

(31) 縞鋼板の付着特性を活用した合成床版

Composite Slab Using Bond Characteristics of Checker Plate

山田岳史*, 沼田 克**, 岡本安弘**, 窪田 晃**, 松井繁之***

Takeshi YAMADA, Katsu NUMATA, Yasuhiro OKAMOTO, Akira KUBOTA and Shigeyuki MATSUI

*博(工) (株)神戸製鋼所 技術開発本部 機械研究所 構造・加工研究室 (〒651-2271 神戸市西区高塚台 1-5-5)

** (株)神戸製鋼所 エンジニアリングカンパニー 鋼構造本部 構造技術部 (〒657-0845 神戸市灘区岩屋中町 4-2-7)

***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)

Steel plate-concrete composite slabs have been attracting attention due to their many advantages. Such advantages include high structural performance, work-ability, and a much shorter construction period. A new composite slab using the bond characteristics of checker plate was developed. The checker plate is superior to bond characteristics like deformed bar of RC member.

This study focused bond characteristics. Then static and fatigue tests were carried out to study the effect of checker plate. The bond strength of checker plate with U shaped bolt was made clear about 4 N/mm^2 by numerical analyses.

Keywords: checker plate, bond characteristics, U shaped bolt

1. まえがき

鉄筋コンクリート床版(以下、RC床版)は、経済性に優れ、比較的施工が容易であることから、これまでの道路橋床版に広く適用されてきた。しかし、繰返し作用する輪荷重による損傷発生¹⁾や施工現場における熟練作業員不足などの問題に直面しているのが現状である。

このような課題を抱えるRC床版に代わる次世代の床版として、鋼板・コンクリート合成床版²⁾(以下、合成床版)が各種開発され、実績を重ねつつある。この種の合成床版の特長は、(1)鋼製型枠が工場製作のため現場作業を軽減できること、(2)現場での品質の管理、維持が比較的容易であること、(3)型枠を兼務した鋼板とコンクリートの合成挙動により、高剛性となるため床版厚を薄くできること、(4)重交通に対する疲労耐久性に富むことである。

これら合成床版の要はコンクリートと鋼板との間でせん断力を伝達する役目を担うずれ止めである。その代表的なずれ止めとして頭付きスタッド(以下、スタッド)が挙げられる。しかし、ロビンソン型合成床版を例にとれば、移動する輪荷重の影響によりスタッド基部には回転せん断力が作用し、疲労損傷を招くことが指摘³⁾されており、スタッド断面に発生するせん断応力の下限値をJSSC 疲労設計指針⁴⁾に示されているS等級($\Delta\sigma_f=80\text{N/mm}^2$)よりも低い応力振幅である 49N/mm^2 とすることが提案されている。

そこで、鋼板とコンクリート間のせん断伝達のために頭付きスタッドのような機械的ずれ止めではなく、RC部材に見られる異形鉄筋とコンクリートの付着によるせん断伝達のように、縞鋼板⁵⁾とコンクリートの付着に期待した図-1に示す合成床版⁶⁾を考案した。ただし、コン

クリートの縞鋼板からの剥離対策、入熱による鋼板の疲労強度の低下を避けるためにUボルトを用いることとした。すなわち、本床版は鋼板とコンクリート間のせん断力の伝達には縞鋼板の突起に期待し、剥離を招くアップリフト力への抵抗にはUボルトに期待するという明瞭な役割分担をさせた合成床版である。

本稿では、この縞鋼板とUボルトの組み合わせによるずれ止め性能の把握のために、はり供試体の静的、繰返し載荷による曲げ試験および床版供試体の静的押抜きせん断試験を行うとともに、使用状態におけるずれ止め性能を輪荷重走行試験によって把握した。さらに、縞鋼板の付着強度を定量的に把握するために数値解析を行い、使用状態で鋼板-コンクリート間に発生するせん断応力との比較によって、本床版の安全性についても言及した。

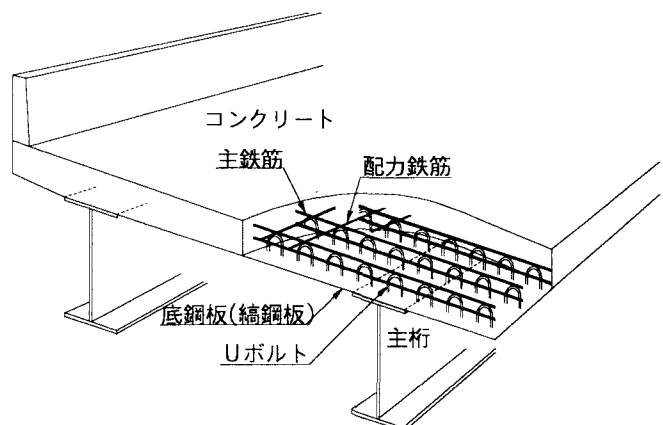


図-1 U-Bolt 床版の概念図

2. 縞鋼板のずれ止め性能

2.1 供試体および試験の概要

図-2 に曲げ試験に用いたはり供試体の概要を示す。本供試体は床版支間 2500mm を想定し、2800mm(主鉄筋方向)×500mm(配力鉄筋方向)のサイズで、コンクリート厚 200mm、圧縮強度 $f_c=36\text{N/mm}^2$ である。底鋼板厚は 6mm($\sigma_y=300\text{N/mm}^2$)、主鉄筋は D19($\sigma_y=360\text{N/mm}^2$)、配力鉄筋は D16、U ボルトの軸径は $\phi 16$ である。U ボルトの中段には D19 の組み立て鉄筋を配置した。主鉄筋と U ボルトの接合はビード長 20mm のフレア溶接であり、組み立て鉄筋と U ボルトの接合は仮留め溶接である。

