

鋼・コンクリート合成床版を適用したプレストレスしない 連続合成げたの中間支点部の静的載荷試験

Static loading test of non-prestressed continuous composite girders with steel plate-concrete composite deck

街道 浩*, 渡辺 滉**, 橋 吉宏***, 松井繁之****, 栗田章光*****

Hiroshi KAIDO, Hiroshi WATANABE, Yoshihiro TACHIBANA, Shigeyuki MATSUI, Akimitsu KURITA

* 工修 川田工業(株)橋梁事業部大阪技術部 (〒550-0014 大阪市西区北堀江 1-22-19)

** 川田工業(株)橋梁事業部 (〒114-8562 東京都北区滝野川 1-3-11)

*** 博士(工学) 川田工業(株)橋梁事業部技術開発部 (〒114-8562 東京都北区滝野川 1-3-11)

**** 工博 大阪大学大学院教授, 工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

***** 工博 大阪工業大学教授, 工学部都市デザイン工学科 (〒535-8585 大阪市旭区大宮 5-16-1)

A steel plate-concrete composite deck was developed based on the studies from 1986. The composite deck consists of the steel-plate, upper re-bars and concrete. The steel-plate is stiffened with steel strips in the transverse direction of the bridge and is welded shear studs on the upper side. Various tests have been conducted on the composite deck; however, these were mainly to consider its action as a deck, but not its action as part of a main girder. Therefore, assuming the composite deck to be applied to non-prestressed continuous composite girders, static loading tests were conducted on its mid-supporting point area, to study the behaviors acting as part of the main girder. Specific points to be considered were influences of re-bars, shear studs and steel plates upon concrete crack conditions, and the contribution of concrete, re-bars and steel plates to the main girder stiffness and strain transmission.

Key Words: steel plate-concrete composite deck, RC slab, continuous composite girder, static loading test

キーワード: 鋼・コンクリート合成床版, RC床版, 連続合成げた, 静的載荷試験

1. はじめに

従来, 鋼・コンクリート合成床版(以下, 合成床版と略す)は, 鋼製型枠としてのけた下空間の安全性の確保, プレファブ化による現場工期の短縮, 床版厚の低減による死荷重の軽減などを目的として開発されてきたものである。近年, 各種の輪荷重走行試験により合成床版の高い耐荷力および疲労耐久性が確認されたことや種々の機関において長支間床版への適用に関する研究が行われたことにより, 床版が重要な構造要素となる鋼2主げた橋, 鋼少数主げた橋, 開断面箱げた橋などに合成床版が積極的に採用されるに至っている。著者らは, このような合成床版のうち, 図-1に示すロビンソン型の合成床版を対象として, 各種の静的載荷試験, 輪荷重走行試験および施工試験などを実施し, 合成床版の挙動の把握, 設計手法の確立および実橋への適用を推進してきた^{1), 2)}。

しかしながら, これまでに実施した合成床版に関する試験は, 床版単独の挙動に着目した検討を目的としたものであり, 主げたの一部として挙動する床版に着目したもので

はない。本研究は, 合成床版を連続合成げたに適用した場合の挙動を明らかにすることを目的としたものであり, 合成床版と鋼げたとを一体化した試験体を製作し, 床版部分に主げたの一部として挙動する場合の応力状態を発生させて, 合成床版の各種性状を確認するものである。本研究における具体的な着目点は, コンクリートのひびわれ性状およびひびわれ幅の把握, ならびに主げたの剛性およびひ

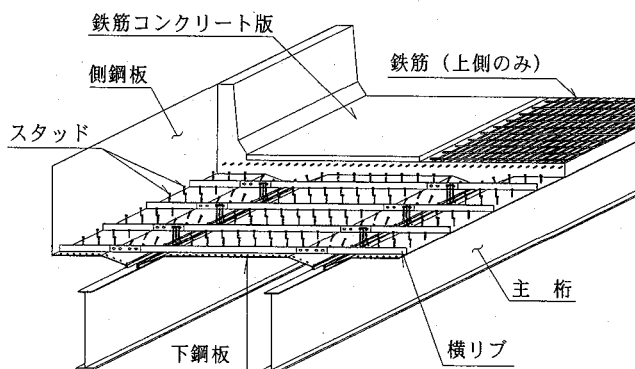


図-1 ロビンソン型合成床版の概念図

ずみの伝達への下鋼板・配力鉄筋の寄与の確認である。さらに、コンクリートのひびわれ幅の推定式についても検討を行うものである。

なお、主げたが正の曲げモーメントを受ける領域については、床版部分に圧縮力が作用することから、合成床版を構成するコンクリートおよび鋼部材が有効に働くことが容易に想像できる。一方、主げたが負の曲げモーメントを受ける領域については、床版部分に引張力が作用し、その挙動が複雑であると考えられることから、本研究においては主げたが負の曲げモーメントを受ける領域の挙動について検討するものとした。また、連続合成げたには橋軸方向に緊張材を用いてプレストレスを導入するものと導入しないものがあるが、合成床版においては導入したプレストレスが構成要素であるコンクリートおよび鋼部材にどのような影響を及ぼすかが明らかでないことから、本研究ではプレストレスを導入しない連続合成げたを対象とするものとした。

2. 試験体および載荷方法

2.1 試験体の構造諸元

試験体は支持げたの中心間隔である床版の支間長を2.0mとして設計した実物大の模型であり、全長6600mm・高さ641mmの鋼げたに、コンクリート版厚150mm・下鋼板厚9mm・幅員1200mmの床版を鋼げたの上フランジ上のスタッドを介して結合したものである。なお、試験体の床版部のコンクリートには、設計基準強度 $\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$ のコンクリートを適用している。試験体の断面図および鉄筋配置を除く構造諸元を、それぞれ図-2、表-1に示す。

2.2 試験体の種類

試験体の種類は表-2に示す通りであり、合成床版についてはコンクリートの面積に対する配力鉄筋の面積の比率（以下、配力鉄筋比と略す）が0.5%、1.1%、1.5%の普通コンクリートを適用した3体の試験体および配力鉄筋比が1.5%の膨張コンクリートを適用した試験体を1体製作した。なお、対象とする合成床版の場合、下鋼板が下側の主鉄筋および配力鉄筋の役割を果たすことから鉄筋を上側にしか配置していないため、上記の配力鉄筋比は上側の配力鉄筋の比率を示したものである。また、膨張コンクリートについては、膨張材を 30kg/m^3 添加したものである。

さらに、合成床版の試験結果を評価するための基準試験体として、道路橋示方書³⁾のコンクリート床版を有するけた構造の章に規定される最小鉄筋量にほぼ等しい配力鉄筋比2.2%のRC床版の試験体を1体製作した。この試験体の床版厚は合成床版試験体のコンクリート版厚に合せて150mmとした。なお、配力鉄筋比は上側および下側の配力鉄筋を合計した比率である。

2.3 載荷要領

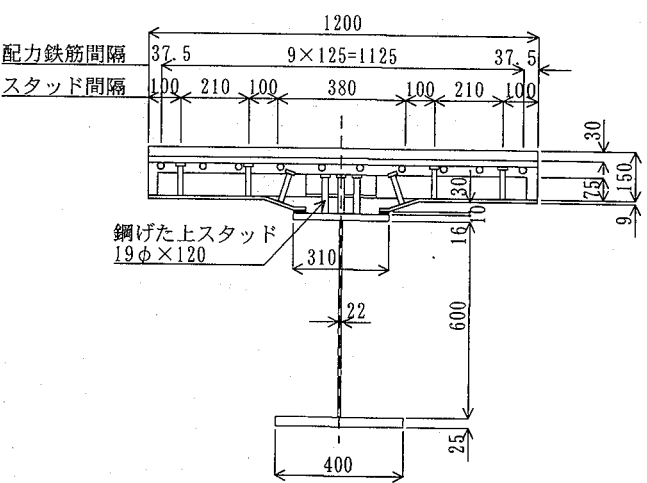


図-2 合成床版試験体の断面図

表-1 合成床版試験体の構造諸元

				単位	構造諸元
床版	コンクリート	版厚	mm		150
		設計基準強度	N/mm ²		30
	鋼板	板厚	mm		9
		断面	mm		75×9
	スタッド	橋軸方向間隔	mm		750
		寸法	mm		φ16×100
鋼げた	上フランジ	橋軸方向間隔	mm		250
		橋軸直角方向間隔	mm		210
	ウェブ	断面	mm		310×16
		寸法	mm		600×22
	下フランジ	断面	mm		400×25
		寸法	mm		φ19×120
鋼げた	スタッド	橋軸方向間隔	mm		150
		橋軸直角方向間隔	mm		50

表-2 各試験体の鉄筋配置

		主鉄筋(mm)		配力鉄筋(mm)		配力鉄筋比(%)
		呼び	間隔	呼び	間隔	
合成床版	配力鉄筋比小	D19	125	D13	175	0.5
	" 中	D19	125	D16	125	1.1
	" 大	D19	125	D16	85	1.5
	膨張コンクリート	D19	125	D16	85	1.5
RC床版		D19	125	D16	125	2.2*

