労実験
- ④終局荷重（ $1.3\times$ 死荷重+ $2.5\times$ 活荷重： $V_{UL}=6474\text{kN}$ ）を対象とした静的載荷実験

荷重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スングした。また②～④については、試験体を上下反転させ、線支承により単純支持した状態で下弦材の中央格点において鉛直荷重 V を載荷した（図-1参照）。

各検討に必用なデータを収集するため、ロードセル、変位計、1軸・3軸ひずみゲージ（鋼、コンクリート）、埋め込みゲージ、パイ型変位計および熱伝対を試験体に設置した。計測機器取付位置については実験結果の考察の中で適宜示す。

3. FEM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FEM解析を行った。試験体A、Bについてはプレストレスング時のスタッド箱抜き部の影響を考慮するため、箱抜き部のモデル化を行い、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た。試験体Cについては箱抜き部を設けず、プレストレスング時に鋼部材が抵抗するとして解析した。

解析モデル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、格点部近傍については梁要素を用いて詳細なモデル化を行い、その他の位置ではバネ要素を使用した。なお、スタッド以外の床版と上弦材の接触面は、鉛直方向の圧縮力のみを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、4.の中で実験結果とともに示す。

4. 実験結果および考察

(1) プレストレスング時の挙動

1) 鋼上弦材に伝達される応力とゴムパッドの挙動

図-2にトラス上弦材のひずみゲージ位置を、また表-4にプレストレスングにより上弦材上フランジに発生した橋軸方向ひずみをそれぞれ示す。

表-4より、試験体Cでは -170μ (-35.7N/mm^2)のひずみが発生するのに対して、ゴムパッドを敷設した試験体A、Bでは最大 -19μ 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。

橋軸方向プレストレスング時に試験体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すると、ゴムパッドに作用する水平力は摩擦力より大きくなる。また、橋軸方向プレストレスング時のトラス上弦材の実測ひずみは -11μ （試験体AのSUW08）であり、ゴムパッドのせん断変形から計算したひずみ（ -163μ ）と比較すると小さい。したがって、橋軸方向プレストレスング時にPC床版とゴムパッドの表面において滑りが発生したものと推察される。

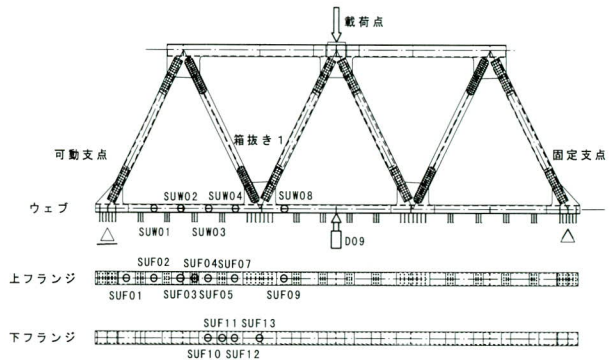


図-2 トラス上弦材ひずみゲージ位置

表-4 上弦材上フランジの橋軸方向ひずみ (μ)

計測位置	試験体	プレストレスングの方向	
		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

2) PC床版に導入されるプレストレス

図-3にPC床版上面ひずみゲージ位置を、また図-4、5に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-4より構造中心線上における床版上面のひずみは

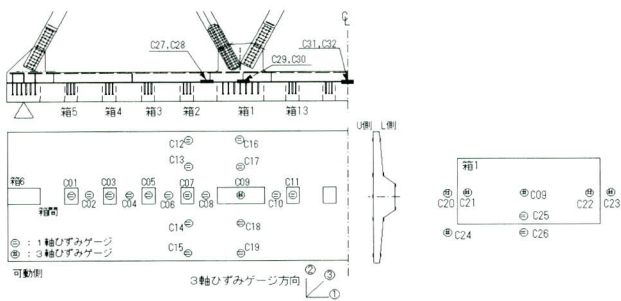


図-3 PC床版上面のひずみゲージ位置

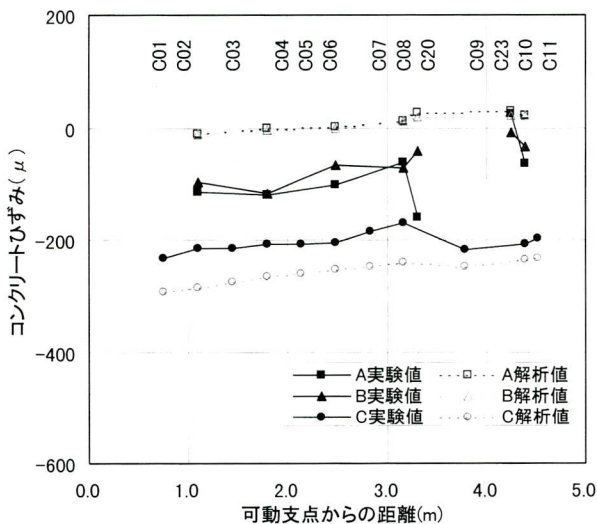


図-4 PC床版橋軸方向ひずみ分布 (橋軸方向)

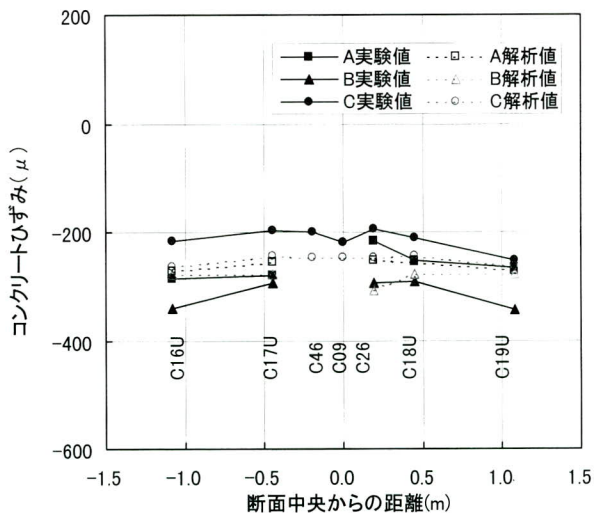


図-5 PC床版橋軸方向ひずみ分布 (橋軸直角方向)

