

サンドイッチ型複合床版付き合成桁の曲げ耐荷性能に関する研究

Flexural strength of composite beams with a steel-concrete composite sandwich slab

阿部幸夫*, 奥井義昭**, 張俊業***, 長井正嗣****, 井澤衛*****

Yukio Abe, Yoshiaki Okui, Chong Jion Yiat, Masatsugu Nagai, Mamoru Izawa

*工修, 住友金属工業(株), 建設技術部 (〒314-0255 茨城県鹿島郡波崎町砂山 16-1)

**工博, 埼玉大学助教授, 工学部建設工学科 (〒338-0825 埼玉県浦和市下大久保 255)

***埼玉大学大学院, 理工学研究科建設工学専攻 (〒338-0825 埼玉県浦和市下大久保 255)

****工博, 長岡技術科学大学教授, 工学部環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

*****工修, 住友金属工業(株), 土木・橋梁技術部 (〒100-8113 東京都千代田区大手町 1-1-3)

The considered steel-concrete composite sandwich slab consists of structural tees welded on a bottom plate at regular intervals, covering plates on the upper surface of structural tees, and cast-in-place concrete filled into the spaces. The flexural strength of composite beams with the steel-concrete composite sandwich slab is investigated experimentally. Loading tests are conducted to obtain the flexural strength of the composite beams with the sandwich slab under both positive and negative bending moments. The ultimate strength evaluated with the rigid plastic analysis is compared with the experimental result. Finite element analysis is carried out to simulate the local buckling occurred in the covering plate under compression due to the positive bending moment.

Key Words : composite sandwich slab, composite beam, flexural strength

キーワード: サンドイッチ型複合床版, 合成桁, 曲げ強度

1. はじめに

近年, 鋼橋の上部工では, 合理化設計による工費削減の観点から, 耐久性の高い床版の適用を前提とした連続合成桁の採用が増えている. この場合, 床版には, 一般的にプレストレストコンクリート床版 (以下, PC床版と呼ぶ) が用いられている.

著者らは, PC床版と同等以上の耐久性を有する鋼・コンクリートサンドイッチ型複合床版の開発を行ってきた^{1), 2)}. 合成桁に本床版を適用した場合, PC床版を用いた構造と比べて以下の利点があると考えられる.

- ① 現場で鋼殻内に中詰めした高流動コンクリートのクリープおよび硬化収縮は普通コンクリートの半分程度³⁾であり, 床版の収縮に伴う鋼桁への応力移行が小さい
- ② PC床版の鉄筋量以上の断面積を持つ鋼殻部により, 連続合成桁の中間支点部の負曲げに対して有利な設計ができる
- ③ 床版施工において, 型枠支保工やプレストレスの導入作業が無く, 施工の省力化が図れる

しかし, サンドイッチ型複合床版の合成桁への適用性を検証するにあたり, 合成桁としての曲げ耐荷挙動, ならびに床版のクリープ・硬化収縮が合成桁に与える影響を調査する必要がある.

本研究は, サンドイッチ型複合床版を用いた合成桁の曲げ耐荷特性に着目し, 曲げ圧縮力作用時の床版単体の挙動を明らかにする床版単体圧縮載荷実験, ならびに, 合成桁の曲げ耐荷性能を調査する合成桁曲げ載荷実験を行った. また, 実験において生じた床版上面のデッキプレート⁴⁾の浮き上がり現象が, 床版の疲労耐久性や舗装の健全性に影響を与える場合も考えられるため, この挙動を把握できる FEM 解析モデルを構築し, この解析法を用いて実橋構造のデッキプレートに配置するスタッドジベルの間隔を検討したので報告する.

2. 合成桁の構造

サンドイッチ型複合床版を用いた合成桁は, 図-1に示すように, 工場で底鋼板の主桁直交方向 (橋軸直角方向) にCT形鋼を溶接し, CT形鋼のフランジ上にデッ

キプレートを溶接により接合して、この床版鋼殻パネルを施工現場に搬入し、鋼桁上に敷設後、鋼殻内に高流動コンクリートを充填することにより形成する。なお、床版底鋼板が鋼桁上で開口され、そこに鋼桁上に設置されたスタッドジベル等のずれ止めが配置されることから、床版本体への高流動コンクリート充填の際に床版と鋼桁との連結も同時に行える。

床版パネル相互の橋軸方向の接合は、図-2に示すように、床版鋼殻パネル架設後、パネル間の底鋼板同士をボルトで引張接合し、デッキプレートパネル端部のCT形鋼間に溶接で取付け、鋼殻内に高流動コンクリートを充填することにより行う。

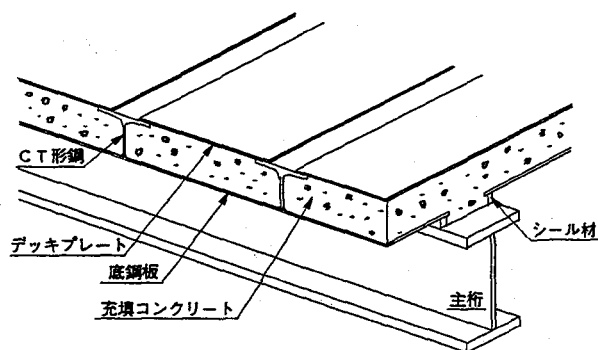


図-1 サンドイッチ型複合床版合成桁概略図

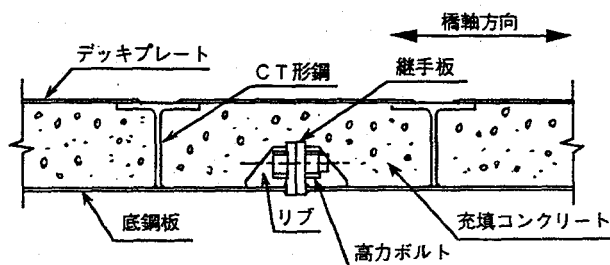


図-2 床版パネル間接合部構造

3. 実験概要

3.1 床版単体圧縮載荷実験

(1) 供試体

合成桁に正曲げが作用した場合、サンドイッチ型複合床版には橋軸方向に圧縮力が作用する。このときに生じるデッキプレートの浮き上がり挙動の調査を目的として実験を行った。