*上側および下側配力鉄筋の合計を示す。

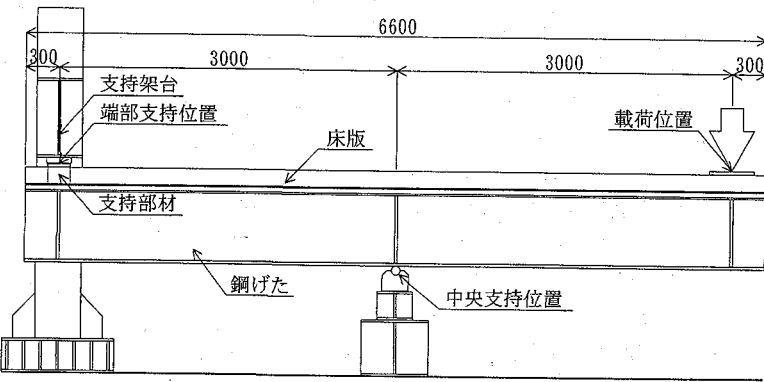


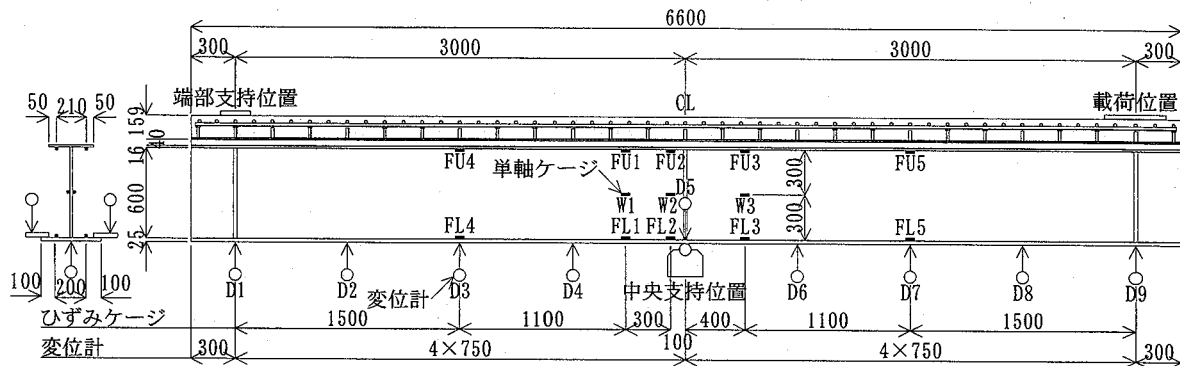
図-3 載荷要領図

試験体の荷重要領は図-3に示す通りであり、試験体の中央において下フランジ下面を支持し、一方の端部において上フランジに溶接した鋼製の支持部材を支持している。荷重は支持しないもう一方の端部に載荷し、試験体全体に負の曲げモーメントを発生させるものである。なお、上記の支持部材は床版を貫通しているが、床版の挙動を拘束することがないように周囲に発泡スチロールを巻き付けている。また、支持架台と支持部材の間には球面座金を挿入し、試験体の回転変形を拘束しないように配慮している。

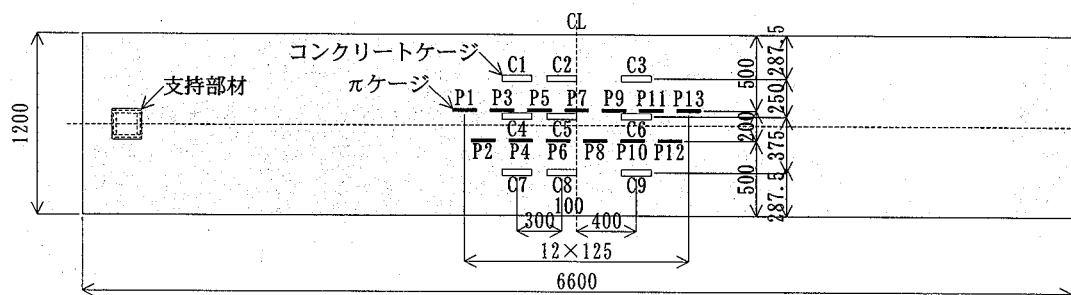
2.4 測定項目

荷重試験における測定項目は、主げたの変位、鋼げたの上下フランジおよびウェブのひずみ、コンクリート上面のひびわれ幅およびひずみ、配力鉄筋のひずみ、下鋼板下面ないしRC床版下面のひずみである。

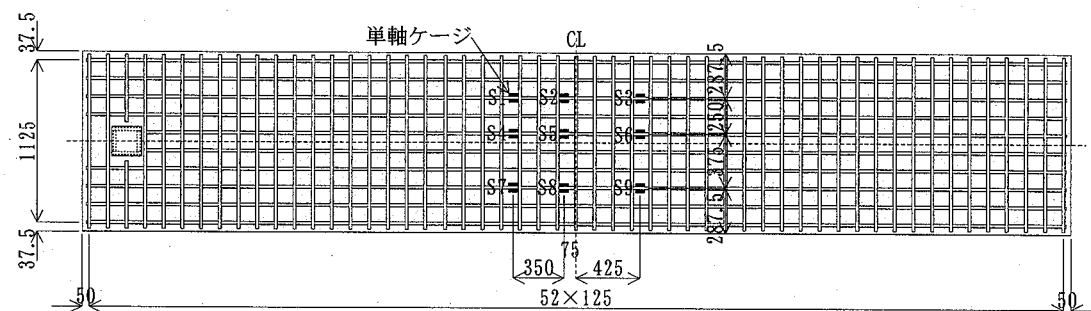
図-4に示すように、鋼げたの下フランジには750mm間隔で変位計を配置し、鋼げたの上下フランジおよびウェブには試験体中央付近に一軸ゲージを貼付している。また、



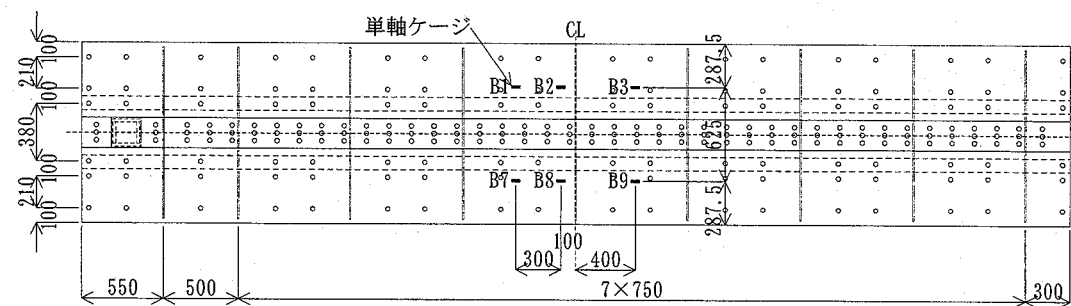
(a)試験体側面図：鋼げたひずみゲージ・変位計配置



(b)床版上面図：πゲージ・コンクリートゲージ配置



(c)床版配筋図：配力鉄筋ひずみゲージ配置



(d)床版下面図：下鋼板ひずみゲージ（合成床版試験体）・コンクリートゲージ（RC床版試験体）配置

図-4 試験体詳細図および測定位置図

コンクリート上面にはひびわれ幅測定用のπゲージおよびコンクリートゲージを、配力鉄筋および下鋼板には一軸ゲージを試験体中央付近に貼付している。なお、配力鉄筋の一軸ゲージについては、測定位置において鉄筋の2本のリブを平坦に削り両面に貼付した。コンクリート上面のπゲージおよびコンクリートゲージの取付け状況を写真-1に示す。

2.5 設計荷重および載荷荷重

載荷試験を行うに際して、試験結果を評価するための応力状態の設定が必要である。特に、コンクリートのひびわれ性状は配力鉄筋に発生する応力度と密接な関係があることが知られていることから、評価の基準となる配力鉄筋の応力度を規定しなければならない。

一般に、道路橋示方書³⁾に示される荷重条件にしたがって連続合成げたの設計を行った場合、設計条件に大きな偏りがない限り、配力鉄筋の応力度は 100N/mm^2 程度となる。したがって、ここでは配力鉄筋の応力度が 100N/mm^2 となる状態に対応する載荷荷重を設計荷重と規定し、以下に示す試験結果の評価の基準とすることにする。さらに、配力鉄筋の許容応力度が 140N/mm^2 であることを考慮し、載荷において基準となる応力状態を、コンクリートのひびわれ発生、配力鉄筋の応力度が許容応力度の $1/2$ である 70N/mm^2 、設計応力度である 100N/mm^2 、許容応力度である 140N/mm^2 、設計応力度の3倍である 300N/mm^2 とした。

載荷荷重については表-3に示す通りであり、まず無載荷の状態から計算上床版のコンクリートにひびわれが発生する状態まで荷重を増加させ、この状態から20kNまで除荷する載荷を5回繰り返す。次に、20kNから配力鉄筋の応力度が計算上 70N/mm^2 となる状態まで荷重を増加させ、この状態から20kNまで除荷する載荷を5回繰り返す。同様に、配力鉄筋の応力度が計算上 100N/mm^2 および 140N/mm^2 の場合の載荷を行う。最後に、20kNから配力鉄筋の応力度が計算上 300N/mm^2 となる状態まで荷重を増加させ、この状態から20kNまで除荷する。