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、橋軸方向プレストレスによる箱抜き間コンクリートのひずみは張り出し部のひずみ(図-5より250~350 μ)の3~4割程度となった。これは、上弦材の箱抜きによる部材欠損の影響であると考えられる。

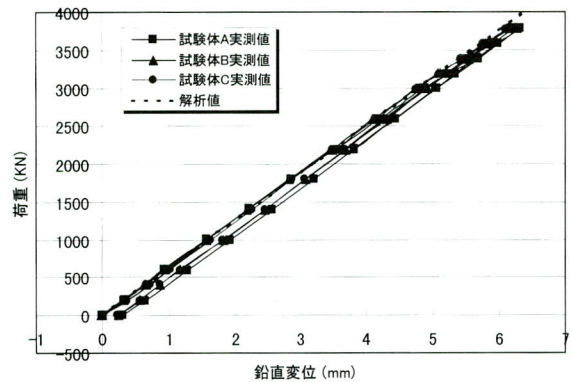


図-6 設計荷重載荷時の荷重-鉛直変位関係

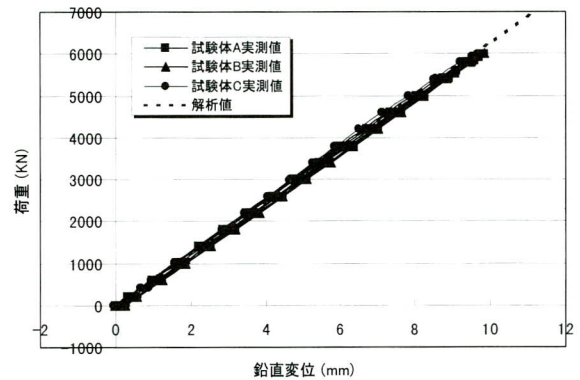


図-7 終局荷重載荷時の荷重-鉛直変位関係

(2) 静的載荷試験時の荷重-鉛直変位関係

図-6、7に設計荷重載荷時と終局荷重載荷時における試験体A~CのPC床版中央位置(D09)の荷重-鉛直変位関係を示す。

設計荷重載荷時には各試験体とも約0.3mmの残留変位が生じているが、終局荷重載荷時には残留変位がほとんど生じていない。また、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、FEM弾性解析値ともよく一致している。したがって、全ての試験体において構造全体に顕著な剛性低下はなく、箱抜き部・ゴムパッドの有無およびひび割れが構造全体の变形に及ぼす影響は微細なものであったと判断できる。

(3) トラス上弦材への力の伝達

図-8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、格点近傍の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

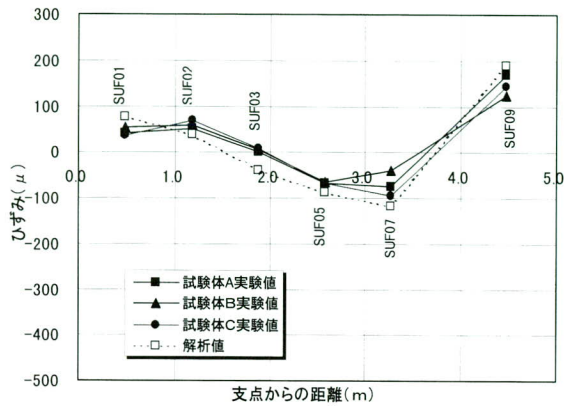


図-8 上弦材上フランジの橋軸方向ひずみ分布

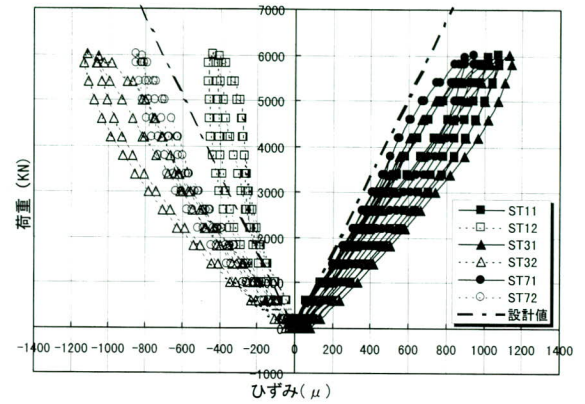
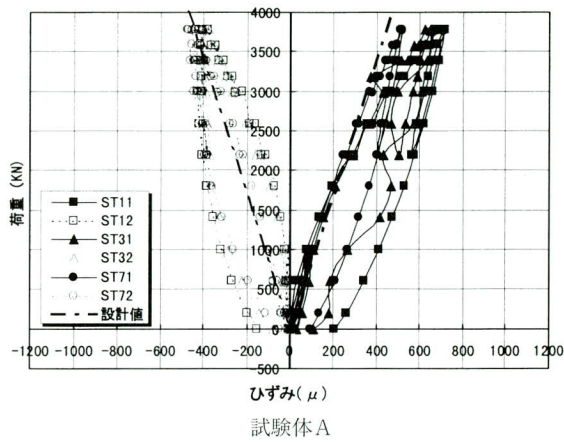
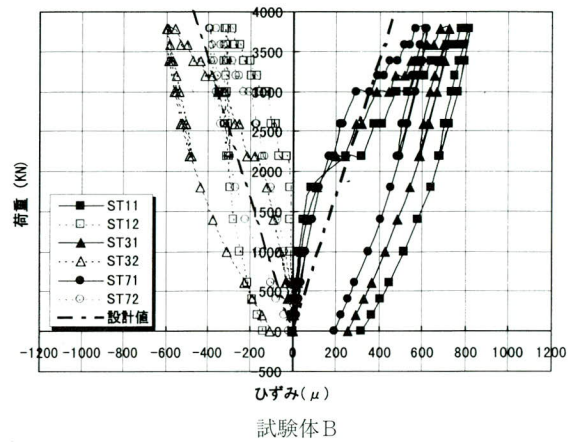