表-1 に示すとおり 3 体の供試体を製作した。B 1 供試体には、鋼板と U ボルトのずれを抑えることを目的として図-3 に示すとおり基部にテーパ加工を施した U ボルトを用いた。一方、B 2、B 3 供試体については通常の U ボルトを使用した。特に、B 3 供試体については、底鋼板に縞鋼板を用いた。

載荷試験は図-2 に示すとおり、載荷支間 500mm の 2 点線載荷であり、3 体ともに繰返し載荷試験を実施し、その後、静的破壊試験を行った。繰返し載荷試験での最大荷重は 29kN とし、最小荷重を 5.9kN とした。この最大荷重は、支間 2500mm の一方向版の支間中央に荷重 147kN (載荷面積 500mm×200mm) が作用したときの底鋼板に発生する主鉄筋方向応力と同等の応力が本はり供試体において発生する荷重である。試験では、29kN にて 100 万回繰返し、その後 1.5 倍の 44kN にて 50 万回繰り返した。

2.2 曲げ試験の結果

(1) 繰返し載荷試験

U ボルトのずれ、ナットのゆるみの有無を把握するために、最大荷重 29kN を基本とした繰返し試験を行った。

繰返し載荷試験の荷重レベルでは、53N・m のトルクによって締め付けたことにより、全供試体ともにナットのゆるみ、ずれは確認できなかった。

図-4 に繰返し載荷回数と支間中央のたわみの関係を示す。この結果、最大荷重 29kN の繰返し載荷では、縞鋼板を用いた B 3 に比べて、U ボルト基部にテーパ加工を施した B 1、底鋼板に普通鋼板を用いた B 2 ではたわみが大きい。これは B 1、B 2 では試験開始後に発生したコンクリートと底鋼板の付着切れにともない、U ボルト位置に引張ひずみが集中し、曲げひび割れが発生したことによると考えられる。さらに、最大荷重を 44kN に設定したところ、縞鋼板を用いた B 3 では、引張ひずみが U ボルト位置に集中することがなかったと考えられ、ひび割れの発生は認められなかった。

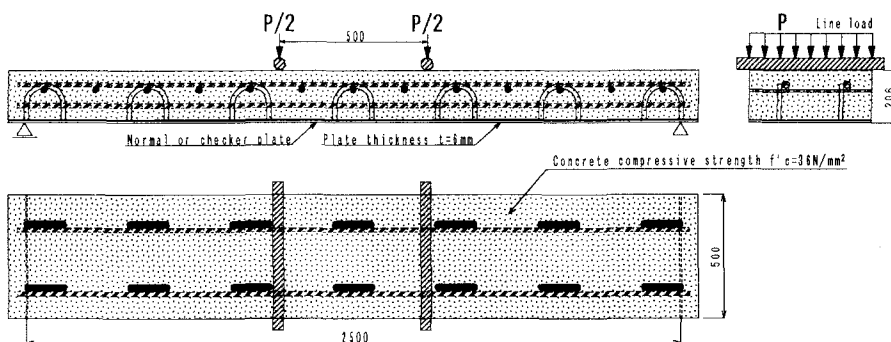


図-2 静的曲げ試験用はり供試体

表-1 はり供試体の諸元

Specimen	Contents		
	Skin plate	U bolt	Nut size
B-1	Normal	Tapered	M12
B-2	Normal	Normal	M16
B-3	Checker	Normal	M16

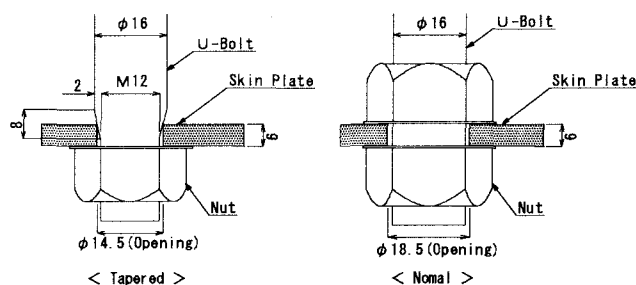


図-3 Uボルトの基部

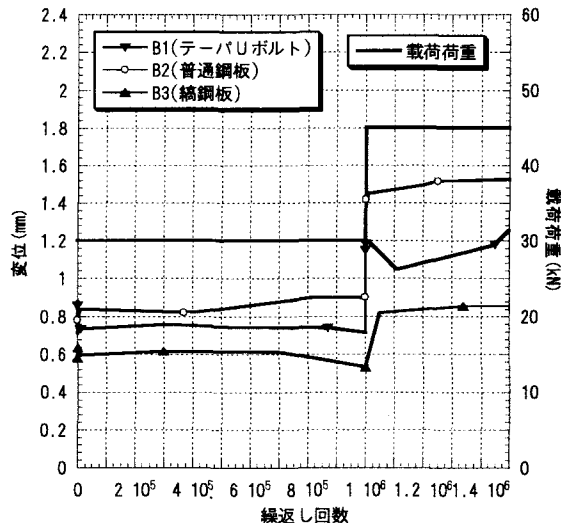


図-4 繰返し載荷試験によるたわみ

(2) 静的破壊試験

静的破壊試験による支間中央の荷重－変位関係を図-5 に示す。図より、U ボルト基部にテーパ加工を施した B 1 および底鋼板に普通鋼板を用いた B 2 では、繰返し載荷試験によって曲げひび割れが発生していることから、60kN まではコンクリートの引張側を無視した断面（以下、RC断面）としての計算値とほぼ一致するものの、60kN 以降は U ボルトのずれの増大にともない曲げ剛性