なお、表-3の載荷荷重については、試験体ごとに各応力状態に対応する載荷荷重を算出し、そのうちの最大の値を載荷荷重として全試験体に適用したものである。また、配力鉄筋の応力度が 140N/mm^2 になるまでの各載荷段階において、載荷を5回繰り返しているのは、発生したひびわれの幅を安定させることを目的としたものである。試験装置および試験体の状況写真を写真-2に示す。

3. 材料試験結果

3.1 コンクリートの材料特性

試験体の床版部に用いたコンクリートの設計基準強度は $\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$ であり、合成床版の膨張コンクリートを適用した試験体以外はすべて普通コンクリートを適用している。コンクリートの配合については表-4に示す通りである。

試験体と同一の条件のもとで養生を行ったコンクリー

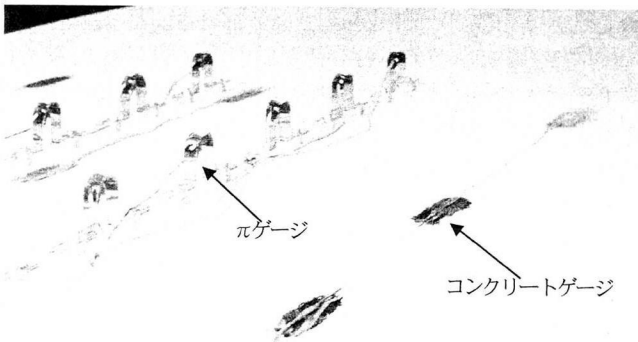


写真-1 πゲージおよびコンクリートゲージの取付け状況

表-3 載荷荷重

載荷荷重	繰返し回数	対応する応力状態
0kN → 118kN → 20kN	5	ひびわれ発生
20kN → 157kN → 20kN	5	配力鉄筋応力度 70N/mm^2
20kN → 235kN → 20kN	5	" 100N/mm^2
20kN → 294kN → 20kN	5	" 140N/mm^2
20kN → 608kN → 20kN	1	" 300N/mm^2

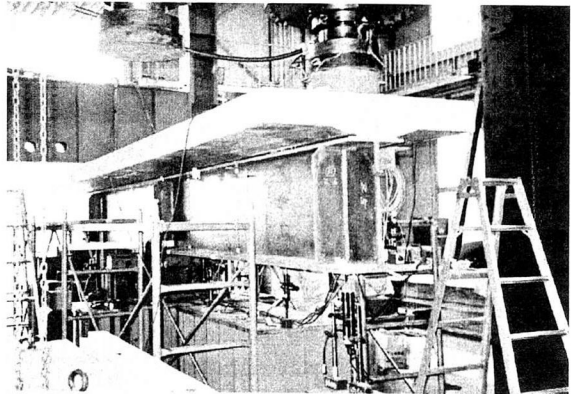


写真-2 試験装置および試験体

表-4 コンクリートの配合

(a)配合の設計条件

	呼び強度	粗骨材の最大寸法	スランプ	水セメント比	空気量	細骨材率
全試験体共通	30N/mm^2	25mm	15cm	57.2%	4.5%	44.8%

(b)配合表

	単位量 kg/m^3					
	水	セメント	膨張材	細骨材	粗骨材	AE減水剤
普通コンクリート	162	283	—	816	1017	1.132
膨張コンクリート	162	253	30	816	1017	1.132

表-5 コンクリートの材料試験結果

		材齢	圧縮強度 N/mm^2	静弾性係数 $\times 10^4 \text{N/mm}^2$	ポアソン比	引張強度 N/mm^2
合成床版	配力鉄筋比小	33日	32.2	2.54	0.200	2.17
	" 中	28日	30.7	2.50	0.190	2.49
	" 大	30日	30.4	2.66	0.170	2.64
	膨張コンクリート	35日	32.8	2.67	0.180	2.55
	RC床版	59日	37.1	2.63	0.200	2.87

トの供試体の材料試験結果を表-5に示す。材料試験は各試験体の載荷試験当日に実施したものである。材料試験結果のうち、圧縮強度についてはRC床版の試験体がやや大きい値を示すものの、ほぼ設計基準強度と同等の値を示している。RC床版の試験体については、他の試験体に比較し載荷試験日の材齢が高いことが圧縮強度の大きい理由であると考えられる。また、静弾性係数については道路橋示方書³⁾に規定されている設計基準強度が $\sigma_{ck}=30\text{N/mm}^2$ の場合の静弾性係数 $2.8\times 10^4\text{N/mm}^2$ との差が平均で7%程度である。なお、標準養生を行ったコンクリートの供試体の材齢28日における圧縮強度の平均値は、普通コンクリートで 32.2N/mm^2 、膨張コンクリートで 34.0N/mm^2 であり、設計基準強度におおむね等しい値を示している。

以上の結果から、試験体に用いたコンクリートが所定の材料特性を有することが確認できた。

3.2 鋼材の材料特性

試験体の床版部に用いた材質SD345の異形鉄筋および合成床版の下鋼板に用いた材質SS400の鋼板の引張強度試験結果を表-6に示す。

引張強度試験結果のうち、異形鉄筋については公称降伏点応力 $345\sim 440\text{N/mm}^2$ 、公称引張強さ 490N/mm^2 以上を満足している。また、鋼板については公称降伏点応力が 245N/mm^2 以上、公称引張強さが $400\sim 510\text{N/mm}^2$ を満足している。

以上の結果から、試験体に用いた鋼材が所定の材料特性を有することが確認できた。なお、鋼げたに使用した各鋼板については、ミルシートに記載されている引張強度試験結果により材料特性が公称値を満足することを確認した。

4. 立体FEM解析

載荷試験の測定結果と比較することを目的として、各試験体の立体FEM解析を行った。以下にFEM解析の解析モデルおよび床版部の換算版厚の算出方法について述べる。

4.1 解析モデル

解析モデルの要素構成は図-5に示す通りであり、床版および鋼げたは、等方性の薄板要素でモデル化し、床版については後述する換算版厚を、鋼げたについては上下フランジおよびウェブを構成する各鋼板の板厚を与えた。床版と鋼げたは、剛性を無限大とした骨組み要素によりモデル化した結合部材によって、両者が完全に一体化して挙動するように結合した。結合部材の配置は、橋軸方向については150mm間隔、橋軸直角方向については50mm間隔に配置した。

図-6に解析モデルの全体構造を示す。解析モデルの拘束条件は中央支持位置において鉛直方向・橋軸直角方向を、端部支持範囲において鉛直方向・橋軸方向・橋軸直角方向をそれぞれ固定とし、荷重条件は荷重載荷範囲に分布荷重として100kNを載荷した。

表-6 鋼材の引張強度試験結果

番号	異形鉄筋				下鋼板			
	D16		D19		鋼板		横リブ	
	降伏点 応力	引張 強さ	降伏点 応力	引張 強さ	降伏点 応力	引張 強さ	降伏点 応力	引張 強さ
1	395	594	349	560	288	442	294	444
2	406	598	353	561	279	427	301	442
3	400	595	356	566	278	427	292	445
平均値	400	596	353	562	282	432	296	444

単位：N/mm²

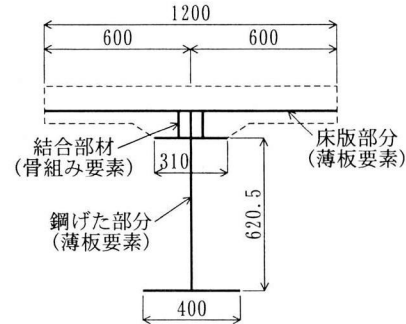


図-5 解析モデルの要素構成（試験体断面を示す。）

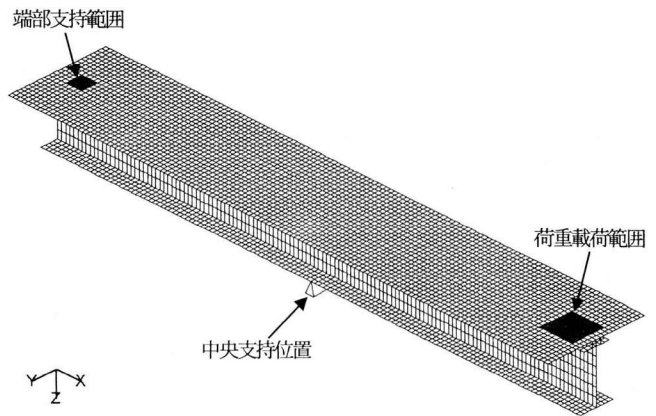


図-6 解析モデルの全体構造

表-7 各試験体の床版の換算版厚

	合成床版				RC床版
	配力鉄筋比小	配力鉄筋比中	配力鉄筋比大	膨張 コンクリート	
全断面有効時	229.2	236.6	241.9	241.9	195.7
コンクリート断面無視*	65.9	73.2	78.5	78.5	—
コンクリート下鋼板断面無視**	5.9	13.2	18.5	18.5	26.5