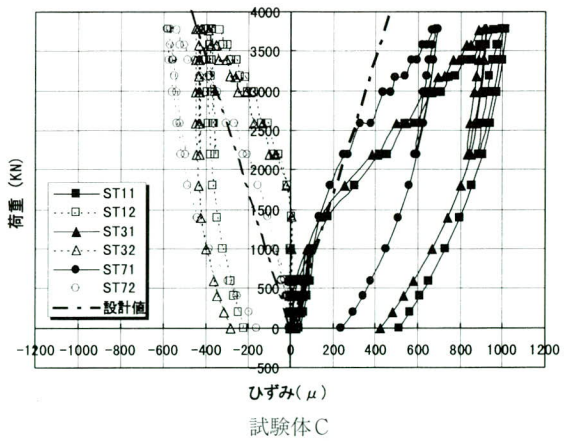
図-10 スタッドの荷重—ひずみ (1軸ゲージ) 関係 (終局荷重載荷時)



試験体A



試験体B



試験体C

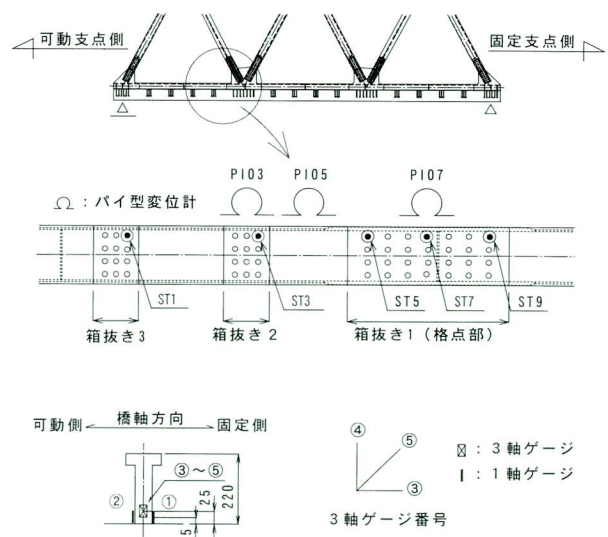


図-9 スタッドの荷重—ひずみ (1軸ゲージ) 関係 (設計荷重載荷時)

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、FEM弾性解析値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、トラス斜材から直接大きな力を受ける格点部においても箱抜きの有無による影響はほとんどみられず、各試験体のPC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。

(4) スタッ드의挙動

1) スタッ드의荷重－ひずみ関係

図-9に設計荷重最大時におけるスタッドの荷重－ひずみ関係を示す。また、終局荷重最大時における各試験体の荷重－ひずみ関係はほぼ同様の挙動となるため、代表して試験体Bの実験結果を図-10に示す。これら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の残留ひずみが最も大きい。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受けられない。
- ②終局荷重載荷時において、各試験体のスタッドとも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、残留ひずみは少なく、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PC床版の付着の影響が認められた。しかし、付着切れ直後にひずみが急増しており、残留ひずみは3試験体の中で最大となった。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

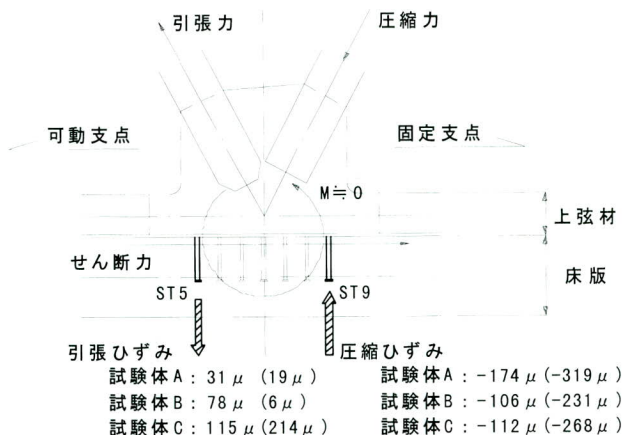


図-11 格点部スタッドの軸方向ひずみ（設計荷重最大時）

られなかった。

2) スタッドに作用する軸力

図-11、12に、設計荷重最大時の格点部スタッドの軸方向ひずみおよび格点部（箱抜き1）のスタッドの終局荷重載荷時における荷重－軸方向ひずみ関係をそれぞれ示す。これより次のことがわかる。

- ①設計荷重最大時に格点部（箱抜き1）のスタッドに発生する軸方向ひずみは115 μ ~ 174 μ と非常に小さく、軸方向応力も許容引張応力度の16%以下である。また終局荷重載荷時においても、スタッドの軸方向応力は基準降伏応力度の14%以下と小さい。
- ②終局荷重載荷において、各試験体とも荷重が2000kN付近でスタッドに生じる軸力が圧縮側から引張側に転じる非線形挙動が見られる。しかし、設計荷重載荷時には線形的な挙動で、FEM弾性解析値とほぼ同様の傾向を示した。

3) 格点部スタッドのせん断力分担特性

設計荷重最大時における各試験体の、スタッドに貼付した3軸ゲージより算出したせん断ひずみの橋軸方向分布を図-13に示す。また、格点部の各ス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を表-5に示す。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、各試験体ともほぼ同様な傾向を示し、FEM弾性解析値とも対応している。また、各スタッドのせん断ひずみがほぼ等しいことから、スタッドの配置本数が多い格点部よりトラス部材から軸力を床版に伝達すると判断される。

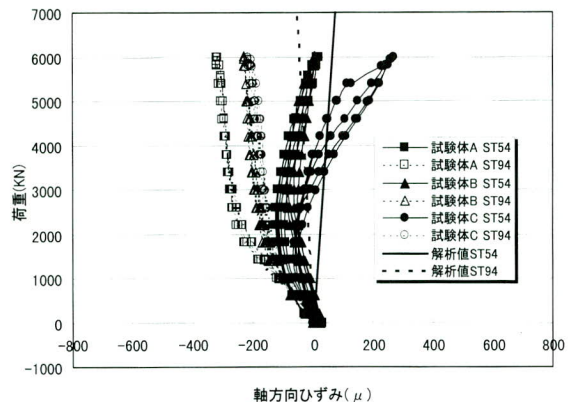
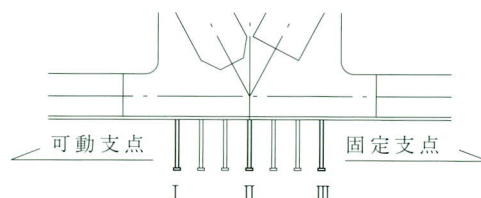