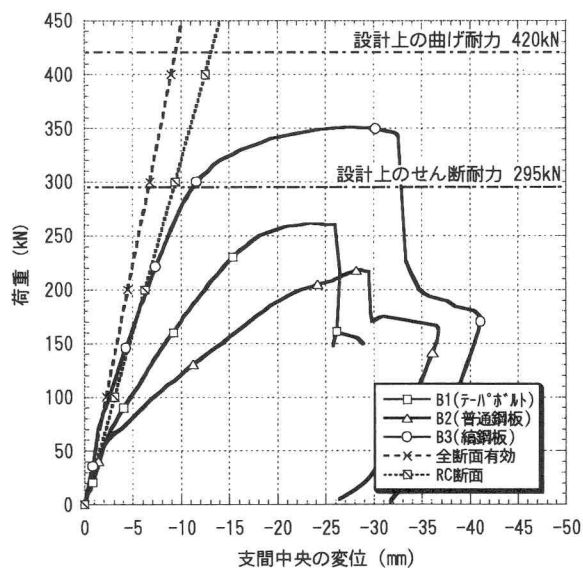


図-5 支間中央の荷重－変位曲線

が低下したものと考えられる。一方、底鋼板に縞鋼板を用いたB3は、図-5の荷重－変位関係だけでなく、底鋼板のひずみ(図-6)がRC断面としての計算値とほぼ一致することも確認しており、設計で期待したとおり完全合成の挙動を呈したものと判断できる。

B3は底鋼板が降伏したものの、B1、B2では降伏しなかったが、全供試体はUボルトの円弧部分を迂回した斜引張破壊(写真-1)であった。試験終了後各供試体の端部における鋼板－コンクリートのずれを確認したところ、B1、B2では目視にてずれを確認したが、縞鋼板を用いたB3ではずれを確認できなかった。

また、RCはりの慣用計算によれば、本はり供試体の曲げ耐力は420kNであり、せん断補強鋼材を考慮しない場合のせん断耐力は295kNである。供試体の設計時には、Uボルトのスターラップ効果を期待し、せん断耐力として540kNを見込んでいたものの、試験結果から判断して、B3供試体の終局耐力は、せん断耐力295kNを上回るものの、曲げ耐力の420kNには及ばなかった。これらのことから判断して、Uボルトによって鋼板とコンクリートの剥離を抑え、底鋼板に縞鋼板を用いることによって十分な合成効果を期待できることが明らかになった。

3. U-Bolt 床版の構造特性

3.1 供試体の概要

本床版のT荷重作用時における静的構造特性と疲労耐久性を把握するために、2体の床版供試体を製作し、それぞれ静的押抜きせん断試験、輪荷重走行試験を実施した。

図-7に床版供試体の概要を示す。本供試体は実橋の床

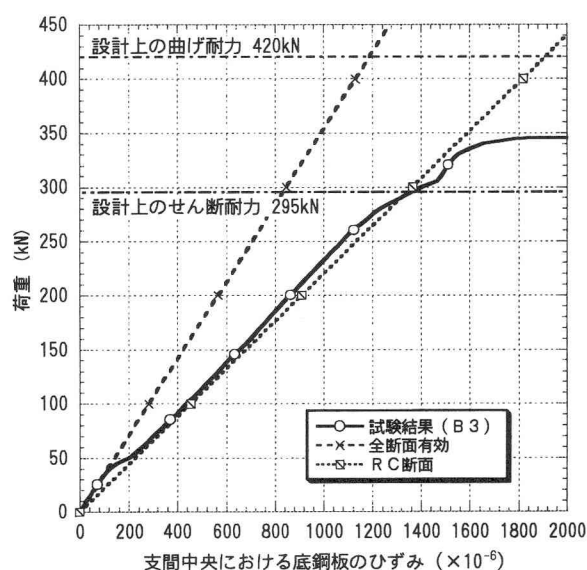


図-6 B3供試体底鋼板の荷重－ひずみ曲線

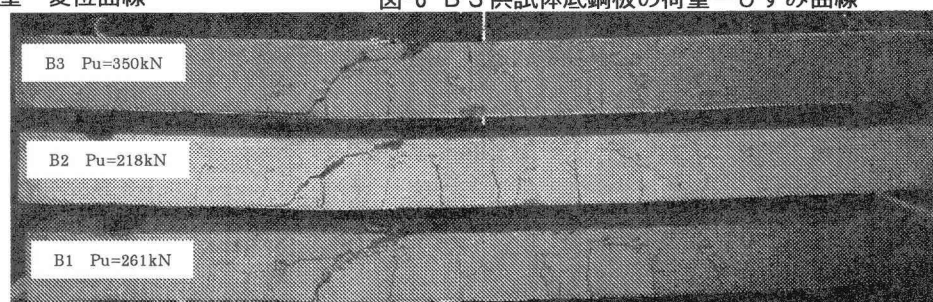


写真-1 破壊したはり供試体

版支間3000mmの連続版を想定し、その中で正曲げ区間である2500mmを供試体の床版支間として2辺単純支持した。また、供試体のサイズは2800mm(主鉄筋方向)×4500mm(配力鉄筋方向)で、配力鉄筋方向継手を設け、一面施工を行うため節付き両ねじHTB[®]を使用し、一面摩擦接合を行っている。コンクリート厚 h_c は鋼構造設計指針PartB(合成構造物)式²⁾に準拠し、180mmとした。なお、底鋼板にははり供試体の曲げ試験の結果を反映させ、厚さ6mmの縞鋼板を使用し、Uボルトの基部には図-3と同様にテーパ加工を施した。コンクリートの圧縮強度は、静的押抜きせん断試験用供試体では $f_c=45.0\text{N/mm}^2$ 、輪荷重走行試験用供試体では $f_c=35.2\text{N/mm}^2$ である。

3.2 静的押抜きせん断試験

T荷重の載荷面積200mm×500mmを床版支間中央に載荷する押抜きせん断試験を行った。試験では、0kN→150kN→0kN→300kN→0kN→450kN→・・・→900kN→0kNの順に載荷、除荷を繰り返し、その後終局を迎えるまで載荷した。