単位：mm

* 鋼げた・配力鉄筋・下鋼板が有効

** 鋼げた・配力鉄筋が有効

4.2 床版部の換算版厚

床版を薄板要素によりモデル化する際の各試験体の換算版厚を表-7に示す。表中の換算版厚は、すべてコンクリートに換算した値である。換算版厚は、床版の全断面を有効とした場合、コンクリートの断面を無視し配力鉄筋および下鋼板の断面を有効とした場合、さらにコンクリートおよび下鋼板の断面を無視し配力鉄筋の断面を有効とし

た場合について算出した。

なお、換算版厚の算出にあたっては、コンクリートの材料試験結果にもとづくとともに、慣用的な値を考慮に入れて、ヤング係数比については $n=8$ とし、ポアソン比については $\nu=0.2$ に設定した。表-7に示すそれぞれのケースについて弾性FEM解析を実施した。

5. 試験体の剛性の評価

載荷試験における測定結果のうち、試験体の剛性を表す載荷荷重と荷重載荷位置直下のたわみとの関係を以下に示す。図中には、FEM解析により求めた全断面有効時、コンクリート断面無視時、コンクリート・下鋼板断面無視時の剛性および配力鉄筋応力度が設計応力度程度の 100N/mm^2 となる設計荷重を同時に示す。また、図中のたわみについては鉛直方向の上方への変位を正としている。

なお、測定結果の表現方法については、図-7に示すように載荷初期の状態からコンクリートにひびわれが発生するまでは載荷時の傾きを記入し、ひびわれが発生した後はひびわれ幅が安定した状態における試験体の剛性を評価するために各載荷段階における最終の除荷時の傾きを求め、それらを連続的に表したものである。

5.1 合成床版試験体の試験結果

図-8および図-9に、それぞれ配力鉄筋比小試験体、配力鉄筋比大試験体の載荷にともなう剛性の変化を示す。配力鉄筋比小試験体の剛性の測定結果は、載荷初期において全断面有効時の解析値に等しく、コンクリートにひびわれが発生した以降は剛性が徐々に低下し、コンクリート断面無視時の解析値とほぼ平行となっている。

一方、配力鉄筋比大試験体の剛性の測定結果は、載荷初期において全断面有効時の解析値よりもやや小さい値を示すものの、載荷荷重が大きくなるにつれて配力鉄筋比小試験体と同様に剛性が低下し、コンクリート断面無視時の解析値とほぼ平行となっている。

上記の結果から、配力鉄筋比が0.5%および1.5%の試験体において、鋼げたの断面に加え配力鉄筋および下鋼板の断面が試験体の剛性に有効に働いていることがわかる。なお、試験体の剛性については、他の合成床版の試験体も同様の傾向を示す。

5.2 RC床版試験体の試験結果

図-10にRC床版試験体の載荷にともなう剛性の変化を示す。剛性の変化の傾向は合成床版と同様であり、剛性の測定結果は載荷初期において全断面有効時の解析値に等しく、コンクリートにひびわれが発生した以降は剛性が徐々に低下し、コンクリート断面無視時の解析値とほぼ平行となっている。したがって、RC床版試験体については、鋼げた断面に加え配力鉄筋の断面が有効に働いていることがわかる。

以上に示した測定結果において、ひびわれ発生に対応す

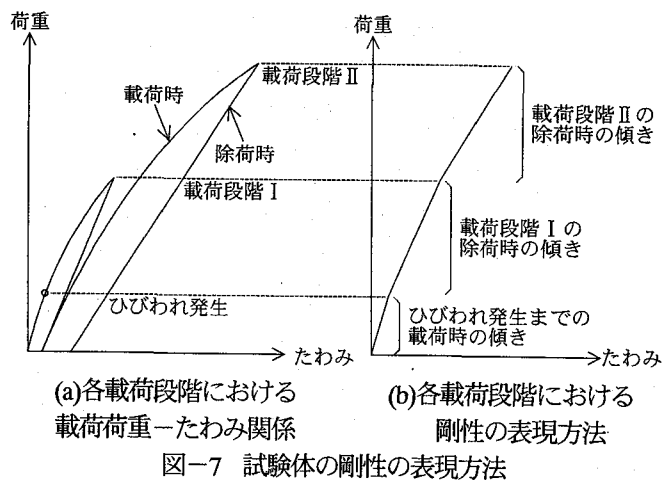


図-7 試験体の剛性の表現方法

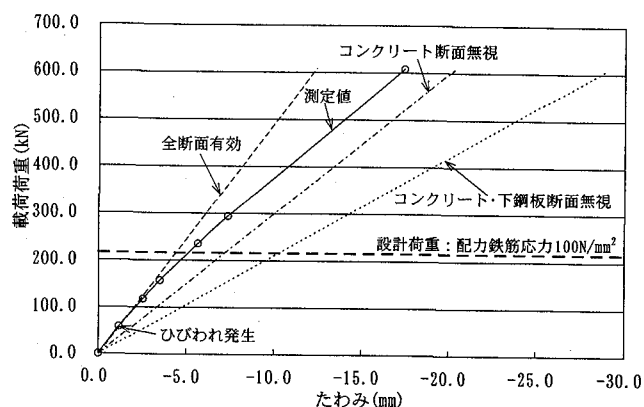


図-8 合成床版 配力鉄筋比小試験体の剛性の変化

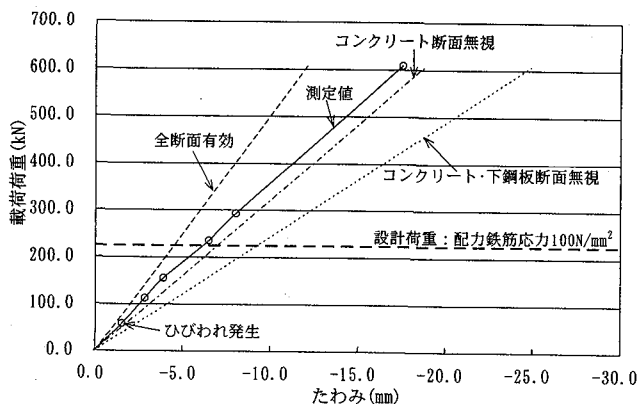


図-9 合成床版 配力鉄筋比大試験体の剛性の変化

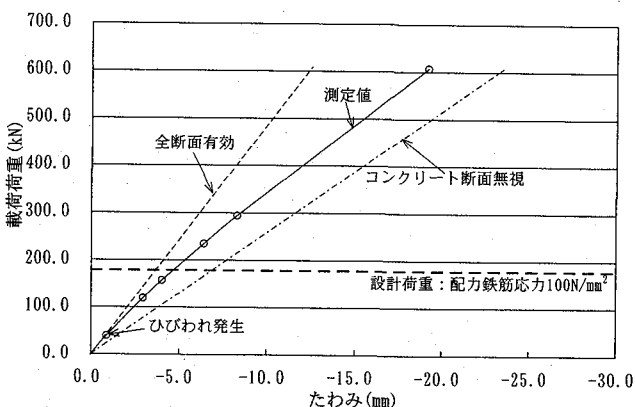


図-10 RC床版試験体の剛性の変化

る応力状態として設定した載荷荷重に比較して、実際にひびわれが発生した荷重が小さいことがわかる。この理由としては、コンクリートのクリープ・乾燥収縮を鉄筋や鋼部材が拘束し、ひびわれが発生しやすい状態になっていたことによるものと考えられる。

6. 載荷荷重と配力鉄筋および下鋼板のひずみの関係

ここでは、載荷荷重と配力鉄筋および下鋼板に発生するひずみの関係について示す。なお、配力鉄筋に関しては、鉄筋の両側面に貼付したひずみゲージの測定値を平均している。

図中には、FEM解析により求めた全断面有効時、コンクリート断面無視時、コンクリート・下鋼板断面無視時の載荷荷重とひずみの関係および配力鉄筋応力度が設計応力度程度の 100N/mm^2 となる設計荷重を同時に示す。また、図中の凡例に示す記号は、図-4(c)および図-4(d)に示す配力鉄筋および下鋼板のひずみゲージの記号に対応している。

6.1 合成床版試験体の試験結果

図-11 に配力鉄筋比小試験体の載荷荷重と試験体中央付近における配力鉄筋に発生するひずみの関係を示す。図中には、試験体中央の横リブ位置に発生したひびわれの近傍に貼付したひずみゲージ S5、比較のために横リブ間の載荷初期においてひびわれが発生していない位置に貼付したひずみゲージ S4、さらに両者の平均値を併記している。なお、ひずみゲージ S4 の測定値は、ひびわれの発生前後におけるひずみの増加量を差し引いたものである。

ひずみの測定値は、載荷初期において全断面有効時の解析値と等しい経路を通るが、ひびわれの発生にともなってひびわれ近傍の測定値は増加し、ひびわれが発生していない位置の測定値の増加率が減少する。載荷荷重が設計荷重よりも大きい範囲では、ひびわれ近傍の測定値はコンクリート・下鋼板断面無視時の解析値の経路に近く、平均値はコンクリート断面無視時の解析値に平行な経路を通る。