図-12 スタッドの荷重－軸方向ひずみ関係（終局荷重載荷時）

表一五 格点部スタッドにおける曲げひずみ (μ) と分担率

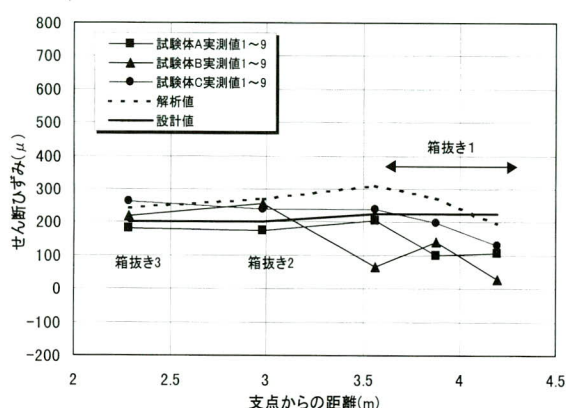
設計荷重	試験体	I	II	III	平均値 ①	最大値 ②	比率 ②/①
		A	460	487	291	450	487
終局荷重	試験体	I	II	III	平均値 ①	最大値 ②	比率 ②/①
		A	733	785	453	721	785
終局荷重	試験体	I	II	III	平均値 ①	最大値 ②	比率 ②/①
		B	666	896	319	761	896
終局荷重	試験体	I	II	III	平均値 ①	最大値 ②	比率 ②/①
		C	717	769	375	694	769



注) 曲げひずみ ϵ_b は次式により計算した.

$$\epsilon_b = (\epsilon_2 - \epsilon_1) / 2$$

ここに、
 ϵ_2 : スタッド1軸ゲージの圧縮ひずみ
 ϵ_1 : スタッド1軸ゲージの引張ひずみ



図一三 スタッドのせん断ひずみの橋軸方向分布 (設計荷重時)

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、設計荷重時で1.08～1.21、終局荷重時で1.09～1.18となる。一方、FEM弾性解析では両者の比率は1.21となり、実験値はFEM弾性解析値とほぼ同じか若干小さい値となる。

(5) 上弦材とPC床版の相対変位および付着の影響

設計荷重実験における各試験体のPC床版と上弦材の荷重-相対変位関係を図一四に、終局荷重実験の実験結果の一例として試験体Bの結果を図一五にそれぞれ示す。これらの実験結果より以下の知見が得られた。

- ① 設計荷重実験におけるPC床版と上弦材の相対変位は、試験体A、B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。これは、格間部 (PI03、PI05) において顕著であり、格点部 (PI07) では見られなかった。付着が切れた荷重は死荷重の40%程度で、付着の切れた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の残留ひずみが生じた。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 設計荷重時におけるPC床版と上弦材の相対変位量は箱抜き部を有する試験体Aが最大、箱抜き部の無い試験体Cが最小となり、箱抜きとゴムパッド敷設の有無によるPC床版と上弦材の一体性に対する影響が認められた。

また、箱抜き部に橋軸直角方向のプレストレスを導入した試験体Bは、試験体Cとほぼ同等の相対変位量となっていることから、プレストレスによる一体性の向上が確認された。

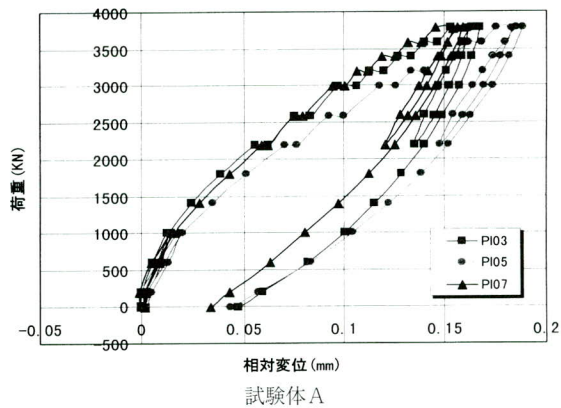
④ 終局荷重実験における各試験体の最大変位はともに0.3mm以下であり、残留相対変位も0.03mm以下とほとんど生じていない。これより、終局荷重時においてもスタッドはずれ止めとして十分な耐力を有していることが確認された。

(6) 上弦材と床版接合部の耐疲労性

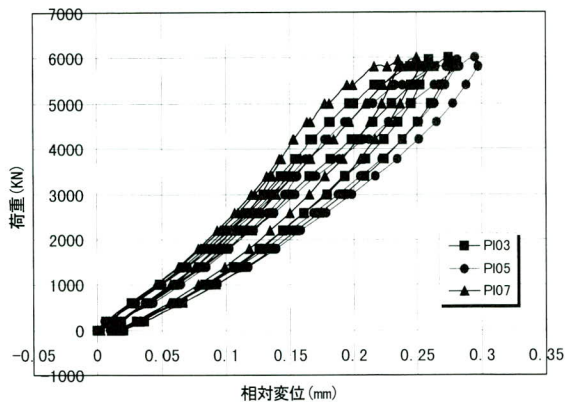
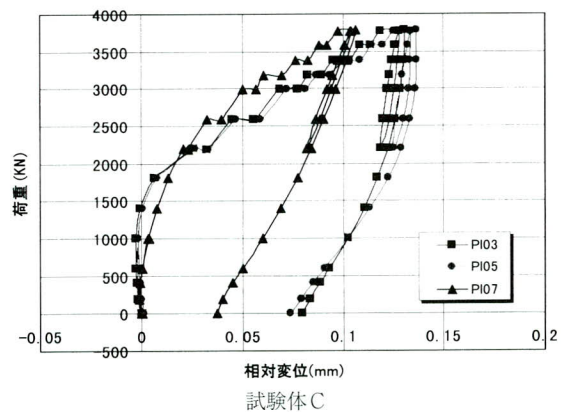
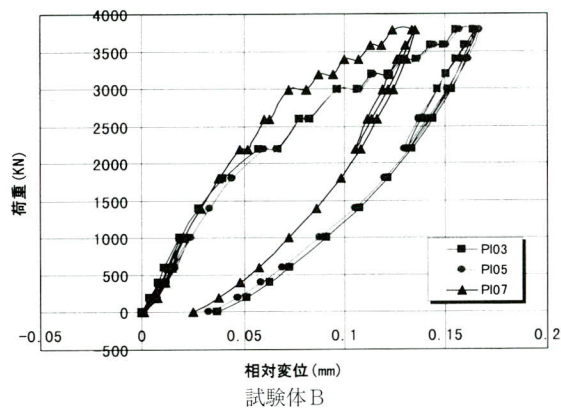
1) 繰り返し載荷に伴うスタッドのひずみおよびPC床版と上弦材間の相対変位の推移