図-8に載荷点における荷重と変位の関係を示す。図中にはコンクリート断面を全断面有効、RC断面とした場合の線形計算の結果と鋼板－コンクリート間に完全合成を仮定した弾塑性有限要素解析⁷⁾の結果も示す。500kNまでは、全断面有効の場合にほぼ一致しており、

500kN 以降にひび割れの発生とともに剛性低下したことが明らかである。また、完全合成を仮定した弾塑性解析結果とも一致しており、本供試体の鋼板とコンクリートの間にずれの発生はほとんどなかったものと判断できる。また、試験終了後の目視によってもずれがなかったことを確認した。

3.3 輪荷重走行試験

本床版の使用限界状態を把握するために、(独)土木研究所が所有する輪荷重走行試験機を用いた。支間長 3.0m の連続版として設計した供試体 (図-7) に対して、等価な曲げモーメントが作用することとなる床版支間 2.5m の単純支持とした。輪荷重は供試体上に並べた 500mm×200mm の鋼ブロック上を±1.5m の範囲で移動し、157kN から 4 万回ごとに 19.6kN 増加させる階段状荷重漸増載荷⁸⁾である。

図-9 に供試体中央のたわみと載荷荷重の関係を示す。本床版は荷重と走行回数の増加とともにたわみが増加し、47.3 万回で押抜きせん断破壊に至ったものと判断した。なお、392kN、48.3 万回まで試験を継続し、最終的な活荷重たわみは 6.24mm となった。

図-10 に載荷荷重を 98kN とした場合の換算たわみと走行回数の関係を示す。図中のコンクリート全断面有効、RC 断面とは載荷荷重 98kN に対するたわみの計算値である。本図より、走行回数 12 万回までに曲げひび割れの発生とともに中立軸が移動し、曲げ剛性が低下したものと判断できる。その後、36 万回までは換算たわみに大きな変化はなく、剛性が安定した状態で推移したものと判断できる。その後、徐々にせん断ひび割れの発生が進