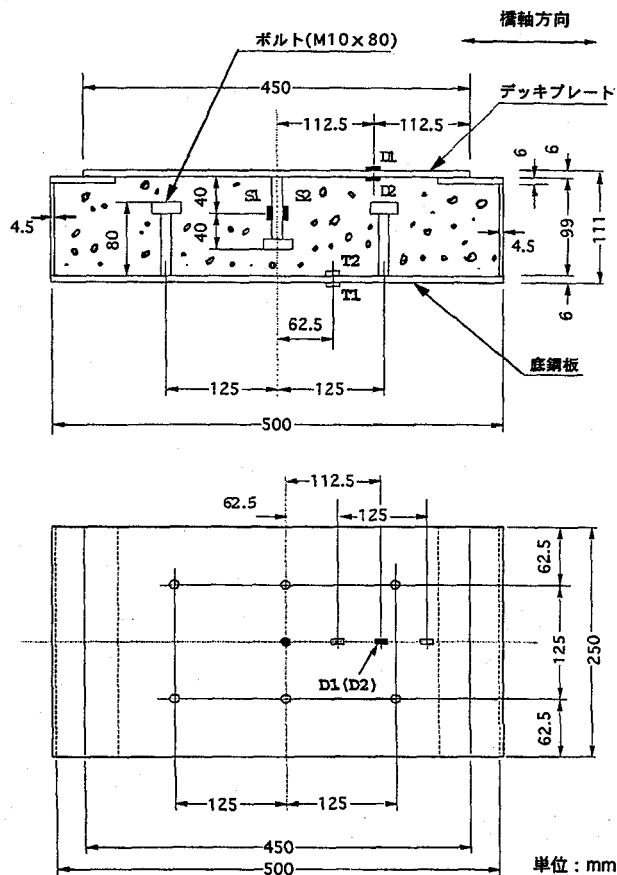
供試体は、床版のＣＴ形鋼により区切られる区画（セルと呼ぶ）１つを対象とし、荷重条件をＢ活荷重⁴⁾とする床版支間 8m の単純板で設計した床版モデルの 1/2 縮尺とした。なお、床版厚は、デッキプレートの浮き上がり挙動に対する影響が小さいと考え、実験装置の載荷能力の制約から、実構造 300mm の約 1/3 縮尺 (111mm) とした。

供試体の形状は、図-3に示すように、C T形鋼間隔500mm、橋軸直角方向幅250mm、床版厚111mm、デッキプレートおよび底鋼板の板厚6mmである。なお、供試体の側面には鋼板を設置していない。

デッキプレートの中央には、実構造を想定してスタッドジベル（φ 10, ｌ 80mm）を1本配置し、実験対象外の底鋼板には、浮き上がりが生じないように、同様のスタッドジベルを6本配置した。

使用した鋼板はすべて SS400 材、充填コンクリートの設計基準強度は 30N/mm^2 とした。材料試験の結果、デッキプレートおよび底鋼板の降伏点は 275N/mm^2 、実験時のコンクリートの圧縮強度は 42N/mm^2 であった。

なお、供試体の充填コンクリートには高流動コンクリートに比べてヤング係数の小さい普通コンクリートを用いた。これは、コンクリートのヤング係数が小さくなるとデッキプレートの浮き上がりが大きくなると考えられ、浮き上がりが生じやすい方向で実験したことによる。



圖一3 床版単体圧縮載荷実験供試体

(2) 載荷方法および計測内容

載荷は、200tf 万能試験機を用い、図-3 に示す橋軸方向に圧縮力を静的に単調載荷した。

変位計測位置を図-4に示す。橋軸方向（CT形鋼間）の圧縮変位を供試体のコンクリート両側面 δ_1 、 δ_2 について計測した。また、デッキプレートの浮き上がり量をスタッドジベル位置 δ_4 とその両側 δ_3 、 δ_5

について計測した。さらに、図-3に示すように、デッキプレート D1, D2, 底鋼板 T1, T2 およびスタッドジベル S1, S2 のひずみをひずみゲージにより計測した。

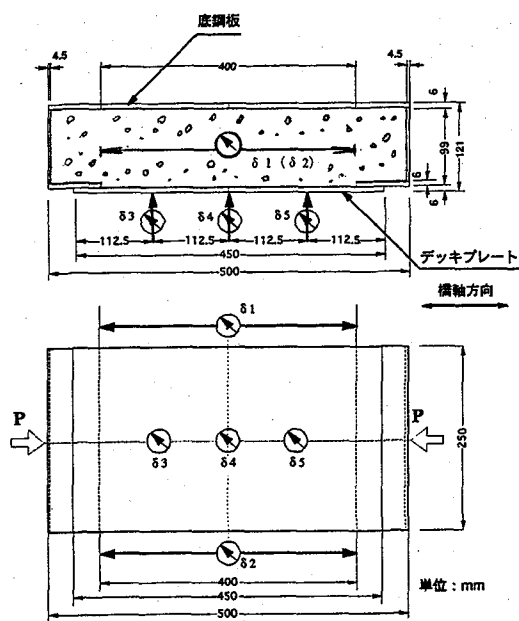


図-4 変位計測位置 (床版単体圧縮荷重実験)

3.2 合成桁曲げ荷重実験

(1) 供試体

本実験は、サンドイッチ型複合床版付き合成桁の橋軸方向曲げに対する耐荷挙動を実験的に明らかにすることを目的とする。

供試体は、支間中央部を想定した正曲げモーメント用と、連続桁の中間支点部を想定した負曲げモーメント用の2体とした。図-5、図-6に供試体の概要を示す。

供試体の橋軸方向長さは正曲げ 7.8m、負曲げ 5.7m とし、溶接組立された桁高 300mm の鋼桁 2 本の上に橋軸直角方向幅 500mm の床版を設置した。

床版の断面形状は、どちらの供試体も床版単体圧縮荷重実験に合わせ、C T形鋼間隔 (セル幅) 500mm, 床版厚 111mm, デッキプレートおよび底鋼板の板厚 6mm とした。なお、供試体の床版側面には鋼板を設置していない。また、各セルの中央にスタッドジベル (φ 10, ℓ 80mm) をデッキプレートに 2 本 (橋軸直角方向ピッチ 250mm), 底鋼板に 1 本配置した。また、実構造を想定し、底鋼板は鋼桁フランジ上で切欠き、底鋼板と鋼桁フランジとの間に 10mm 厚のシーラ材を介在させた。床版と鋼桁との接合は、図-5の A-A断面に示すように、