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一六に示す。また、格点部および格間におけるPC床版と上弦材との相対変位振幅の推移の一例として試験体Bの実験結果を図一七に示す。この結果より以下の知見が得られた。

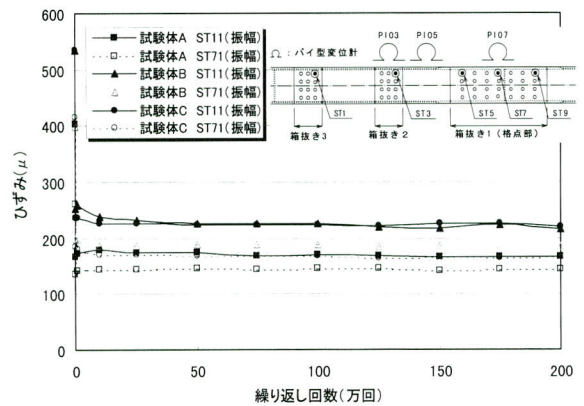
- ① スタッドの軸方向ひずみ振幅については、繰返し回数が0～1000回時に試験体のなじみにより振幅が多少変動しているが、1000回以降の繰返し載荷による振幅の増加は認められない。



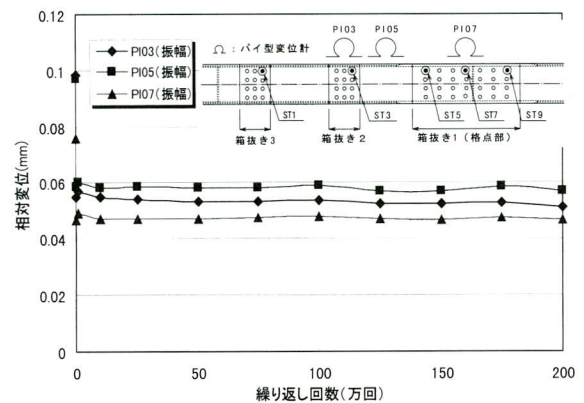
図一四 PC床版と上弦材間の荷重—相対変位関係（設計荷重載荷時）



図一五 PC床版と上弦材間の荷重—相対変位関係（終局荷重載荷時）



図一六 スタッドひずみ振幅の推移



図一七 上弦材とPC床版間相対変位振幅の推移

- ②PC床版と上弦材間の相対変位の振幅は、載荷回数が増加に伴う振幅の増加は認められない。
- ③上記①、②より、設計最大荷重の42%（スタッドのせん断応力度の振幅は60N/mm²）の荷重振幅で200万回繰返し載荷に対しても、全試験体でPC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) 繰返し載荷に伴うスタッドの荷重—ひずみ関係および荷重—PC床版と上弦材間の相対変位関係の推移
 荷重載荷前（0回）、1000回および200万回載荷後のスタッド軸力の荷重—ひずみ関係の推移の一例として試験体Bの格間部の計測点ST4における実験結果を、またPC床版と上弦材間の荷重—相対変位関係の推移例として試験体BのPI05の実験結果をそれぞれ図一18、19に示す。

図より、スタッドの荷重—ひずみ関係および荷重—相対変位関係は、いずれの試験体とも処女載荷時を除いて載荷時、除荷時の挙動が載荷回数に係わりなく類似している。また、残留ひずみが生じるのは処女載荷のみであり、それ以降は残留ひずみがほとんど生じていない。したがって、載荷回数の増加に伴って荷重載荷前のスタッド

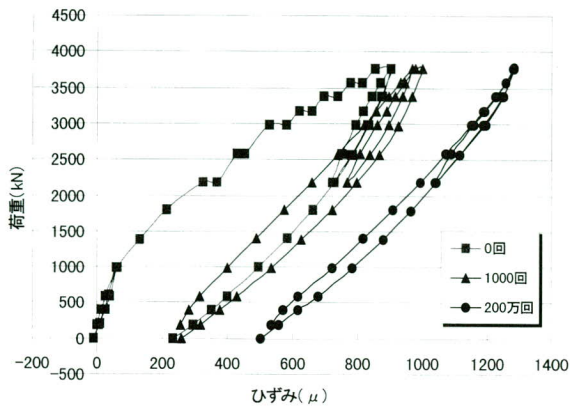


図-18 スタッドの荷重—ひずみ関係の推移

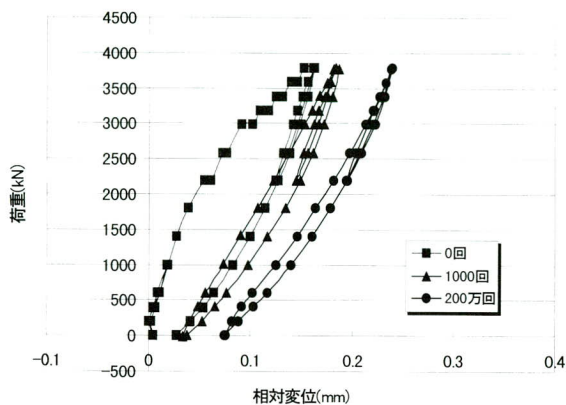


図-19 上弦材とPC床版間の荷重—相対変位関係の推移

ドの軸方向ひずみや相対変位は多少増加するが、接合部の剛性には影響を及ぼさないことがわかる。

(7) PC床版のひび割れ

1) ひび割れ状況

①設計荷重載荷実験

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、PC部材に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一

