

鋼製グリップを用いたトラス鉄筋合成床版のずれ止め性能と疲労耐久性

Shear Connect Characteristics and Fatigue Durability of Composite Deck with Mechanical Grip Truss Reinforcements

高林和生*, 小栗文泰**, 阪野雅則***, 石橋和美****, 平城弘一*****, 堀川都志雄*****, 松井繁之*****

Kazuo TAKABAYASHI, Fumiyasu OGURI, Masanori SAKANO, Kazumi ISHIBASHI, Hirokazu HIRAGI, Toshio HORIKAWA, Shigeyuki MATSUI

* 工修 松尾橋梁(株) 技術開発室 (〒550-0005 大阪市西区西本町 3-1-43)

** 松尾橋梁(株) 技術開発室 (〒550-0005 大阪市西区西本町 3-1-43)

*** 工修 松尾橋梁(株) 技術開発室 (〒550-0005 大阪市西区西本町 3-1-43)

**** 松尾橋梁(株) 生産技術本部 (〒103-0007 東京都中央区日本橋浜町 2-62-6)

***** 工博 摂南大学助教授, 工学部 都市環境システム工学科 (〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町 17-8)

***** 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)

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

Recently, various steel plate and concrete composite decks have been developed to obtain higher durability than conventional reinforced concrete slabs. In those decks, shear connection and shear reinforcing for concrete become the keys to obtain high durability. The authors have been developing a prefabricated 3-dimensional truss reinforcement with mechanical grips for fastening the components. It works effectively to improve the keys.

First, push out tests for shear connectors with those reinforcements were carried out to investigate characteristic as shear connectors. Second, to confirm the effectiveness of those truss reinforcements and durability of the composite deck a series of fatigue tests on the composite deck were carried out with two kinds of wheel running machine such as a self-running machine with a rubber tire wheel and crank type machine with a steel wheel. In those tests, the parameter was the connecting method of the truss reinforcements to the steel plate. The paper describes those test results and discussions related to the durability and shear connecting effect.

Key Words: composite deck, truss reinforcement, shear connect characteristics, fatigue test

キーワード: 合成床版, トラス鉄筋, ずれ止め性能, 疲労耐久性

1. はじめに

従来から鋼道路橋に広く採用されてきた鉄筋コンクリート床版は、現場において型枠施工と配筋作業に多くの時間を必要とし、工期短縮や作業安全性が問題となる場合には、入替床版が要求される。さらに、近年では大型車両の繰返し通行による疲労損傷が問題となっており、軽量で十分な耐久性のある床版が求められている。また、鋼橋の合理化の一環として主桁本数を減らし、構造を簡略化した少数主桁形式が建設されているが、この場合において床版には長支間に対応できる大きな耐荷力と高い疲労耐久性を確保しなければならない。

著者らは現場作業量の軽減による工期短縮と施工精度の向上を目的に、図-1 に示す鋼製グリップを用いたトラス鉄筋合成床版(以下、MGT床版)の開発を進めており¹⁾、鋼部材とコンクリートのずれ止め形式として、

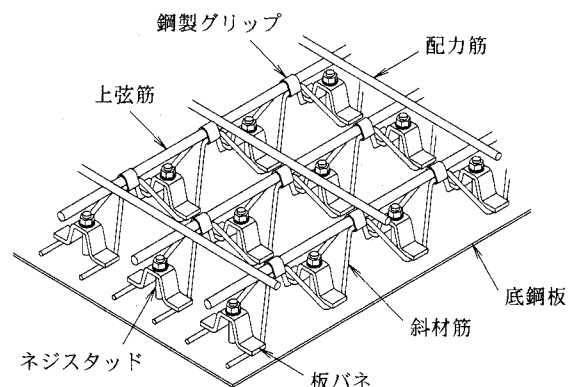


図-1 MGT床版の概念図

ねじ付きスタッド(以下、ネジスタッド)とπ形に曲げ加工した短冊鋼板(以下、板バネ)を組み合わせた構造を提案している。

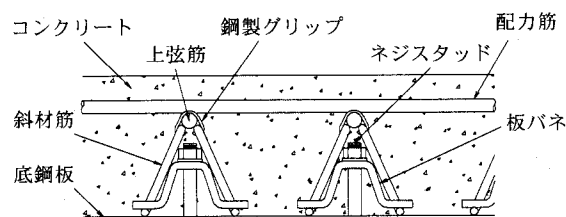
本研究では、(1) MGT床版のずれ止めの変形や力学的挙動に着目した押抜き試験、および(2) ゴムタイヤ車輪を用いた自走式輪荷重走行試験を実施し、基礎的なずれ止め性能とずれ止め配置の違いによる4体の床版の疲労特性を把握した。さらに、このうちの1体を(3) 鉄輪を用いたクランク式輪荷重走行試験で大きな輪荷重下での走行繰返し载荷を行い、本床版の疲労耐久性を検証した。また、これら2つの輪荷重走行試験の供試体についてモデル化を試み、FEMによる数値解析結果と試験結果の比較・検討を行った。