図-12 および図-13 に、それぞれ配力鉄筋比中試験体、配力鉄筋比大試験体の載荷荷重と配力鉄筋のひずみの関係を示す。測定値の表示方法については配力鉄筋比小試験体と同様である。両試験体とも、ひずみの測定値は載荷初期において配力鉄筋比小試験体と同様の傾向を示すが、ひびわれの発生によるひびわれ近傍の測定値の増加量は大きく減少している。載荷荷重が設計荷重よりも大きい範囲では、ひびわれ近傍の測定値はコンクリート断面無視時の解析値の経路に近く、平均値はそれに平行な経路を通る。なお、載荷荷重と配力鉄筋のひずみの関係については、膨張コンクリート試験体も図-13 と同様の傾向を示す。

図-14 に配力鉄筋比大試験体の載荷荷重と試験体中央付近における下鋼板下面のひずみの関係を示す。ひずみの測定値は、載荷初期において全断面有効時の解析値と等しい経路を通り、ひびわれの発生とともにコンクリート断面無視時の解析値と等しい経路を通る。なお、載荷荷重と下

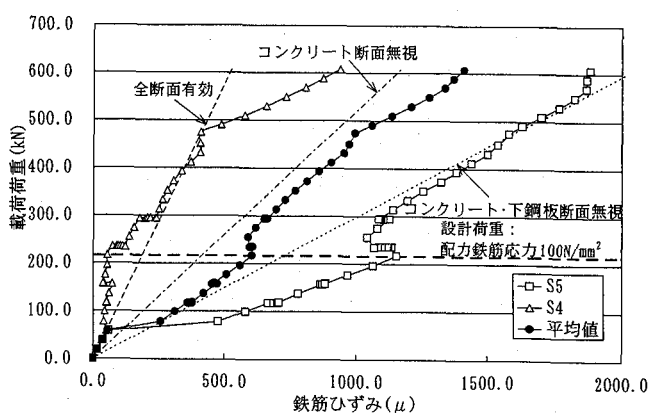


図-11 合成床版 配力鉄筋比小試験体の配力鉄筋ひずみ

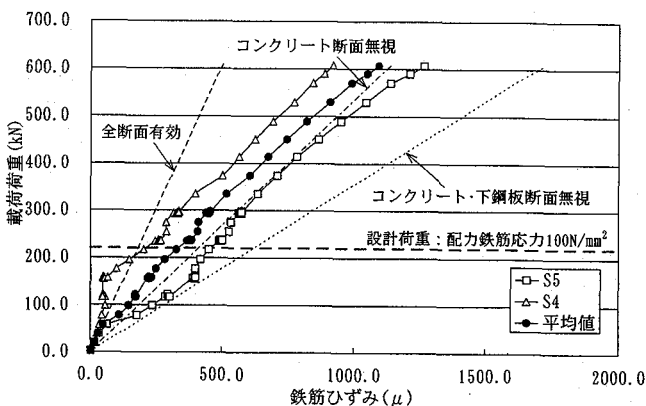


図-12 合成床版 配力鉄筋比中試験体の配力鉄筋ひずみ

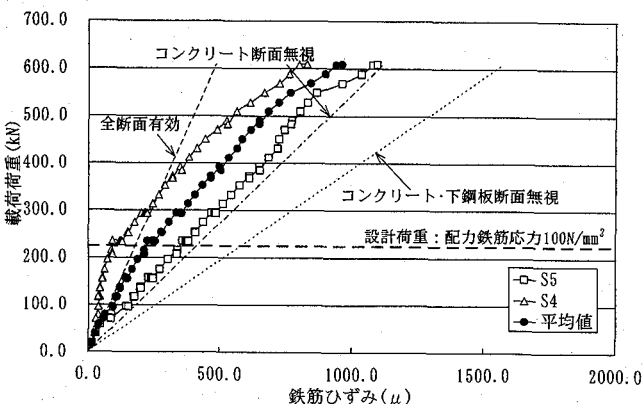


図-13 合成床版 配力鉄筋比大試験体の配力鉄筋ひずみ

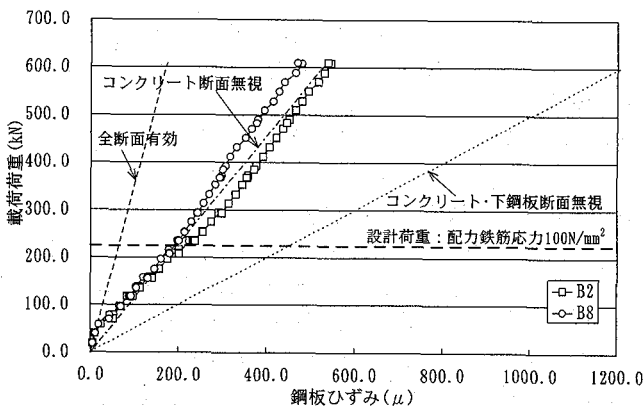


図-14 合成床版 配力鉄筋比大試験体の下鋼板ひずみ

鋼板のひずみの関係については、他の合成床版の試験体も図-14と同様の傾向を示す。

上記の結果から、配力鉄筋比が0.5%の試験体においては配力鉄筋の全断面がひずみの伝達に有効に寄与しておらず、配力鉄筋比が1.1%および1.5%の試験体においては配力鉄筋および下鋼板の断面がひずみの伝達に有効に働いていることがわかる。また、配力鉄筋比が1.1%および1.5%の試験体において、ひずみの平均値は文献4)および5)に示されるプレストレスしない連続合成げたにおける配力鉄筋のひずみの挙動に一致しており、これらの文献における状態Ⅰが全断面有効時に、状態Ⅱが鋼げた・配力鉄筋・下鋼板が有効であるコンクリート断面無視時に対応している。

6.2 R C床版試験体の試験結果

図-15にR C床版試験体の載荷荷重と試験体中央付近における配力鉄筋に発生するひずみの関係を示す。図中には、試験体中央付近の主鉄筋位置に発生したひびわれの近傍に貼付したひずみゲージS4、載荷初期においてひびわれが発生していない位置に貼付したひずみゲージS5、さらに両者の平均値を併記している。測定値の表示方法は合成床版の試験体と同様である。

ひずみの測定値は、載荷初期において合成床版の試験体と同様の傾向を示すが、載荷荷重の増加にともなうひびわれの分散によりひずみゲージS4とS5の測定値が近付いていく傾向を示す。載荷荷重が設計荷重よりも大きい範囲では、ひびわれ近傍の測定値はコンクリート断面無視時の解析値の経路に近く、平均値はそれに平行な経路を通る。この結果から、R C床版試験体の場合においては、配力鉄筋の断面がひずみの伝達に有効に働いていることがわかる。

7. 試験体断面のひずみ分布

前項では、配力鉄筋および下鋼板に発生するひずみの進展についてそれぞれ単独で評価しているが、ここでは試験体の断面のひずみ分布について検討を行う。図中の測定値は載荷荷重が設計荷重程度である場合におけるひずみ分布を示し、解析値はコンクリート断面無視時のFEM解析の結果を設計荷重を100kNで除した値で除すことにより設計荷重に換算した値を示している。

なお、図中の配力鉄筋の測定値は鉄筋の両側面に貼付したひずみゲージの測定結果の平均値を、その他の測定値は試験体断面の鉛直方向の中央線に対して対称に配置した各部位のひずみゲージの測定結果の平均値を示している。

7.1 合成床版試験体の試験結果

図-16および図-17に、それぞれ配力鉄筋比中試験体、配力鉄筋比大試験体の試験体中央付近の測定位置におけるひずみ分布を示す。配力鉄筋比中試験体については、鋼げたのひずみの測定値が解析値よりもやや引張側にシフトしているものの、全体的な分布はおおむね一致している。一方、配力鉄筋比大試験体については、ひずみの測定値と