表一 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	
設計荷重載荷実験	小計	0.91	0.18	0.86	0.03	—
	合計	1.09		0.89		0.03
疲労実験	小計	1.53	0.24	1.26	0.04	—
	合計	1.77		1.30		0.90
終局荷重載荷実験	小計	1.73	0.59	1.68	0.58	—
	合計	2.32		2.26		1.84

6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疲労実験

中間格点部（箱1、7）内のひび割れは、試験体Aでは設計荷重載荷実験時に目視で確認されたが、試験体Bでは設計荷重載荷実験時ではなく疲労実験中に確認された。試験体Cは、中間格点部（箱1、7）から張出し部に至るまで多数の幅0.03mm未満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のみ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、構造中心線における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。

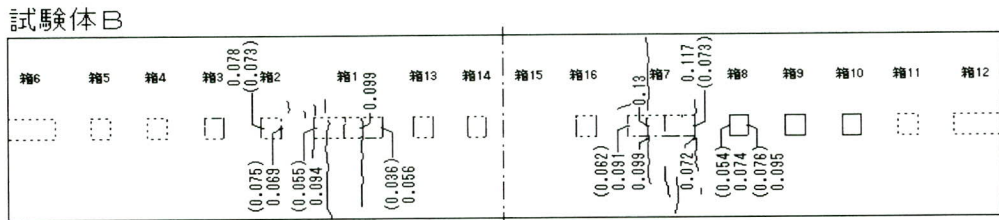
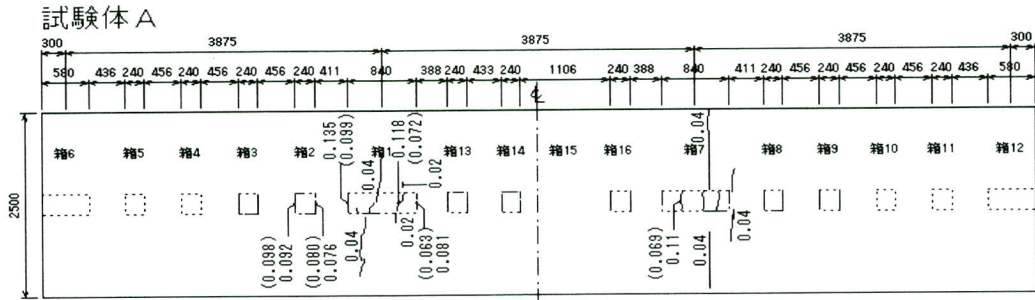
③終局荷重載荷実験

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、最大荷重(6000kN)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では疲労実験時に発生していた微細ひび割れの一部分が、最大荷重時に幅0.1~0.2mmまで広がった。

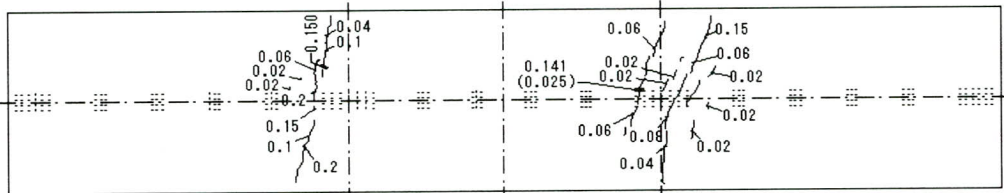
また、全実験を通じて、床版上面の構造中心線沿いのひび割れ幅の合計値は、RCである箱抜き部を有する試験体A、Bの方が試験体Cより大きかった。なお、いずれの試験体のひび割れも除荷に伴いほとんど閉じ、除荷後の残留ひび割れ幅はほぼ0となった。

2) ひび割れ抑制

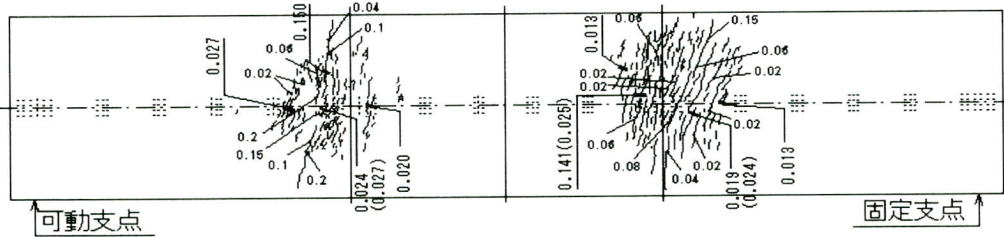
箱抜き部コンクリートに横締めプレストレスを与えた試験体Bは、与えていない試験体Aに比べ、横締めプレストレス導入方向とは平行な打継目におけるひび割れ発生荷重が大きく、ひび割れ幅が小さかった(図-21参照)。これはポアソン比の影響や、箱抜き部と一般部とのせん断伝達性の向上による影響等が考えられ、横締めプレストレスの導入は、その箇所のひび割れ制御に効果がある



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：終局荷重載荷試験時の最大ひび割れ幅 (mm)

()は疲労試験200万回終了時の最大荷重時におけるひび割れ幅(mm)

図-20 終局荷重載荷実験における最終ひび割れ状況

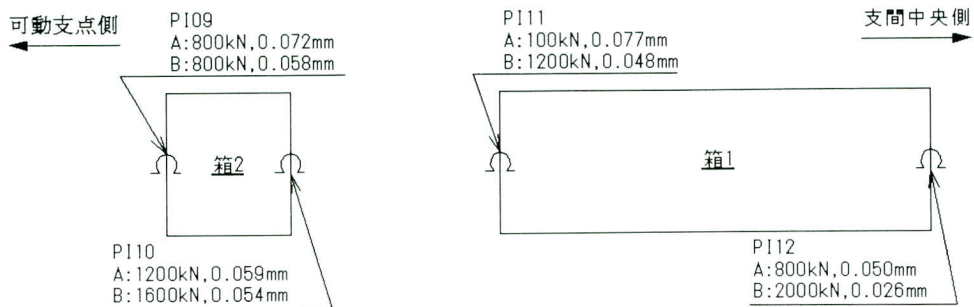


図-21 箱1,2におけるひび割れ発生荷重および設計荷重載荷時のひび割れ幅

と判断される。

3) ひび割れ発生後の曲げ挙動

図-22に設計荷重載荷時における鉄筋ひずみの横断面方向分布を示す。

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断面で、力の釣り合いがとられており、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。