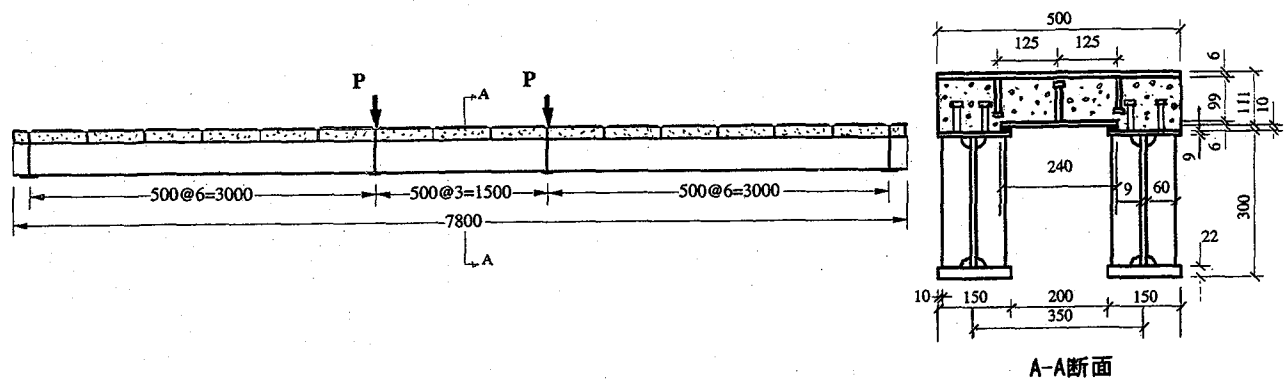


図-5 合成桁正曲げ荷重実験供試体

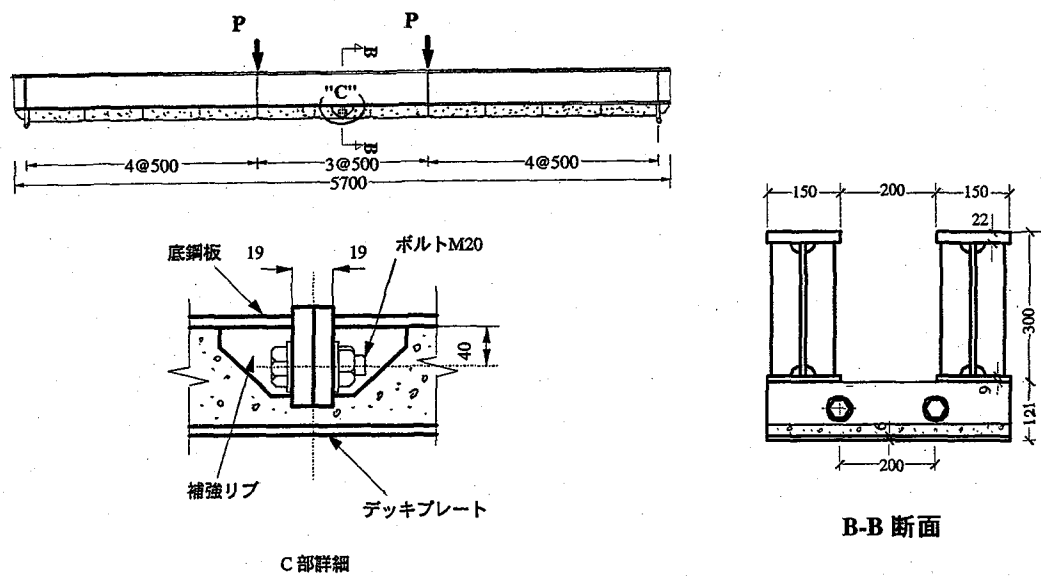


図-6 合成桁負曲げ荷重実験供試体

鋼桁断面のフランジ上に設置した4本のスタッドジベル（ $\phi 16$, 270mm ）を、橋軸方向に所定ピッチ（正曲げ供試体 250mm , 負曲げ供試体 100mm ）で設置することにより行った。また、2本の鋼桁の間には、横倒れ座屈を防止するための補強板を鋼桁下フランジ下面に離散的に設置した。また、載荷位置および支点位置の鋼桁ウェブに垂直補剛材を取り付けた。

負の曲げモーメントにより床版の橋軸方向に引張力が作用する場合、パネル間の接続部が弱点になる可能性が考えられる。よって、図-6に示すように、負曲げ供試体の中央のセルにのみ、ボルト（M20, F10.9）を2本配置する引張ボルト継手を設けた。なお、このセルのデッキプレートおよび底鋼板には、継手部のスペースの関係でスタッドジベルを設置していない。

使用した鋼板はすべて SS400 材とした。また、充填コンクリートには床版単体圧縮載荷実験と同様の考え方により普通コンクリートを用い、その設計基準強度を 30N/mm^2 とした。材料試験の結果、デッキプレートおよび底鋼板の降伏点は 346N/mm^2 , 鋼桁の上フランジの降伏点は 314N/mm^2 , 同下フランジは 282N/mm^2 であった。また、実験時のコンクリートの圧縮強度は正曲げ供試体が 37N/mm^2 , 負曲げ供試体が 36N/mm^2 であった。

（2）載荷方法および計測内容

載荷は、正曲げ供試体を支点スパン 7.5m , 負曲げ供試体を支点スパン 5.5m で単純支持し、どちらも載荷スパン 1.5m の2線載荷により静的に単調載荷した。

変位計測位置を正曲げ供試体について図-7に、負曲げ供試体について図-8に示す。両供試体とも供試体中央の鉛直たわみ δ_1 を計測した。さらに、正曲げ供試体はデッキプレートの浮き上がり量 δ_2 , δ_3 （図-9の A, H の位置に相当）を求めるため、浮き上がりが生じない CT 形鋼フランジを変位計固定端とし、図-7のように変位計をセットして CT 形鋼フランジとデッキプレートとの相対変位を計測した。また、負曲げ供試体は継手ボルト間の中央位置での目開き量 δ_2 を計測した。発生ひずみは、床版鋼殻部および鋼桁について計測した。

4. シミュレーション解析の概要

4.1 目的

サンドイッチ型複合床版付き合成桁に正曲げモーメントが作用するとき、橋軸方向に圧縮力を受けたデッキプレートは上に浮き上がろうとする。これを抑制するため、床版のデッキプレートにはスタッドジベルを設置している。

本解析は、合成桁正曲げ載荷実験により生じたデッキプレートの浮き上がり現象をシミュレートし、解析法の妥当性を検証した上で、実構造に設置するスタッドジベルの配置を解析的に検討するために実施するものである。