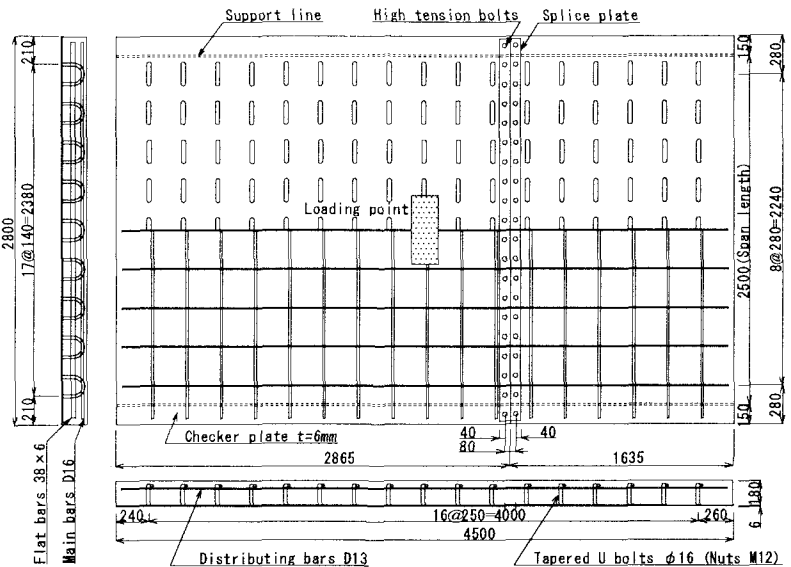


図-7 床版供試体の概要

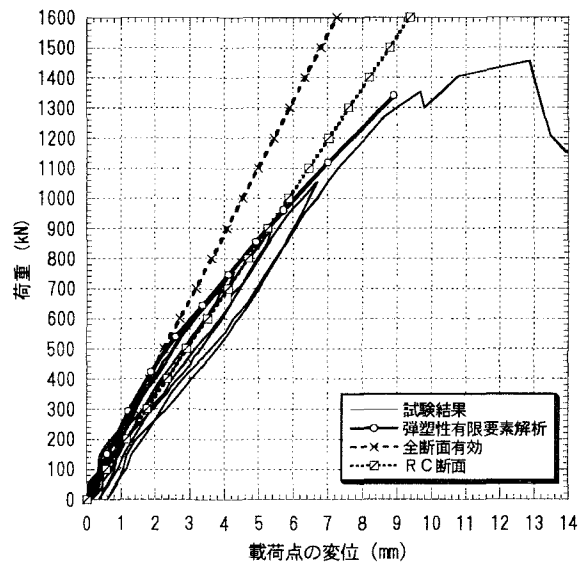


図-8 載荷点の荷重-変位曲線

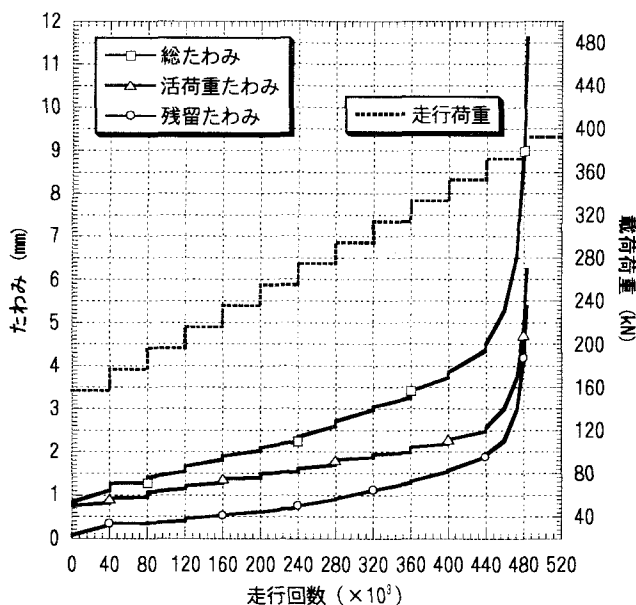


図-9 供試体中央位置のたわみと走行回数の関係

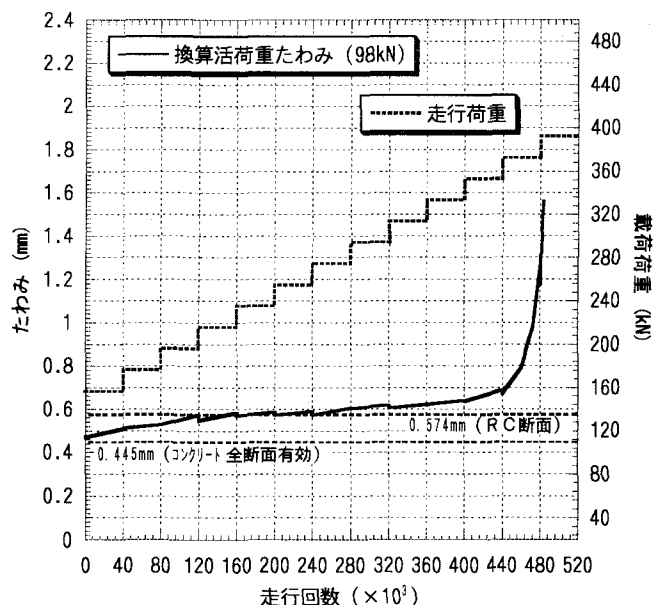


図-10 供試体中央位置の換算たわみと走行回数の関係

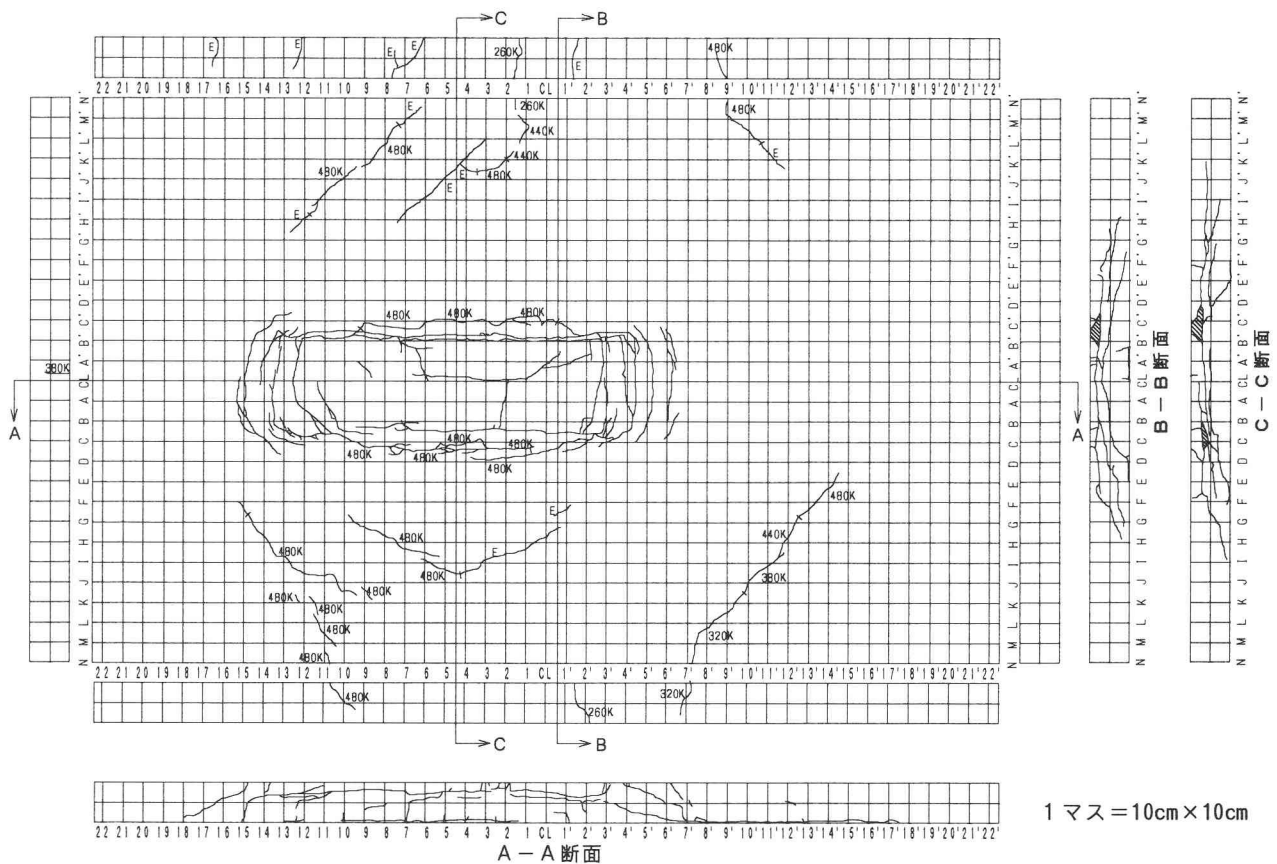


図-11 床版上面と各切断面におけるひび割れ分布

展し、44 万回以降は上側主鉄筋のダボ作用にともなうコンクリートの剥離によって曲げ剛性が低下し、たわみが増大したものと考えられる。

図-11 に試験終了後の床版上面と各切断面におけるひび割れ分布を示す。床版上面のひび割れ分布より、典型的な押抜きせん断破壊であることが分かる。また、切断面B、Cから本供試体の破壊形式は、コンクリートの純せん断ひび割れの発達の後に、上側主鉄筋のせん断抵抗（ダウェル作用）によって剥離面が形成されたものと推測できる。さらに、切断面Aの2～10と7'～17'にかけて、底鋼板との境界面に近傍に水平ひび割れが発生していた。このことは、繰返し荷重下においては、コンクリートのせん断強度よりも縞鋼板の突起による付着力が高い強度を有することを示唆するものと考えられる。