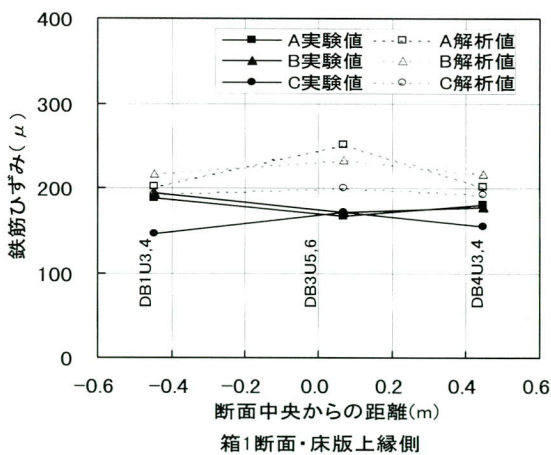
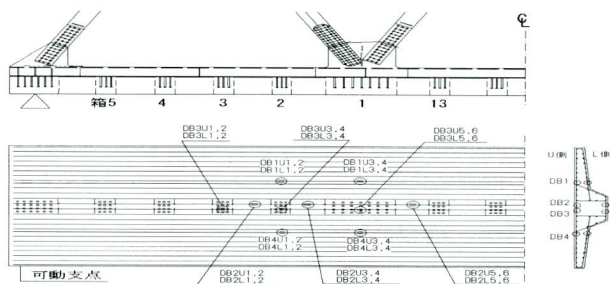


図-22 設計荷重載荷時における鉄筋の横断面方向ひずみ分布

(8) PC床版の耐疲労性

各試験体とも200万回の繰り返し載荷において、箱抜き部および一般部におけるコンクリート、鉄筋、PC鋼材のひずみ振幅は一定であり、疲労荷重に対して安全であ

ることが確認された。

図-23に試験体A、Bの中間格点部（箱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、200万回載荷後のひび割れ幅の増加量は0.02mm以下となっている。また、そのときの鉄筋ひずみの増加量は129~136 μ であり、ひび割れ幅の検討を省略できる場合の制限値(670 μ)以内であり、耐久性に關与する鋼材の腐食に対しても安全であることが確認された。

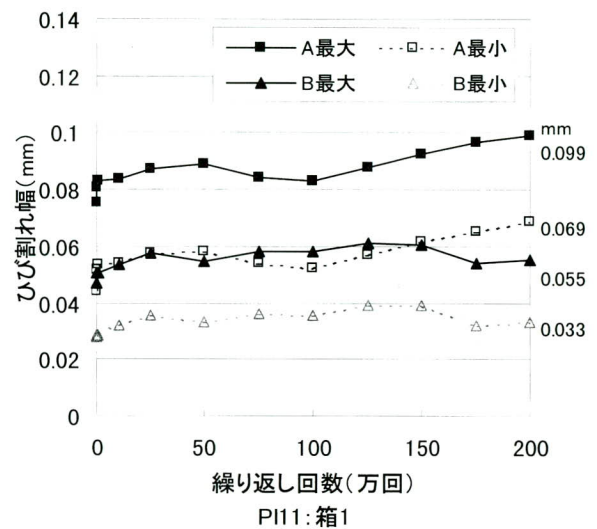


図-23 ひび割れ幅の推移

(9) 終局荷重載荷時におけるPC床版箱抜き部の一体性

1) 一体性

図-24に終局荷重載荷実験における床版張出し部上縁における荷重-コンクリートひずみ関係を示す。

試験体AおよびBの張出し部上縁(C17U)では、5400kN~5800kNおよび5000~5400kN時にひび割れが発生していると考えられる。このように、一般部のひび割れ発生は試験体Aより試験体Bの方が早かった。この原因は、箱抜き部打継目のひび割れの程度と関連付けて考えられる。即ち、試験体AとBを比較したとき、箱抜き部打継目のひび割れ幅の小さかった試験体Bは、箱抜き部と一般部の一体性が良く、力の伝達性が良い結果、ひび割れ発生が早まったものと考えられる。

2) セン断伝達性能

図-20より、終局荷重載荷時に試験体A、Bでは、箱

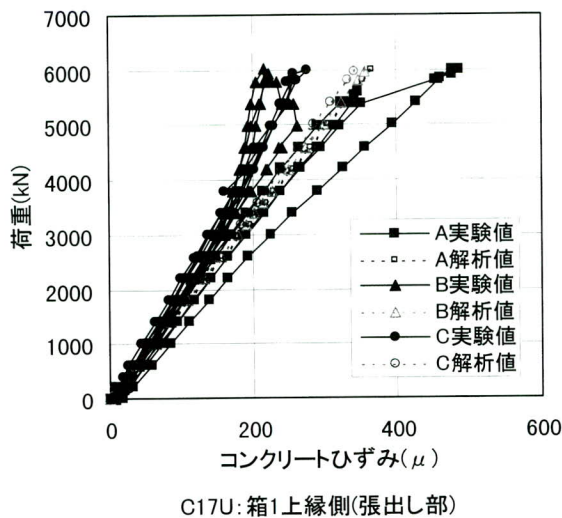


図-24 荷重—コンクリートひずみ関係

抜き部のせん断面の打継目において顕著なひび割れは生じず、即ち、せん断による滑りは見られず、せん断伝達性能は保持されていた。これより、箱抜き部のせん断面の打継目において設計せん断伝達耐力式を満足するように配置した橋軸直角方向鉄筋の量は、安全性を与えるものであることを確認した。