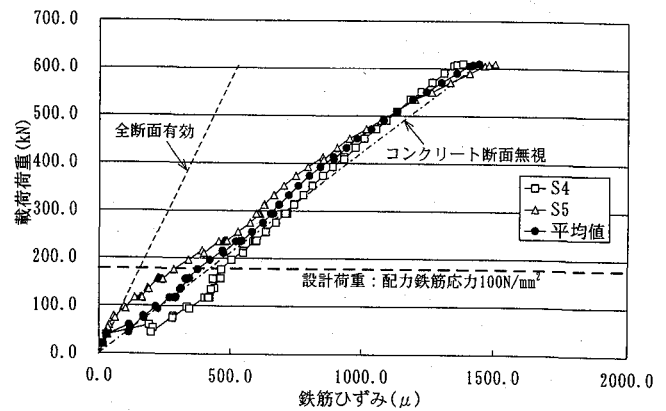


図-15 R C床版試験体の配力鉄筋ひずみ

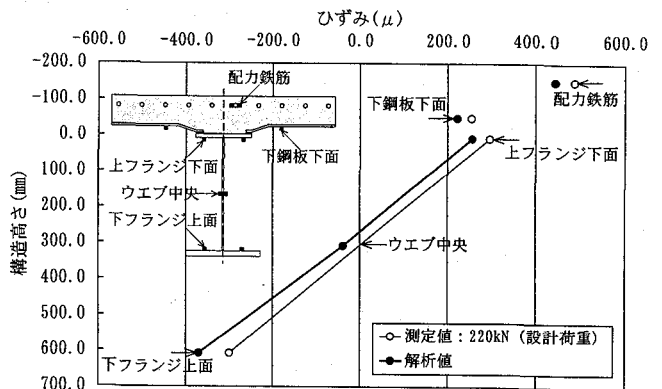


図-16 合成床版 配力鉄筋比中試験体の断面のひずみ分布

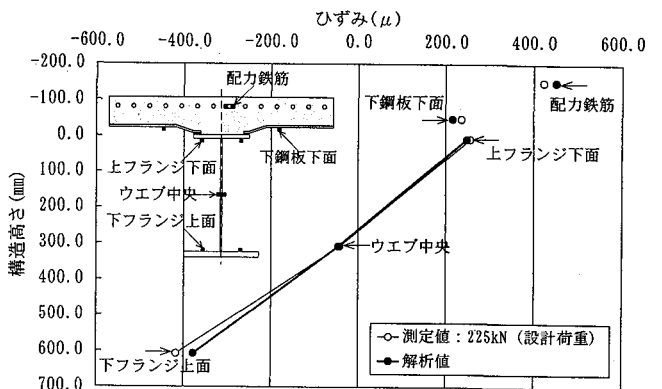


図-17 合成床版 配力鉄筋比大試験体の断面のひずみ分布

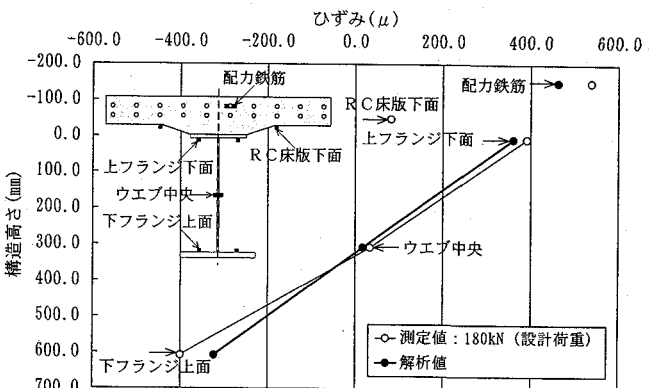


図-18 R C床版試験体の断面のひずみ分布

解析値の全体的な分布はよく一致している。

なお、図-16 および図-17 において下鋼板下面のひずみが上フランジおよび配力鉄筋のひずみと比較して小さい値を示している。この理由は、下鋼板下面のひずみの測定位置が他の部位に比較し鋼げたウェブ中心から離れており、せん断遅れの影響を大きく受けているためである。

上記の結果および前項の結果を考えあわせると、配力鉄筋比が1.1%および1.5%の試験体においては、載荷荷重が設計荷重程度である場合において、鋼げた断面と配力鉄筋および下鋼板の断面が一体として挙動していることがわかる。

7.2 RC床版試験体の試験結果

図-18 にRC床版試験体の試験体中央付近の測定位置におけるひずみ分布を示す。ひずみの測定値と解析値を比較すると、配力鉄筋および下フランジ上面のひずみの測定

値が解析値よりもやや大きい値を示すものの、全体的な分布はよく一致している。なお、図中には参考のためにRC床版下面のひずみの測定値を併記するが、これらの値が小さくコンクリート断面が有効に働いていないことを示している。

上記の結果および前項の結果を考えあわせると、RC床版試験体においては、載荷荷重が設計荷重程度である場合において、鋼げた断面と配力鉄筋の断面が一体として挙動していることがわかる。

8. コンクリートのひびわれ状況

載荷荷重が設計荷重程度である場合における各試験体のコンクリート上面のひびわれ性状について以下に比較を行った。

図-19(a)~(e)に合成床版の各試験体およびRC床版試

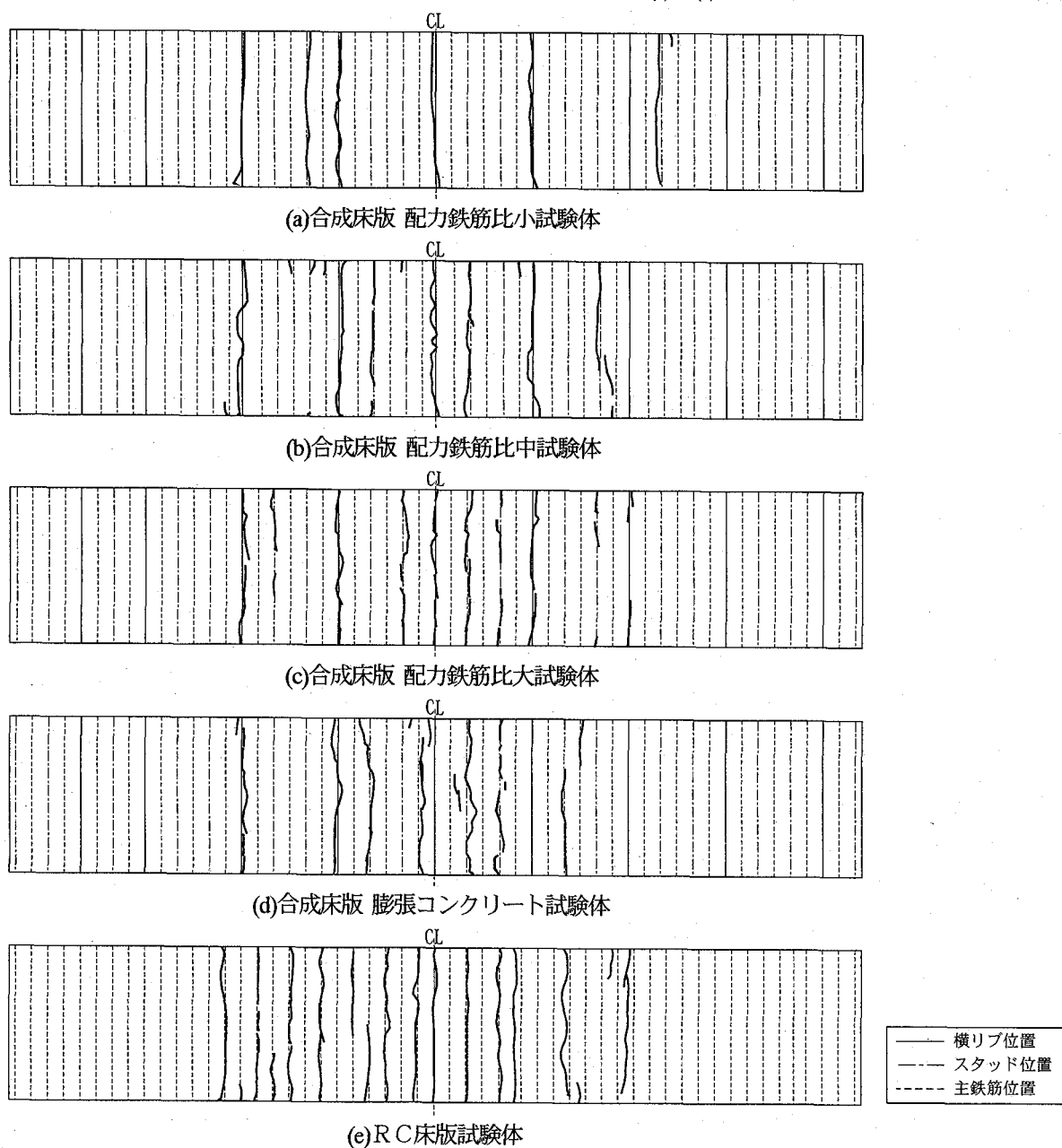


図-19 各試験体のコンクリートのひびわれ状況

験体のコンクリートのひびわれ状況を示す。また、図中には横リブ位置、スタッド列位置および主鉄筋位置を、それぞれ実線、一点鎖線および破線で示している。なお、横リブ間隔を3等分した位置にスタッド列を溶接し、横リブ間隔を6等分した位置に主鉄筋を配筋しており、横リブ上およびスタッド列上にも主鉄筋が存在している。

合成床版の各試験体におけるコンクリートのひびわれは、横リブ位置、スタッド列位置、主鉄筋位置に発生しており、発生の順序はおおむね横リブ位置→スタッド列位置→主鉄筋位置であった。

各試験体の試験体中央付近におけるコンクリートのひびわれ状況を比較すると、配力鉄筋比小試験体では横リブ位置にのみひびわれが発生しており、その間隔は横リブ間隔の750mm程度である。また、配力鉄筋比中試験体では横リブ位置に加えスタッド列位置にもひびわれが発生しており、その間隔はスタッド列間隔の250mmないしその2倍の500mm程度である。さらに、配力鉄筋比大試験体でも横リブ位置とスタッド列位置にひびわれが発生しており、その間隔はスタッド列間隔の250mm程度である。これらの配力鉄筋比が異なる3種類の合成床版の試験体を比較すると、配力鉄筋比が大きくなるにつれてひびわれが分散し、その間隔が小さくなることがわかる。