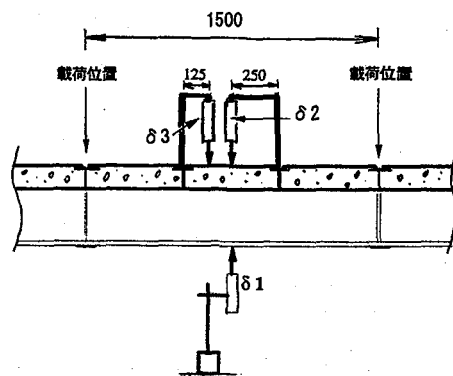


図-7 変位の計測位置（正曲げ供試体）

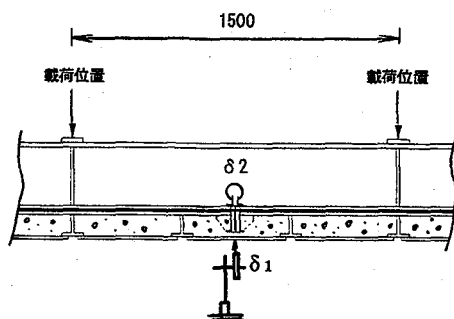


図-8 変位の計測位置（負曲げ供試体）

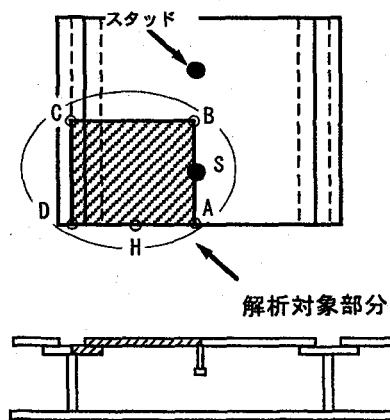


図-9 合成桁正曲げ供試体の解析モデル

4.2 解析内容

浮き上がりが生じるデッキプレートに対して幾何学的非線形性を考慮した3次元弾塑性 FEM 解析を行った。解析には、汎用プログラム DIANA⁵⁾を用いた。

解析モデルは、対称性を考慮し、供試体のデッキプレートと CT 形鋼フランジについて、図-9に示す斜線部分を対象とした。なお、解析の目的はデッキプレートの浮き上がり挙動の解明であることから、浮き上がりに影響を与えない CT 形鋼ウェブと底鋼板は無視した。さらに、充填コンクリートはデッキプレートへの付着効果により浮き上がりに対して抑制方向に作用するが、ここで

は安全側に充填コンクリートも無視した。解析モデルのメッシュ図を図-10、側面図を図-11、材料定数および弾塑性モデルを表-1に示す。

デッキプレートおよびC T形鋼フランジは、図-10に示すように、板厚中心位置で4節点のシェル要素にモデル化した。また、両部材を連結しているすみ肉溶接部は、剛要素を用いて図-11のように高さ6mmの鉛直部材にモデル化した。

スタッドジベル位置の節点は完全固定とした。これは、スタッドジベルがコンクリートにより十分拘束され、さらにコンクリートもCT形鋼により橋軸方向ずれが拘束されていることから、スタッドジベルに抜け出し方向やせん断方向のずれはほとんど生じないと考えたことによる。解析モデルの境界条件を表-2に示す。

デッキプレートは、溶接やコンクリートの充填圧の影響により載荷前から外側に変形していることが考えられる。そこで、解析ではこの変形を初期不整として(1)式により与えた。

$$U_z = A \cos (\pi Y / 2 L) \quad \cdots (1)$$

U_z : 初期不整量

A: 最大初期不整量 (供試体の実測から 1.0mm)

Y: 橋軸方向座標

L: セル幅の 1/2 (250mm, 図-10 参照)

デッキプレートに作用させる圧縮荷重は、図-11の通り、デッキプレートにつながるC T形鋼フランジにY軸方向の強制変位を与えることで導入した。

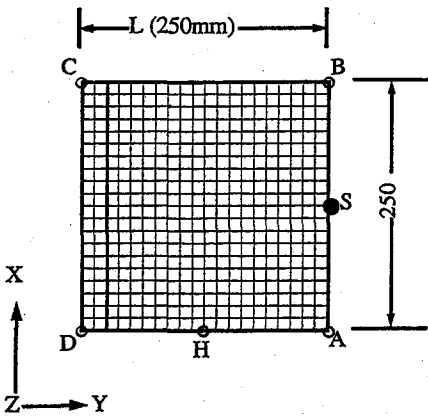


図-10 解析メッシュ図

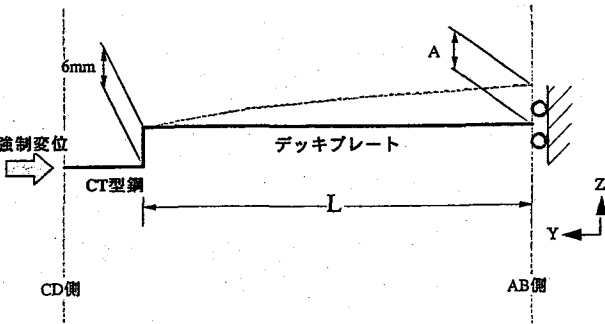


図-11 解析モデル側面図

表-1 材料定数および弾塑性モデル

項目	設定値
鋼材の降伏点 σ_y	材料試験結果より 346 N/mm ²
鋼材のヤング率 E_s	2.0×10^5 N/mm ²
ポアソン比 ν	0.3
2次勾配	$E_s / 100$
降伏条件	Von Mises
硬化則	等方硬化則

表-2 境界条件

位置	変位	回転
スタッド部	$\delta x = \delta y = \delta z = 0$	$\theta x = \theta y = \theta z = 0$
AB側	$\delta y = 0$	$\theta x = \theta z = 0$
CD側	$\delta x = \delta z = 0$	$\theta x = \theta y = \theta z = 0$
BC側	$\delta x = 0$	$\theta y = \theta z = 0$

5. 実験および解析結果

5.1 床版単体圧縮載荷実験

(1) 床版の橋軸方向剛性

荷重と橋軸方向圧縮変位 (δ_1 と δ_2 との平均) との関係を図-12に示す。図中の計算値は、デッキプレートが座屈発生により板厚全強分の荷重伝達が見込めないと仮定してこれを無視し、底鋼板とコンクリートのみからなる組合せ部材 (材料試験結果から鋼材とコンクリートとのヤング係数比 E_s/E_c を 6.5 として算出) とした場合の剛性である。また、デッキプレートを無視した考え方でコンクリートの応力が許容圧縮応力度 10N/mm² となるときの計算値許容荷重 338kN も記入した。

実験の結果から、許容荷重 338kN の 1.3 倍に相当する 450kN まで、実験値の剛性がデッキプレートを無視した計算値剛性とほぼ一致した。これは、載荷の初期からデッキプレートに浮き上がりが発生し、圧縮力に対するデッキプレートの分担が低下するためである。その後、実験値剛性はさらに低下しているが、これはコンクリートが徐々に塑性化した影響と考えられる。また、破壊形態は、990kN でコンクリートが圧壊して終局となった。