写真-2 に図-11 の切断面B-C間ブロックの底鋼板を剥がした状況を示す。床版支間中央側ではコンクリートが粉を吹いた状態であったものの、支点近傍では突起痕が鋭利に残ったままであった。さらに、本床版ではUボルトと縞鋼板をナット（ゆるみ止めナット）によって締結している。輪荷重走行試験中、4万回ごとにナットのゆるみを確認したが、試験終了までナットがゆるむことがなかったことを付記しておく。

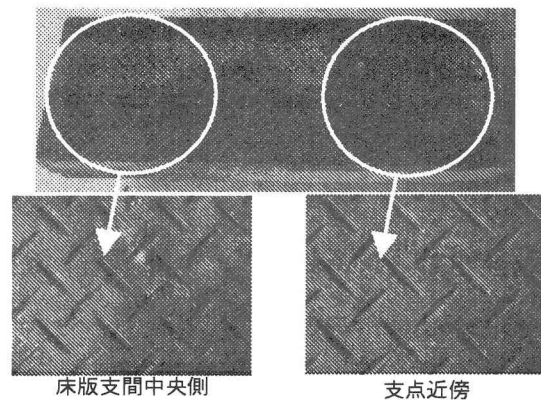


写真-2 縞鋼板の突起痕

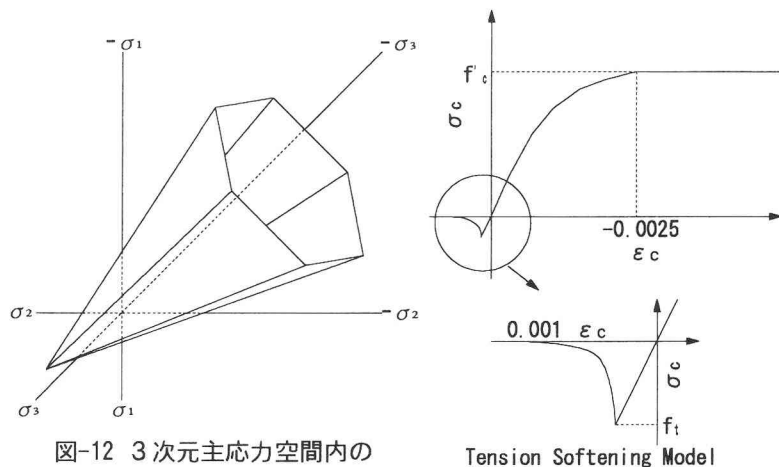


図-12 3次元主応力空間内のMohr-Coulombの破壊面⁹⁾

図-13 コンクリートの応力-ひずみ曲線

4. 縞鋼板の付着性能

4.1 数値解析の概要

本合成床版の特徴は、R C床版における異形鉄筋の代わりに突起付きの鋼板である縞鋼板を用いたこと、さらに鋼板とコンクリートの剥離防止のためにUボルトを配置したことである。したがって、異形鉄筋の付着強度と同様に縞鋼板とUボルトの併用による付着強度を把握しておくことは、本床版を設計するために極めて重要であると考えられる。そこで、数値解析によって付着強度の把握を行うこととした。

本数値解析は、DIANA⁷⁾によって、鋼材およびコンクリートの材料非線形性を考慮した有限要素解析である。

材料構成則は、以下のとおりである。(1)鋼材料には von Mises の降伏条件を適用し、(2)コンクリートには、図-12 に示す Mohr-Coulomb の破壊基準を適用した。内部摩擦角 $\phi=30^\circ$ とし、関連流れ則に従うこととした。この材料特性を1軸の応力-ひずみ曲線で示せば、図-13 のとおりとなる。

4.2 解析モデルの妥当性の検討

縞鋼板に付着強度を把握するために、園田、鬼頭ら¹⁰⁾によって試験結果が示され、付着強度算定式が提案されている線状突起付き鋼板の付着強度解析を行った。提案された算定式によれば、鋼板とコンクリートの摩擦係数は $\mu=0.6$ であり、摩擦強度 τ_f と突起前面でのコンクリートの支圧破壊強度 τ_b との和として、線状突起付き鋼板の付着強度 τ_{cal} を提案している。

$$\tau_{cal} = \tau_f + \tau_b : \tau_{cal} / F_c = 0.60\sigma / F_c + m(0.892 + 16.3\sigma / F_c) \quad \text{式(1)}$$

F_c : コンクリートの圧縮強度(N/mm^2)

σ : 付着面に与える側圧(N/mm^2)

$m : nh_f/L$

n : 線状突起の数

h_f : 突起の高さ(mm)

L : 付着面の長さ(mm)

本解析では、鋼板とコンクリートのずれ挙動を解析することから、鋼板-コンクリート間に摩擦係数 $\mu=0.6$ を定義した接触解析を行った。鋼板を Shell 要素 (ただし、突起を Solid 要素)、コンクリートを Solid 要素にてモデル化した。図-14 にモデル化した線状突起付き鋼板を示す。コンクリートの圧縮強度 $F_c=30.0N/mm^2$ 、線状突起の数 $n=12$ 、突起の高さ $h_f=2mm$ 、付着面の長さ $L=420mm$ であり、側圧 σ をパラメータに取った。