なお、膨張コンクリート試験体は、必ずしも横リブ位置にひびわれが発生しておらず、他の合成床版の試験体とやや傾向が異なるものの、ひびわれ間隔は配力鉄筋比が等しい配力鉄筋比大試験体とほぼ同程度である。

一方、RC試験体では、主鉄筋位置にひびわれが発生しており、その間隔は主鉄筋間隔の125mmないしその2倍の250mm程度である。合成床版の各試験体と比較すると、RC床版試験体はひびわれ間隔が小さく、分散しやすい構造であることがわかる。

9. コンクリートのひびわれ幅

各試験体の載荷荷重とコンクリートのひびわれ幅の関係を以下に示す。図中には、各試験体の測定結果のうちひびわれ幅の大きい3箇所の値とともに、配力鉄筋応力度が設計応力度程度の 100N/mm^2 となる設計荷重を同時に示している。なお、図中の凡例に示す記号は、図-4(b)に示すπゲージの記号に対応している。

9.1 ひびわれ幅の測定結果

図-20～図-22に、それぞれ配力鉄筋比小試験体、配力鉄筋比中試験体、配力鉄筋比大試験体の載荷荷重とコンクリートのひびわれ幅の関係を示す。載荷荷重が設計荷重程度である場合において、各試験体の最大のひびわれ幅は、試験体中央の横リブ位置に発生しており、その値はそれぞれ0.38mm、0.22mm、0.15mmである。また、図-23に膨張コンクリート試験体の載荷荷重とひびわれ幅の関係を示す。載荷荷重が設計荷重程度である場合において、ひびわれ幅の最大値は0.20mmである。

一方、図-24に示すRC床版試験体では、載荷荷重が

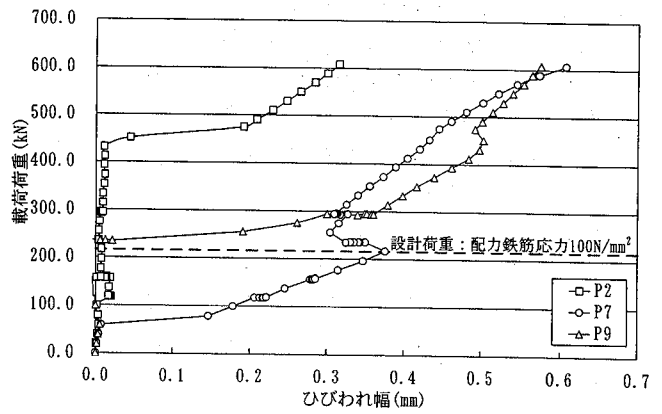


図-20 合成床版 配力鉄筋比小試験体のひびわれ幅

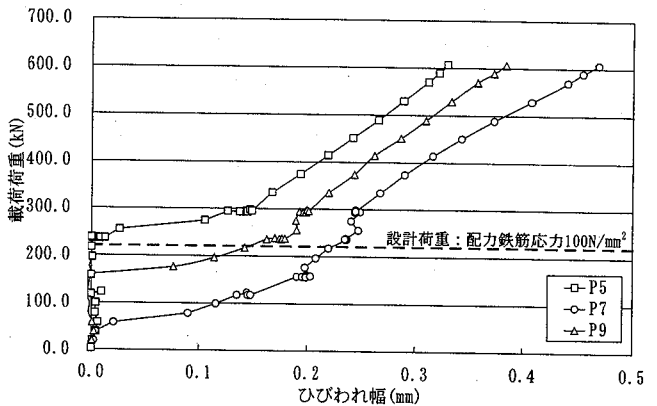


図-21 合成床版 配力鉄筋比中試験体のひびわれ幅

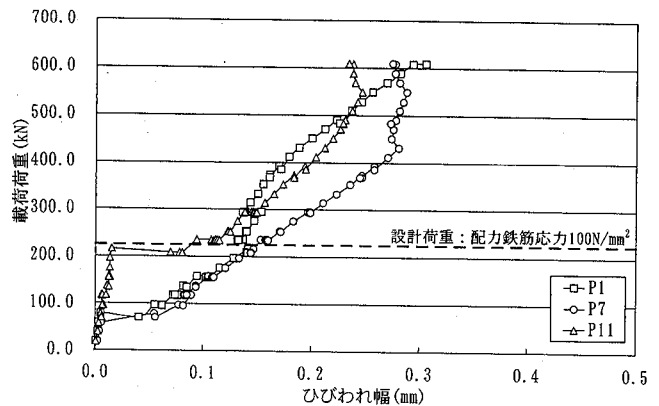


図-22 合成床版 配力鉄筋比大試験体のひびわれ幅

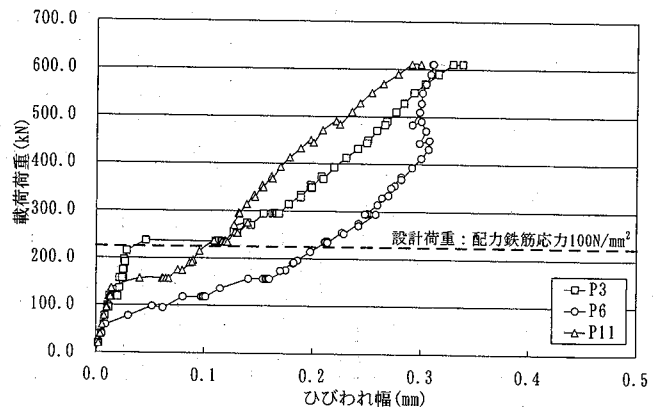


図-23 合成床版 膨張コンクリート試験体のひびわれ幅

設計荷重程度である場合において、ひびわれ幅の最大値は0.18mmである。鉄筋コンクリートのひびわれ幅については、コンクリート標準示方書⁹⁾に計算式が示されており、RC床版試験体の条件により算出したひびわれ幅は測定値の最大値と等しい0.18mmとなる。

上記の結果と表-8に示すコンクリート標準示方書に示されるコンクリートの許容ひびわれ幅を比較すると、合成床版の配力鉄筋比が1.1%の試験体では一般の環境における許容ひびわれ幅を満足し、1.5%の試験体では特に厳しい腐食環境の許容ひびわれ幅を満足することがわかる。また、RC床版試験体については、特に厳しい腐食環境の許容ひびわれ幅をわずかに上回っており、合成床版の配力鉄筋比が1.1%の試験体と1.5%の試験体の中間的なひびわれ幅を示している。

なお、図-23に示す膨張コンクリート試験体の最大ひびわれ幅は、配力鉄筋比が等しい配力鉄筋比大試験体よりもやや大きい値を示している。この試験体の載荷試験時における材齢は35日であり、文献⁷⁾によれば膨張効果が十分に持続している状態であったと考えられる。膨張コンクリートのひびわれ抵抗性については未解明な部分が多く、現在文献⁸⁾などの研究が進められているところであるが、最初に発生したひびわれにひずみが集中する傾向があり、これが膨張コンクリート試験体の最大ひびわれ幅がやや大きい原因であると推定される。参考までに、普通コンクリートを適用した配力鉄筋比大試験体と膨張コンクリート試験体とのひびわれ幅の平均値の比較を図-25に示す。載荷荷重が設計荷重程度の場合においてひびわれ幅の平均値を比較すると、両者はほぼ同程度の値を示すことから、膨張コンクリート試験体は最大ひびわれ幅は大きいもののひびわれ幅の合計はほぼ同じであり、最初に発生したひびわれにひずみが集中することを裏付けている。

9.2 ひびわれ幅の推定式

合成床版の各試験体のひびわれ幅の測定値をもとに、ひびわれ幅の推定式について以下に検討を行う。

合成床版の各試験体の基本的なひびわれ性状としては、まず横リブ位置にひびわれが発生し、その後横リブ間隔を分割するようにスタッド列位置や主鉄筋位置にひびわれが分散する。また、配力鉄筋比が大きくなるほどひびわれが分散しやすく、ひびわれ幅が減少することがわかった。これらをふまえ、横リブ間隔をひびわれ間隔の基準と考え、配力鉄筋比に対応した横リブ間隔とひびわれ間隔を関連付ける係数を導入し、その間隔に配力鉄筋のひずみを乗ずることによってひびわれ幅を算出する式(1)を提案する。

$$w = K_b \cdot c_r \left[\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \epsilon_{csd} \right] \tag{1}$$

ここに、 w : ひびわれ幅 (mm)
 K_b : 横リブ間隔とひびわれ間隔を関連付ける係数
 c_r : 横リブ間隔 (mm)