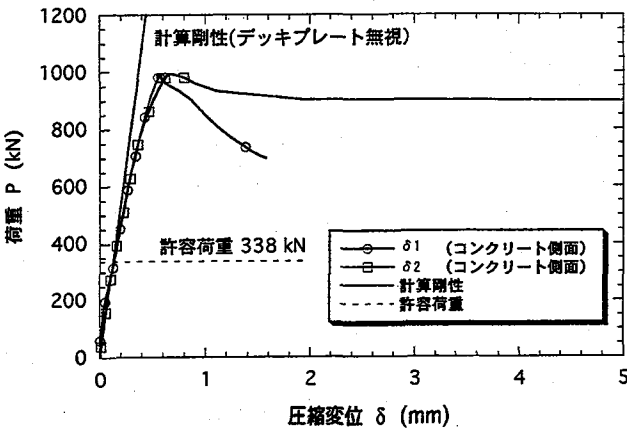


図-12 荷重と圧縮変位との関係

(2) デッキプレートの浮き上がり量

荷重とデッキプレートの浮き上がり量 (δ 3 ～ δ 5) との関係を図-13に示す。

スタッドジベルの両側に位置するデッキプレートの δ 3 および δ 5 の浮き上がりは、載荷荷重 100 ～ 200kN 辺りから発生し始め、デッキプレートを無視した許容荷重 338kN 作用時で、それぞれ 0.6mm, 0.25mm であった。

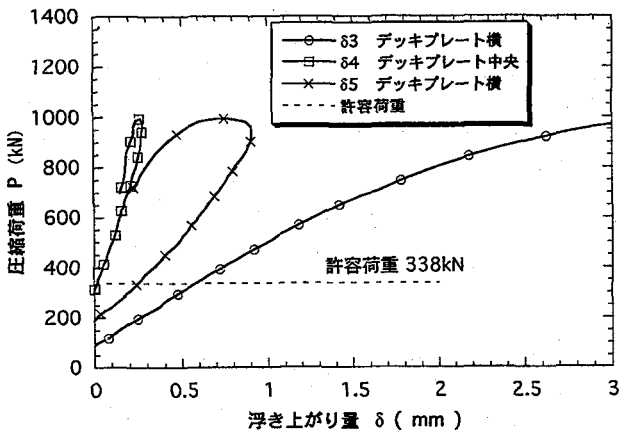


図-13 荷重とデッキプレート浮き上がり量との関係

(3) デッキプレートの発生ひずみ

図-3に示す D1, D2 のひずみから求めた荷重とデッキプレートの軸ひずみ ϵ_a および曲げひずみ ϵ_b との関係を図-14に示す。

載荷の初期からデッキプレートに曲げひずみ ϵ_b が発生しており、この結果からデッキプレートに浮き上がりの傾向があることが確認できる。

一方、載荷荷重の増加に伴い軸ひずみ ϵ_a がほぼ線形的に増加している。このことから、デッキプレートは、浮き上がり現象が見られるものの、最大荷重レベルまで、供試体に作用する圧縮力の抵抗部材としてある程度は寄与できていることが判る。

(4) 底鋼板の発生ひずみ

図-3に示す T1, T2 のひずみから求めた荷重と底鋼板の軸ひずみ ϵ_a および曲げひずみ ϵ_b との関係を図-15に示す。

軸ひずみ ϵ_a は荷重と共に線形的に増加しているのに対して曲げひずみ ϵ_b は最大荷重レベルまでほとんど生じていない。この結果から、実験計画段階で意図した通り、計測位置の底鋼板には浮き上がりが生じていなかった。

(5) スタッドジベルの発生ひずみ

図示していないが、図-3の S1, S2 のひずみからスタッドジベルに生じた軸ひずみは、許容荷重 338kN のときで 100 μ 以下、最大荷重の時で 350 μ 程度の値であった。

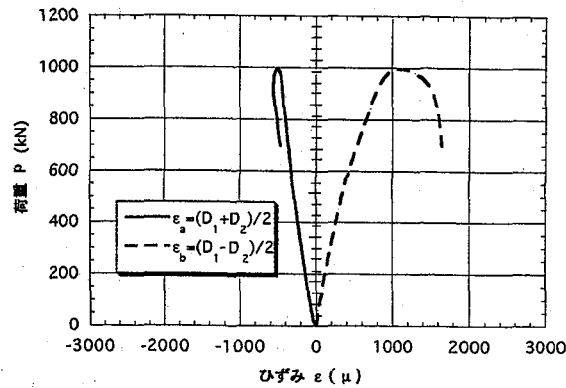


図-14 荷重とデッキプレートひずみとの関係

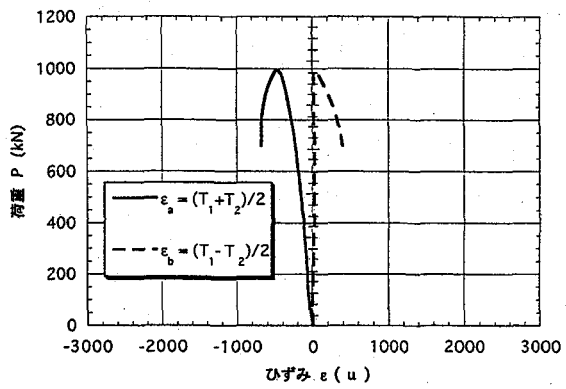


図-15 荷重と底鋼板ひずみとの関係

5.2 合成桁正曲げ載荷実験

(1) 曲げ変形特性

荷重と供試体の支間中央たわみ δ 1 との関係を図-16に示す。図中の Pu1 ～ Pu3 は、合成桁の終局荷重を全塑性曲げモーメントにより算出したもので、Pu1 (297kN) は合成桁の全断面を有効とした場合、Pu2 (261kN) は合成桁断面において床版のデッキプレートのみ無視した場合、Pu3 (251kN) は合成桁断面において床版のデッキプレートと底鋼板を無視した (床版は充填コンクリートのみ有効とした) 場合である。

この終局荷重算定の際、曲げ引張りを受ける鋼桁下フランジの降伏強度ならびに曲げ圧縮を受けるコンクリートの圧縮強度は材料試験により求めた 282N/mm², 37N/mm² を用いた。なお、鋼材の応力-ひずみ曲線において降伏後のひずみ硬化の影響は無視した。また、コンクリートの応力-ひずみ曲線は、コンクリート標準示方書⁹⁾のモデルに準じた。

また、床版のデッキプレートを無視した合成桁断面において、床版のコンクリート上面が許容圧縮応力度 10N/mm² を示すときの計算値 Pac (53kN) および鋼桁下フランジが許容引張応力度 140N/mm² を示すときの計算値 Pas (111kN) も併記した。

実験における破壊挙動は、載荷荷重 281kN のときに、曲げ圧縮による床版の充填コンクリートの圧壊で終局となった。この最大荷重は、床版のコンクリートが許容圧縮応力度を示すときの計算値 P_{ac} (53kN) の 5.3 倍、鋼桁が許容応力度を示すときの計算値 P_{as} (111kN) の 2.5 倍に相当する。

また、この最大荷重は、全断面有効の P_{u1} (297kN) とデッキプレートが無視した P_{u2} (261kN) との中間的な値を示した。これは、床版単体圧縮載荷実験と同様に、デッキプレートが浮き上がり、圧縮力に対して十分抵抗できなかったためである。