(10) PC床版内部観察結果

終局荷重載荷実験終了後、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。

図-25に箱1および箱2位置におけるスタッドの2列目と4列目の切断面に挟まれた部分の2列目側内部ひび割れ状況を示す。

【試験体A、B】

a) 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、スタッドジベルの頭部に到達したものであった。

b) 箱抜き打継目のひび割れ

箱抜き打継目には付着切れと思われるひび割れが生じていた。ただし、(8)で述べたように、打継目におけるひび割れの程度は、部材の耐久性に悪影響を及ぼものではない。しかし、安全をみてその箇所には橋面防水工等、耐久性向上の処置を施す。

【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

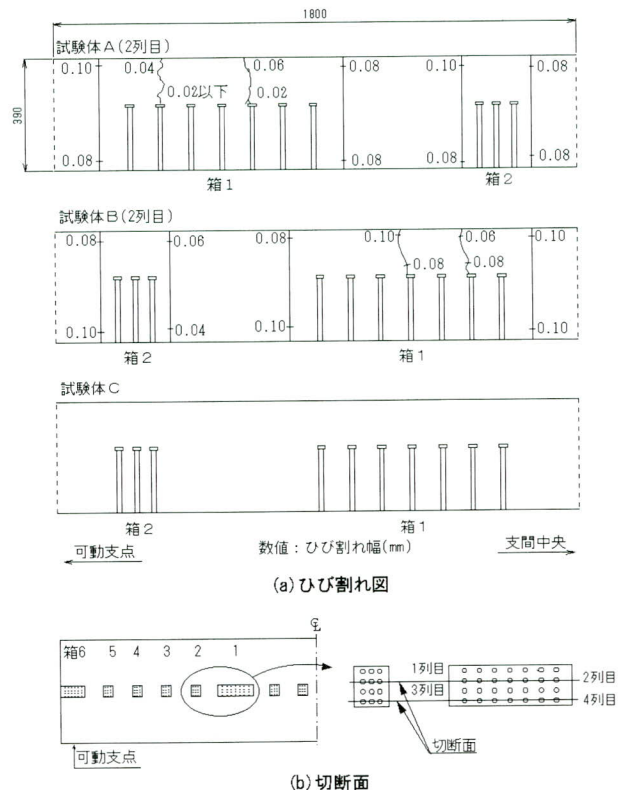


図-25 箱1,2における内部ひび割れ状況

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、顕微鏡を使用したスタッド周辺の試験体内部観察より、以下の知見が得られた。

- ①一般にスタッドの耐力は、スタッド自身の降伏および周辺コンクリートの支圧限界により決定されるが、各試験体の終局荷重載荷後の内部観察では、スタッド基部のコンクリートに特に変状は認められず、コンクリートはスタッドからの支圧に対して十分な耐力を有していたと考えられる。
- ②スタッドと周辺コンクリートとの境界についても特に損傷は無く、またスタッド自身の残留変形や溶接部の亀裂等の損傷は見受けられなかった。したがって、スタッドは疲労荷重および終局荷重に対して十分な耐力を有していることが確認された。

5. まとめ

本実験では、スタッドを用いてトラス上弦材と場所打ちPC床版を合成した複合トラスである椿原橋の縮小部分モデルを用いて、設計における終局荷重までの静的載荷

および200万回の繰り返し載荷実験を行った。本実験結果より、上弦材とコンクリート床版の接合部は十分な耐疲労性、耐荷力を有していることが確認された。さらに、本橋で採用した有効プレストレスを高めるための施工方法の効果についても確認された。

本実験より得られた知見をまとめて以下に示す。

- 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、床版はゴムパッド上を滑るため、床版の橋軸方向プレストレス時に鋼部材の抵抗により有効プレストレスが低下する現象をほぼ防ぐことが可能となる。
- ②本橋で採用した上弦材と場所打ちPC床版の接合構造は、スタッドのひずみ、上弦材と床版の相対変位、ひび割れ幅の計測結果および床版内部観察結果から、設計における終局荷重および疲労荷重に対して十分な耐力を有していることが確認された。さらに、終局荷重においても、構造全体としてはほぼ線形的な挙動を示していた。
- ③試験体A、Bは、比較のための試験体Cよりひび割れ発生荷重は小さかったが、ひび割れ幅は構造物として問題ない程度であり、それぞれ同等の耐荷力を有していると考えられる。
- ④箱抜き部に対する橋軸直角方向プレストレス時期を変化させた試験体A、Bの比較では、橋軸直角方向にプレストレスされた試験体Bは一般部と箱抜き部の一体性が高まることが確認された。さらに、箱抜き部の橋軸直角方向プレストレスが、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。
- ⑤トラス部材から床版への軸力伝達は、主に格点部のスタッドのせん断力により行われる。また、この格点部に配置したスタッドに作用するせん断力の分担率（最大せん断力／平均せん断力）は1.2倍程度であった。最後に、本実験結果より得られた知見を、椿原橋におけるトラス上弦材と場所打ちPC床版の接合部の設計・施工に活用する。

6. おわりに

本実験は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頂きました。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頂きました。最後に本実験は、「東海北陸自動車道 椿原橋（鋼上部工）工事共同企業体」の受注工事の一環として実施されたものであり、実験実施にあたり、日本道路公団中部支社および清見工事事務所の方々には多大なるご指導を賜ったほか、設計部会、施工部会、ならびに実験部会の関係各位にはご尽力を頂きました。ここに、謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 三輪寛, 長澤徹, 依田照彦, 鈴木俊光, 熊谷洋司: ガセットプレートとスタッドを用いた複合トラス橋の格点構造に関する実験的研究, 構造工学論文集, Vol.44A, pp.1475~1484, 1998. 3
- 2) 日本鋼構造協会: 頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)とスタッドに関する研究の現状, 1996
- 3) 水口和之, 小松秀樹, 小野辺良一, 宮地崇, 松野進: プレキャストPC床版用スタッドの強度特性に関する実験的検討一員弁川橋一, 土木学会第54回年次学術講演会, I-A156, pp.312~313, 1999. 3
- 4) (社)土木学会: コンクリート標準示方書 [平成8年制定] 設計編, 1996. 3

2001. 11. 27 受付