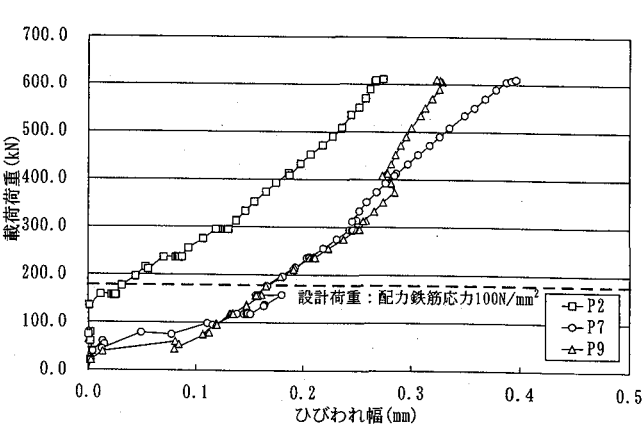


図-24 RC床版試験体のひびわれ幅

表-8 許容ひびわれ幅

	単位	一般の環境	腐食性環境	特に厳しい腐食性環境
適用式	—	0.005c	0.004c	0.0035c
かぶりc	mm	49.1	49.1	49.1
許容ひびわれ幅	mm	0.25	0.20	0.17

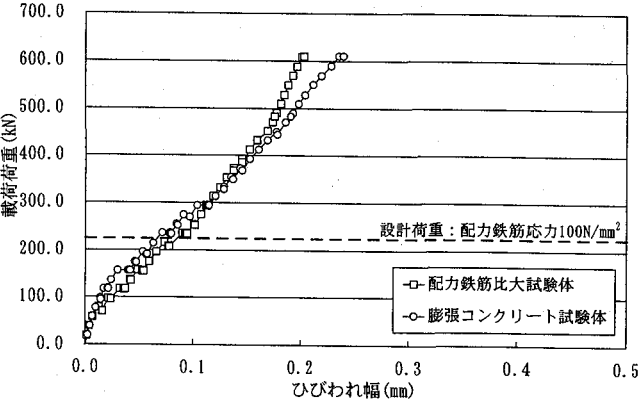


図-25 コンクリートの種類によるひびわれ幅の比較

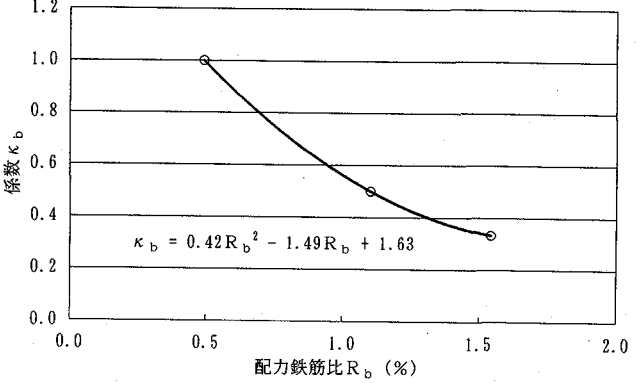


図-26 ひびわれ間隔を表す係数の近似曲線

表-9 ひびわれ幅の測定値と推定値の比較

配力鉄筋比 %	係数 K_b		配力鉄筋応力度 (N/mm ²)		
			70	100	140
0.5	1.00	測定値	0.28	0.38	0.37
		推定値	0.38	0.49	0.64
1.1	0.50	測定値	0.20	0.22	0.25
		推定値	0.19	0.24	0.32
1.5	0.33	測定値	0.11	0.15	0.21
		推定値	0.13	0.16	0.21

σ_{se} : 配力鉄筋応力度の増加量 (N/mm²)
 E_s : 配力鉄筋のヤング係数 (N/mm²)
 ε_{csd} : コンクリートの収縮およびクリープ
 などによるひびわれ幅の増加を考慮
 するための数値 (150×10⁻⁶)

上記の κ_b については、図-19(a)~(c)に示すコンクリートのひびわれ状況において、ひびわれ幅が最大である試験体中央の横リブ位置に発生しているひびわれから、その両隣のひびわれまでの距離を読み取り、それらを平均し横リブ間隔で除して求めるものとした。具体的には、配力鉄筋比が0.5%、1.1%、1.5%の試験体について、それぞれ1.00、0.50、0.33となり、これらを近似すると図-26に示す2次曲線を得る。なお、各試験体のクリープ・乾燥収縮の影響を評価するために、式(1)には文献 6)に示される ε_{csd} を考慮している。

ひびわれ幅の測定値と式(1)から算出した推定値は表-9に示す通りであり、配力鉄筋比が0.5%の場合においては ε_{csd} の影響が大きいこともあり誤差が0.1mm程度であるものの、1.1%および1.5%の場合において両者はほぼ一致していることがわかる。ただし、表中の下線を付した測定値については、推定値と比較的大きな差異が生じているが、これは当該ひびわれ近傍に新たにひびわれが発生し、ひびわれ幅が減少したことによるものである。

なお、提案したひびわれ幅の推定式については、根拠とする試験体数が少ないことから、実用に耐える計算式とするためにさらに多くの試験結果の反映が必要である。

10. まとめ

本研究は、合成床版を連続合成げたに適用した場合の挙動を明らかにすることを目的としたものであり、合成床版と鋼げたとを一体化した試験体を製作し、床版部分に主げたの一部として挙動する場合の応力状態を発生させて、合成床版の各種性状を確認したものである。具体的には、コンクリートのひびわれ性状およびひびわれ幅の把握、主げたの剛性およびひずみの伝達への下鋼板・配力鉄筋の寄与の確認、コンクリートのひびわれ幅の推定式の検討を行ったものである。

本研究において、得られた結果は以下の通りである。

(1) 合成床版試験体について

- すべての試験体に関して、配力鉄筋および下鋼板の断面が主げたの剛性に有効に寄与する。
- 配力鉄筋比が1.1%以上の試験体では、配力鉄筋および下鋼板の断面がひずみの伝達に有効に寄与する。
- コンクリートのひびわれは、横リブ位置→スタッド列位置→主鉄筋位置の順序で発生し、配力鉄筋比が大きいほどひびわれ幅が小さくなる。
- 配力鉄筋比が1.5%の試験体では、ひびわれ幅がRC床版試験体よりも小さく、特に厳しい腐食環境の許容ひびわれ幅を満足する。
- 提案したコンクリートのひびわれ幅の推定式は、配力鉄

筋比が1.1%から1.5%の範囲において比較的精度よくひびわれ幅を計算することができる。

(2) RC床版試験体について

- RC床版試験体（配力鉄筋比2.2%）では、配力鉄筋の断面が主げたの剛性およびひずみの伝達に有効に寄与する。
- コンクリートのひびわれは主鉄筋位置に発生し、ひびわれ幅は特に厳しい腐食環境の許容ひびわれ幅をわずかに上回った。

なお、文献9)ではPC床版を適用した連続合成げたに関して、コンクリートのテンションステフニングを考慮したひびわれ幅の算定が提案されている。合成床版に関して、この効果を考慮するための基礎的な検討が必要である。また、本研究の次の段階として、負の曲げモーメントを作用させながら床版部に輪荷重を走行させる複合的な載荷試験の実施が、合成床版を適用した連続合成げたの挙動を把握する上での重要な課題であると考えられる。

参考文献

- 1) 渡辺 滉, 街道 浩, 水口和之, 村松竹司, 松井繁之, 堀川都志雄: 鋼・コンクリート合成床版の開発と実橋への適用について, 鋼橋床版シンポジウム論文集, pp.213-218, 1998.
- 2) 街道 浩, 渡辺 滉, 橋 吉宏, 松井繁之, 堀川都志雄: 床版張出し部の輪荷重走行試験および曲げモーメント性状について, 構造工学論文集 Vol.48A, 土木学会, pp.1429-1439, 2002.
- 3) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, II 鋼橋編, 丸善, 2002.
- 4) Hanswille, G.: Zur Rißbreitenbeschränkung bei Verbundträgern, Technisch.-wissenschaftliche Mitteilungen, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau Ruhr-Universität Bochum, Mitteilung Nr.86-1, 1986.
- 5) (著) K. Roik, G. Hanswille, (訳) 伊藤鉦一, 平城弘一: 合成桁におけるひび割れ幅の制限, 橋梁と基礎, Vol.27, No.2, pp.33-40, 1993.
- 6) 土木学会: コンクリート標準示方書, 構造性能照査編, 2002年制定, 丸善, 2002.
- 7) 村山隆之, 吉崎信之, 西川和廣, 八部順一, 橋 吉宏, 大垣賀津雄, 済藤英明: 膨張コンクリートを用いた合成床版の乾燥収縮度確認試験, 土木学会第56回年次学術講演会概要集 CS7-042, pp.464-465, 2001.
- 8) 細田 暁: 微視的機構に着目した膨張コンクリートのひび割れ抵抗性およびひび割れ後の軟化性状に関する研究とRC部材への適用, 東京大学博士学位論文, 2001.
- 9) 中園明広, 安川義行, 稲葉尚文, 橋 吉宏, 秋山 洋, 佐々木保隆: PC床版を有する鋼連続合成2主桁橋の設計法(上)ー連続合成桁における中間支点部の設計一, 橋梁と基礎, Vol.36, No.2, pp.27-35, 2002.

(2002年9月13日受付)