よって、今回の実験結果から合成桁の正曲げに対する耐荷力は、安全側を考えると、床版のデッキプレートのみ無視した合成桁断面の全塑性曲げモーメント P_{u2} で評価するのが妥当と思われる。

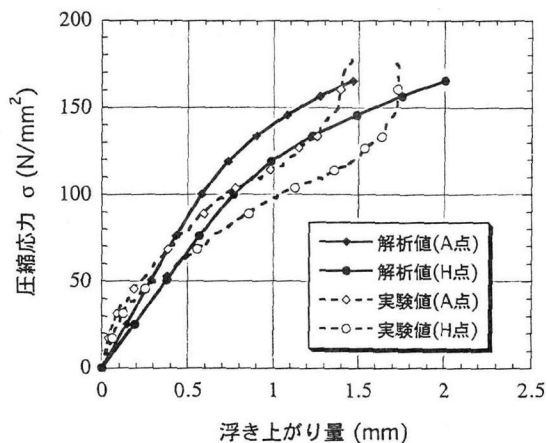


図-17 デッキプレートの発生応力と浮き上がり量との関係

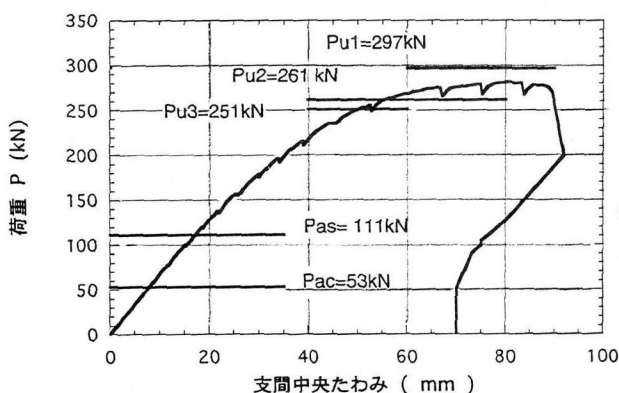


図-16 荷重と支間中央たわみとの関係

(2) デッキプレートの浮き上がり量

デッキプレートに生じた平均圧縮応力と、図-9 に示した解析モデルの A 点（供試体計測位置 δ 2）および H 点（供試体計測位置 δ 3）の浮き上がり量との関係を図-17 に示す。なお、この図には FEM 解析による結果も併記した。また、FEM 解析により得られたデッキプレートの浮き上がり変形の様子を図-18 に示す。

図-17 より、実験で生じたデッキプレートの浮き上がり現象は、デッキプレートの平均圧縮応力が 60N/mm^2 程度まで実験値が解析値を下回っていた。よって、この範囲内であれば今回適用した FEM 解析により浮き上がり量を安全側に評価できることが判った。

床版デッキプレートが無視した合成桁断面において、床版のコンクリート上面が許容圧縮応力度 10N/mm^2 を示すときの曲げモーメントを算定し、この曲げモーメントを実験供試体に実際に作用させた際に生じるデッキプレートの平均圧縮応力は 26N/mm^2 である。

前述より、浮き上がり量を安全側に評価可能なデッキプレートの平均圧縮応力範囲 60N/mm^2 は、床版コンクリートが許容圧縮応力度を示す時にデッキプレートに生

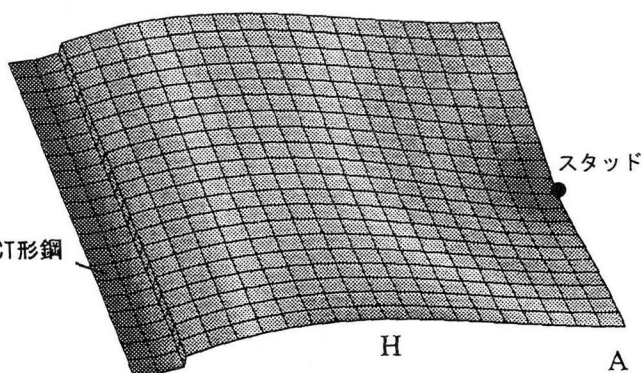


図-18 デッキプレートの浮き上がり変形の様子

じる応力 26N/mm^2 の 2.3 倍に相当する。よって、設計範囲を床版コンクリートが許容圧縮応力度以下を示すときと考えると、今回の FEM 解析による方法でデッキプレートの浮き上がり現象を評価して問題ないと思われる。

5.3 合成桁負曲げ載荷実験

(1) 曲げ変形特性

荷重と供試体の支間中央たわみ δ 1 との関係を図-19 に示す。図中の P_{u1} (360kN) は、合成桁の終局荷重を全塑性曲げモーメントにより算定したもので、合成桁断面を床版の充填コンクリートのみ無視し、すべての鋼材を有効として求めている。なお、終局荷重算定の際、先に降伏となる鋼桁下フランジの降伏強度は、材料試験により求めた 282N/mm^2 を使い、鋼材の応力-ひずみ曲線における降伏後のひずみ硬化の影響は無視した。

また、床版のコンクリートが無視した合成桁断面において、床版のデッキプレートが許容引張応力度 140N/mm^2 を示すときの計算値 P_{as} (127kN) も図に併記した。

実験は、載荷荷重 390kN 付近から鋼桁および床版デッキプレートの塑性変形が進行し、加えて継手部の目開

き量も増大した。これに伴い供試体の支間中央のたわみが増加し、当該部の変位が計測可能領域を越えたため実験を終了した。

最大荷重 412kN は、床版のデッキプレートが許容応力度を示すときの計算値 $P_{as}(127kN)$ に対して 3.2 倍の値を示した。また、この最大荷重値は、床版のコンクリートを無視し、鋼材のみを有効とした $P_{u1}(360kN)$ で安全側に評価できることが判った。

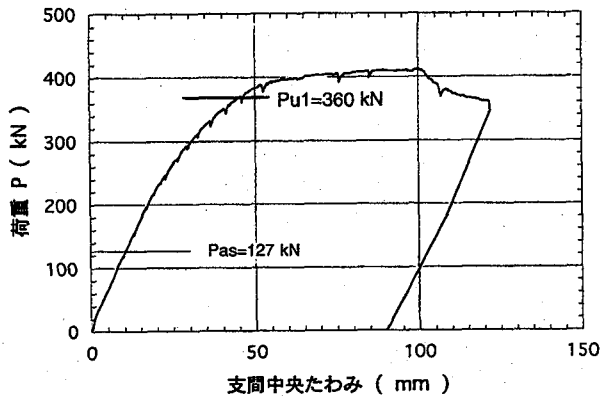


図-19 荷重と支間中央たわみとの関係

(2) 継手部目開き量

荷重と床版継手部の目開き量 δ 2 との関係を図-20 に示す。図中には、床版の充填コンクリートを無視した合成桁断面において、曲げ引張を受ける床版デッキプレートが許容応力度 $140N/mm^2$ を示すときの計算値 $P_{as}(127kN)$ も併記した。