図-16 に線状突起付き鋼板の付着応力-ずれの関係を示す。図中の τ_{cal} は提案式による強度算定値である。いずれの側圧 σ に関しても、数値解析結果と算定値とはほぼ一致しており、突起付き鋼板の付着強度の算定に数値解析を用いても問題ないものと判断できる。したがって、縞鋼板とUボルトの組合わせによる付着強度について、同様のモデル化を行った数値解析によって検討することとした。

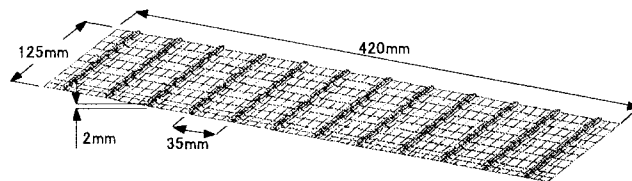


図-14 モデル化した線状突起付き鋼板

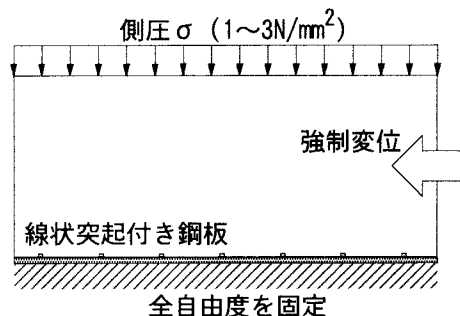


図-15 線状突起付き鋼板のモデルの概念図

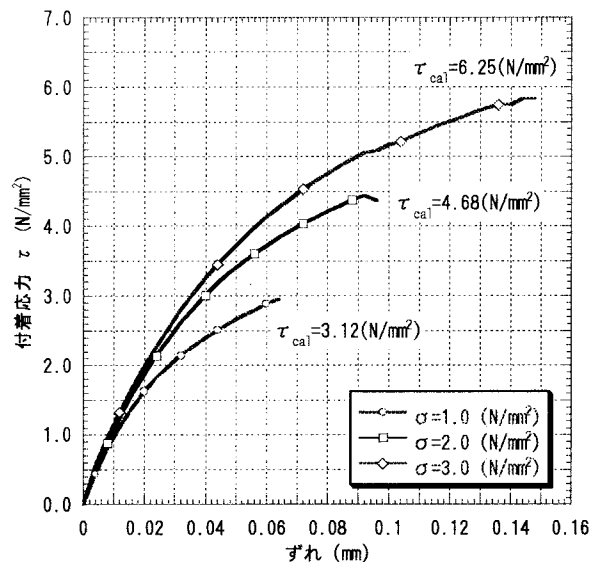


図-16 線状突起付き鋼板の付着強度

4.3 縞鋼板の付着強度

縞鋼板の付着強度を算定するために図-7 に示す縞鋼板をモデル化した。縞鋼板のモデルを図-17 に示す。突起高さ $h_f=2mm$ 、Uボルト1個当たりの付着面積 (長さ $L=280mm$ 、幅 $b=250mm$) をモデル化し、コンクリートの圧縮強度は $f_c=30.0N/mm^2$ である。図-14 と同様に摩擦係数 $\mu=0.6$ を定義した接触解析であり、鋼板を Shell 要素 (突起を Solid 要素)、コンクリートを Solid 要素とした。

本解析では、Uボルトが鋼板-コンクリート間のせん断力に対して抵抗しないことと剥離を抑えることを再現するために、コンクリート上面にUボルトの引張力一伸びの関係に相当するバネを配置した (図-18)。

図-19 に縞鋼板の付着応力-ずれの関係を示す。図より、数値解析によればUボルトを組み合わせた縞鋼板の

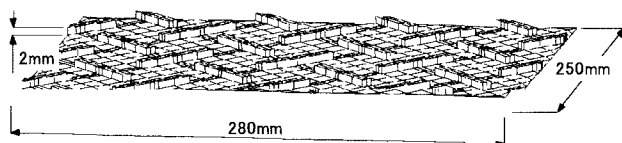


図-17 モデル化した縞鋼板

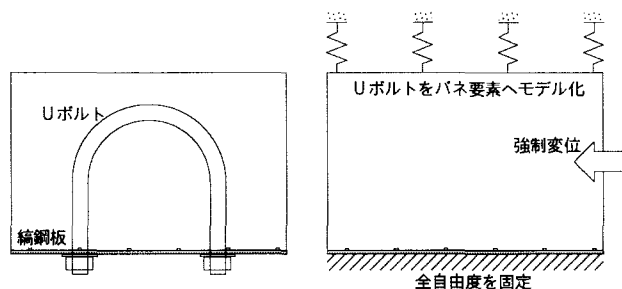


図-18 モデル化の概念図

付着強度は、 4 N/mm^2 程度であることが判明した。

図-15 と図-18 のモデル化の違いは、図-15 では一定の側圧作用下であるが、図-18 ではずれの増大とともに U ボルト（バネ要素）による拘束力が大きくなる。したがって、拘束力を付着面積で除した拘束圧である側圧とずれの関係を図-19 に示す。この図より、ずれの初期段階においては、バネ要素（U ボルト）による側圧はほとんどないものの、 0.005 mm 以降ほぼ一定勾配で側圧が高くなることが分かった。

図-19 中の付着応力の初期勾配から判断して、縞鋼板のずれ剛性（ずれとずれを発生される力の関係）は大きいと判断できるが、鋼板から剥離し始める 0.005 mm 以降は U ボルトによって小さな拘束圧（最大 0.25 N/mm^2 ）が発生することにより、 4 N/mm^2 程度の付着強度が得られることが分かった。

次に、図-7 の床版供試体で、鋼板－コンクリート間に発生するせん断応力を算定した。本供試体は単純支持の 1 方向スラブであることから、コンクリート標準示方書¹¹⁾の式(2)に示した有効幅 b_e のはりと考えた。