これより、図中の P_{as} を設計荷重レベルと仮定すると、このときの目開き量は 0.2mm 以下と小さく、また、設計荷重の約 2 倍に相当する 250kN 載荷時でも目開き量は 0.4mm 程度であった。

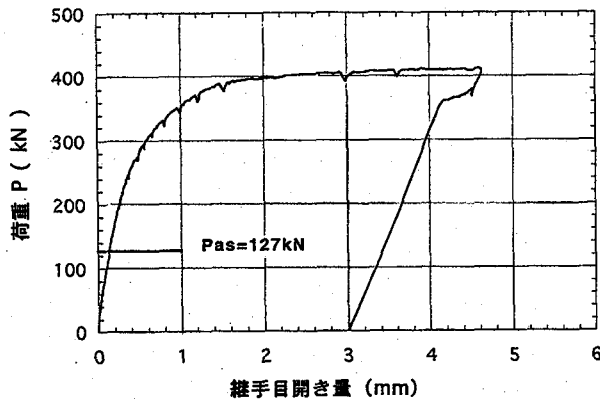


図-20 荷重と継手部目開き量との関係

6. スタッドジベルの配置に関する検討

床版支間 8m で試設計した実大構造の 1/2 縮尺（床版厚に関しては約 1/3 縮尺）の床版モデルを用いた合成桁

正曲げ載荷実験の結果、デッキプレートに浮き上がり現象が見られた。また、この挙動は、今回適用した解析方法により、充填コンクリートが許容圧縮応力度を示す荷重レベルの 2 倍程度まで安全側に評価できることが判った。

そこで、この解析方法が、床版支間 7m の実橋床版に対しても適用できるものと仮定して、デッキプレートに配置するスタッドジベルのピッチに関する検討を試みた。

6.1 解析内容

対象とする床版は、荷重条件を B 活荷重⁴⁾とする床版支間 7m の単純板で設計したもので、構造は図-21 に示すように、C T 形鋼間隔（セル幅）875mm、床版厚 293mm、デッキプレート厚および底鋼板厚 9mm である。

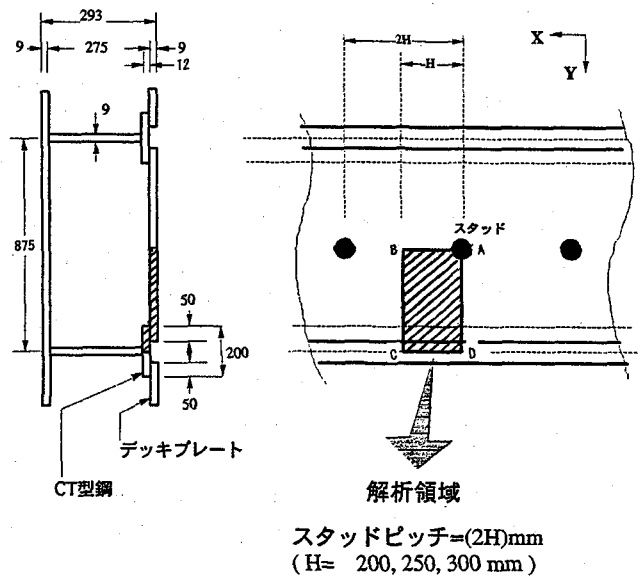


図-21 解析モデル

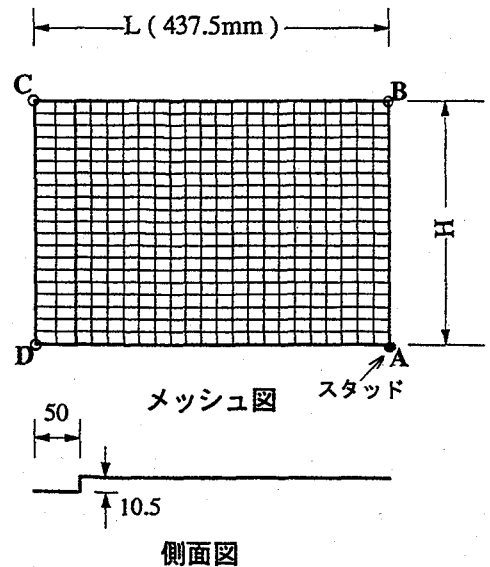


図-22 解析モデルのメッシュ図および側面図

解析モデルは、スタッドジベル1本を含む図-21に示す斜線部を対象としてモデル化した。解析モデルのメッシュ図および側面図を図-22に示す。

解析方法は、実験シミュレーション解析と同様に、幾何学的非線形性を考慮した3次元弾塑性FEM解析とし、CT形鋼ウェブ、底鋼板および充填コンクリートは無視した。鋼材の材料定数として与える降伏点は実橋に用いるSM400材の基準降伏点 235N/mm^2 とし、その他の材料定数および弾塑性モデルは表-1と同様とした。境界条件は、図-21のAD側の変位を $\delta x = 0$ 、回転を $\theta y = \theta z = 0$ とし、それ以外のスタッドジベル部ならびにAB側、CD側、BC側の境界条件は表-2と同様とした。また、用いた要素、初期不整の考え方ならびに荷重の与え方は、実験シミュレーション解析と同様とした。

解析のパラメータは、デッキプレートの最大初期不整量とスタッドジベルピッチとし、これらのパラメータがデッキプレートの浮き上がりを与える影響を調査した。

解析の種類を表-3に示す。

表-3 解析の種類

No.	最大初期不整量 A_x	スタッドジベルピッチ
①	0.0 mm	500 mm
②	1.0 mm	500 mm
③	1.5 mm	500 mm
④	2.0 mm	500 mm
⑤	3.0 mm	500 mm
⑥	2.0 mm	400 mm
⑦	2.0 mm	500 mm
⑧	2.0 mm	600 mm

6.2 解析結果

(1) 初期不整が浮き上がりを与える影響

表-3の解析ケース①から⑤に示す通り、スタッドジベルピッチを500mmとし、最大初期不整量 A_x をパラメータとした場合について、デッキプレートの平均発生圧縮応力と最大浮き上がり量との関係を図-23に示す。

なお、最大浮き上がりが発生した位置は、いずれの解析ケースも図-21のBC間であった。

鋼板とコンクリートとのヤング係数比 E_s/E_c を7とし、充填コンクリートが許容圧縮応力度 10N/mm^2 を示すときの1セル当たりのコンクリートの縮み量を求め、この値を強制変位としてデッキプレートに与えた場合に発生する鋼板平均圧縮応力 45N/mm^2 も図に記入した。

この圧縮応力がデッキプレートに作用する場合について、初期不整量が浮き上がり量を与える影響を図-23より考察すると、浮き上がり量は最大初期不整量 A_x が増加するとほぼ比例的に増えており、最大初期不整量が $0 \rightarrow 3.0\text{mm}$ まで増加すると浮き上がり量は $0.45 \rightarrow 0.6\text{mm}$ に増加した。しかしその浮き上がりの増加量は、初期不整量が1mm増加しても0.05mm程度と小さい。

これより、デッキプレートの初期不整量が浮き上がり量に与える影響は小さいといえる。

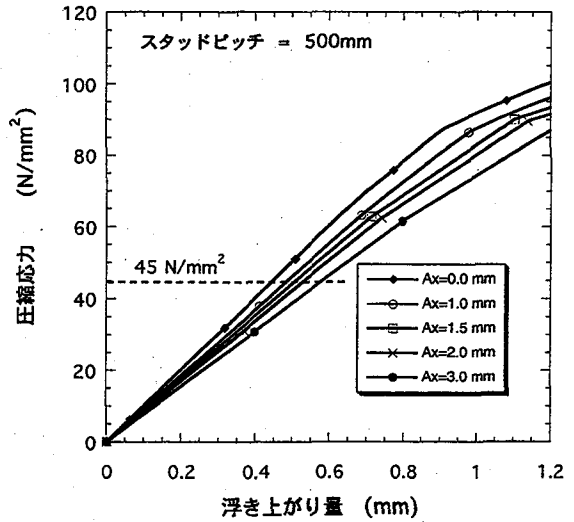


図-23 初期不整が浮き上がりを与える影響

(2) スタッドジベルピッチが浮き上がりを与える影響

表-3の解析ケース⑥から⑧に示す通り、最大初期不整量 A_x を2.0mmとし、スタッドジベルピッチをパラメータとした場合について、デッキプレートの平均発生圧縮応力と最大浮き上がり量との関係を図-24に示す。

最大浮き上がりが発生した位置は、いずれの解析ケースも図-21のBC間であった。

また、図-24には、充填コンクリートが許容圧縮応力度 10N/mm^2 を示すときのデッキプレートに生じる平均圧縮応力 45N/mm^2 も記入した。これより、デッキプレートがこの圧縮応力を示すときの浮き上がり量は、スタッドジベルのピッチが400～600mmの場合で、 $0.4 \sim 0.65\text{mm}$ であった。

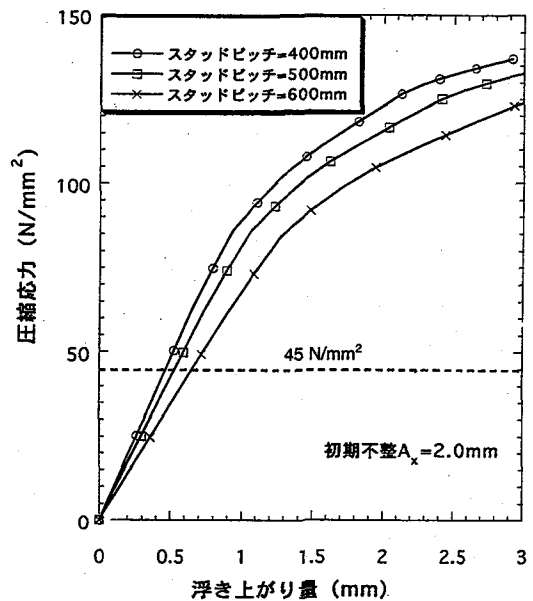


図-24 スタッドジベルピッチが浮き上がりを与える影響

デッキプレートの浮き上がりが、デッキプレート溶接部の疲労耐久性ならびに舗装の健全性にどのような影響を与えるかは今後の検討課題であるが、たとえば浮き上がり量の許容値を 0.5mm と仮定すると、セル幅が 875mm 以下でデッキプレート板厚が 9mm の場合、今回の解析結果から、スタッドジベルピッチは概ね 500mm 程度であればよいことが判った。

7. おわりに

本研究により得られた知見を整理すると以下のようになる。

- ① 今回実施したサンドイッチ型複合床版付き合成桁の正曲げ載荷実験結果から、連続合成桁の支間部に生じる正曲げに対し、本合成桁の曲げ耐荷性能は、浮き上がりが生じる床版のデッキプレートを無視した合成桁断面で抵抗するものとして安全側に評価できる。
- ② 同様構造の負曲げ載荷実験結果から、連続合成桁の中間支点部に生じる負曲げに対し、本合成桁の曲げ耐荷性能は、引張力が負担できない床版の充填コンクリートを無視した合成桁断面で抵抗するものとして安全側に評価できる。
- ③ 床版支間 8m として試設計された床版構造の橋軸方向に圧縮力が作用した場合、デッキプレートに生じる浮き上がり量は、今回適用した FEM 解析により、充填コンクリートが許容圧縮応力度を示す荷重レベルの 2 倍程度まで安全側に評価できる。
- ④ ③により得られた解析方法が床版支間 7m の実橋

床版に対しても適用できるものと仮定し、デッキプレートの浮き上がり量の許容値を 0.5mm と考えた場合、スタッドジベルピッチは、C T 形鋼間隔（セル幅）875mm 以下、デッキプレート板厚 9mm の場合で 500mm 程度である。

今後は、床版の充填コンクリートのクリープならびに硬化収縮（乾燥収縮・自己収縮）が鋼桁への応力移行に与える影響について調査する予定である。

参考文献

- 1) 阿部幸夫, 柳本泰伴, 井澤衛, 中川敏之: サンドイッチ型複合床版の力学的挙動, 鋼構造年次論文報告集第 4 巻, No. 63, pp.477-484, 1996.
- 2) 松井繁之, 池田良介, 阿部幸夫, 柳本泰伴, 井澤衛: サンドイッチ型複合床版の移動輪荷重に対する疲労強度特性, 土木学会第 52 回年次学術講演会講演概要集, I-A171, pp.340-341, 1997.
- 3) 阿部幸夫, 柳本泰伴, 井澤衛, 斎藤浩: サンドイッチ型複合床版に充填する高流動コンクリートのクリープおよび収縮性状, 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集, CS-49, pp.96-97, 1998.
- 4) 道路橋示方書・同解説, 日本道路協会, 1996.
- 5) 武藤厚: 鉄筋コンクリート構造物の弾塑性解析への DIANA 適用例, DIANA Conference No.2, 日本電子計算株式会社, 1996.
- 6) コンクリート標準示方書・設計編, 土木学会, 1996.
(1999 年 9 月 17 日受付)