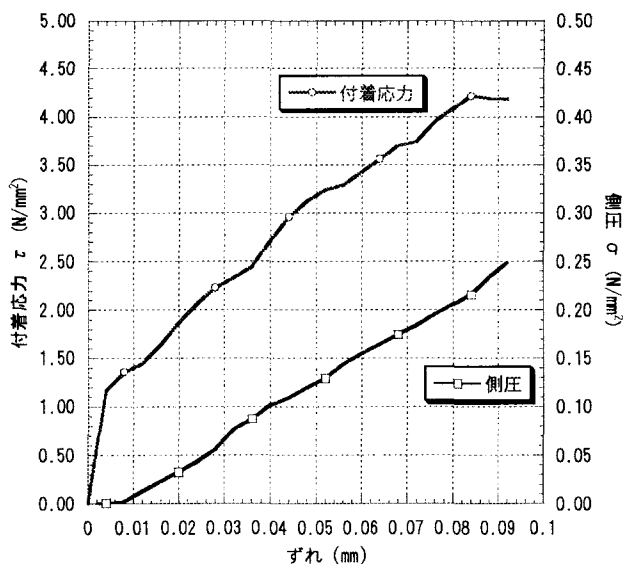


図-19 縞鋼板の付着応力、側圧とずれの関係

① $c \geq 1.2x(1-x/l)$ の場合

$$b_e = v + 2.4x(1-x/l)$$

式(2)

② $c < 1.2x(1-x/l)$ の場合

$$b_e = c + v + 1.2x(1-x/l)$$

c : 集中荷重の分布幅の端からスラブ自由縁までの距離

x : 集中荷重の作用点から最も近い支点までの距離

l : スラブのスパン

u : 載荷幅（主鉄筋方向）， v : 載荷幅（配力鉄筋方向）

式(2)より、 $b_e = 1640 \text{ mm}$ のはりと考え、鋼板－コンクリート間のせん断応力を式(3)によって算定した。

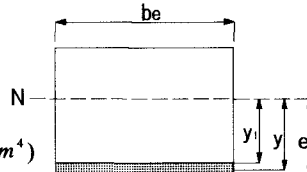
$$\tau = \frac{QG_1}{Ib_e} \quad \text{式(3)}$$

$$G_1 = \int_{y_1}^e y dA = \int_{y_1}^e y b_e dy$$

Q : せん断力(N)

I : 断面 2 次モーメント(mm^4)

b_e : はり幅(mm)



その結果、床版支間中央に荷重 157 kN 載荷時のせん断応力は 0.30 N/mm^2 であり、 392 kN 載荷時においても 0.83 N/mm^2 となった。

したがって、設計において想定するせん断応力は U ボルトとの組み合わせによる縞鋼板の付着強度に比べて極めて小さく、十分に安全であると判断できる。ただし、今回は数値解析のみによる検討であり、試験による実証が必要であると考えられる。

5. まとめ

鋼板・コンクリート合成床版において、RC部材の異形鉄筋と同様に、突起による付着性能が期待できる縞鋼板を底鋼板に用いた合成床版（U-Bolt 床版）の構造特性、特に縞鋼板の付着性能に着目した検討を行った。

これらのことをまとめると以下のとおりである。

- (1) はり供試体の繰返し載荷試験より、普通鋼板を用いた場合には、曲げひび割れが発生したものの、縞鋼板を用いた場合には、曲げひび割れの発生はなかった。
- (2) はり供試体の試験結果、床版供試体の試験結果より判断して、U ボルトには鋼板とコンクリートの剥離防止、縞鋼板には境界面の水平せん断力の伝達を期待することは十分に妥当である。
- (3) 線状突起付き鋼板の付着強度評価式と数値解析の結果を比較すると、ほぼ一致することから判断して、数値解析によって付着強度を評価できることが明らかとなった。
- (4) (3) と同様に、数値解析によって U ボルトを組み合わせた縞鋼板の付着強度を求めたところ、 4 N/mm^2 程度であることが分かった。
- (5) 輪荷重走行試験に用いた床版供試体に輪荷重 157 kN が載荷された場合に発生する水平せん断応力を設計計算したところ 0.30 N/mm^2 であり、縞鋼板の付着強度と比較すると極めて小さいせん断応力であることが判明した。

参考文献

- 1) 松井繁之, 西川和廣, 大田孝二: R C床版とその損傷, 橋梁と基礎, 1998.5~6.
- 2) 土木学会: 鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物, 1997.
- 3) 松井繁之, 文 允景, 福本嘸士: 鋼板・コンクリート合成床版中のスタッドの疲労性状について, 土木学会, 構造工学論文集, Vol.39A, 1993.3.
- 4) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説, 1993.4.
- 5) 関口幹夫, 穴戸 薫, 川島 力: 縞鋼板を用いた鋼板合成床版の実験的研究, 土木学会, 第40回年次学術講演会概要集, V-210, 1985.
- 6) 山田岳史, 沼田 克, 岡本安弘, 松井繁之: 縞鋼板とUボルトをずれ止めに用いた鋼板・コンクリート合成床版の構造特性, 土木学会, 第三回道路橋床版シンポジウム講演論文集, 2003.6.
- 7) Diana/Nonlinear Analysis User's manual Release 7.
- 8) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, 2002.3.
- 9) W.F.Chen: Plasticity in Reinforced Concrete, McGraw-Hill International Book Company, 1982.
- 10) 園田恵一郎, 鬼頭宏明, 中島一男: 突起付き鋼板の附着特性に関する実験的研究, 土木学会, 第3回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, 1995.11.
- 11) 土木学会: コンクリート標準示方書[構造性能照査編], 2002.3.