2. MGT床版の概要

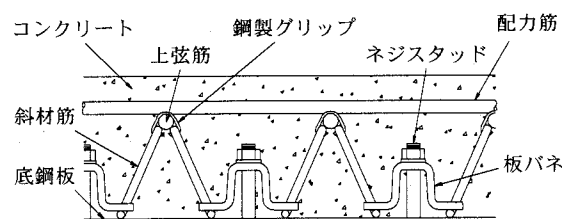
MGT床版は、主鉄筋として機能する上弦筋と鋼製グリップにより結合された斜材筋から成るトラス鉄筋と底鋼板で構成され、トラス鉄筋は板バネとネジスタッドによって底鋼板に連結される。これらの鋼板パネルを工場で製作し、現場にて配筋鉄筋の配筋とコンクリートの打込みを行って完成するハーフプレハブ鋼・コンクリート合成床版であり、型枠支保工が不要で現場作業の省力化が図れる。

以下にMGT床版の特長を示す。

- ①トラス鉄筋の高さと鉄筋径を変化させることにより、床版支間に応じた経済的な床版断面が選択できる。
- ②トラス鉄筋と底鋼板の結合は、ナット締めによる板バネ構造とすることで、組立作業の省力化が可能であり、トルク管理により結合部の品質管理が容易にできる。
- ③トラス鉄筋によるせん断補強および、トラス鉄筋内のコンクリートの変形拘束をもたらすコンファインド効果により、疲労耐久性の向上が期待できる。
- ④鋼製グリップで機械的に鉄筋を連結することにより、溶接接合の場合に発生する熱ひずみによる初期不整合等の障害を排除できる。



(a) 内板バネ型



(b) 外板バネ型

図-2 板バネの配置

- ⑤トラス鉄筋と底鋼板は別途の輸送ができ、現場での組立も容易であるため、山間部や狭隘な場所への架設が可能である。

本研究では図-2に示すように1組のトラス鉄筋内側に板バネを配置した「内板バネ型」と、2組のトラス鉄筋間に板バネを配置した「外板バネ型」の2種類を検討している。内板バネ型はトラス鉄筋どうしが独立しているため、外板バネ型に比べて自由なトラス鉄筋配置が可能である。一方、外板バネ型はナット締めをトラスの外側で行うため、内板バネ型に比べて組立時の施工性が良好である。

3. 押抜き試験によるずれ止め性能の検討

3.1 試験概要

(1) 試験目的

MGT床版には底鋼板とトラス鉄筋で補強されたコンクリート床版を一体化させるためのずれ止めとして、直径16mmのネジスタッドが採用されている。ただし、底鋼板に溶接されたネジスタッドは、床版コンクリート打設時の底鋼板の補剛のために、トラス鉄筋を底鋼板と定着させる板バネの締結治具も兼用しており、ネジスタッド付近が複雑な構造となっている。このため、MGT床版内に配置されたずれ止め構造が変形や作用力に対してどのような性能を有するのかを確認しておく必要がある。本章では、一連の押抜き試験を行いMGT床版に使用されるずれ止めの基本的性能を調べた。さらに、比較検討のためにトラス鉄筋を底鋼板に溶接した供試体も作成した。

(2) ずれ止め供試体

供試体の種類を表-1に示す。本論文ではMGT床版のずれ止めの基礎的性状を把握する目的で、床版の橋軸

表-1 供試体一覧表

供試体名	断面図	ずれ止め形状	供試体数	载荷方法
静的 载荷	内板バネ	斜材筋 + 内板バネ	2体	静的 载荷
	外板バネ	斜材筋 + 外板バネ	3体	
	溶接	斜材筋 + 溶接	3体	
	スタッド	頭付きスタッド	2体	
繰返し 载荷	外板バネ	斜材筋 + 外板バネ	1体	応力履歴 ↓ 静的 载荷

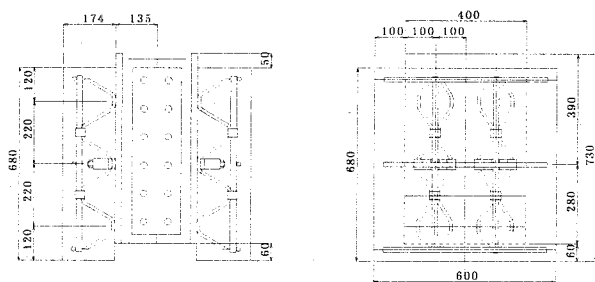


図-3 ずれ止め供試体の構造図

直角方向（主鉄筋方向）のずれ止め性能を確認することとした。ずれ止めの配置は縦1段配置とし、群効果の影響が生じないようにモデル化とした。また、押抜き試験時の載荷荷重のバランスが図られるように、1段に2列のずれ止めを配置した。比較のための底鋼板にトラス鉄筋を直接溶接する供試体についても同様の考えとし、底鋼板にトラス鉄筋を溶接する箇所は1段4列とした。また、既往の研究と同様の頭付きスタッド(φ16mm、長さ100mm)を用いた供試体も同時に製作した。供試体製作においては、グリース塗布等にて底鋼板との自然付着を除去し、コンクリートの打設方向は実際の床版の打設方向に合わせて施工した。コンクリートの圧縮強度は試験前32.6N/mm²、試験後39.6N/mm²であり、コンクリートのヤング係数は試験前27.1kN/mm²、試験後28.4kN/mm²であった。板バネの締め付けトルクは30N・mとし、トラス鉄筋の押さえ付け力は1箇所あたり6kNとした。

(3) 試験方法

静的載荷には2000kN型万能試験機を用い、ずれ計測は図-4に示す変位計によるシステムで行った。載荷方法は、変位が0.1mmに達するまで荷重制御による単調増加載荷法、その後、変位制御による漸増繰返し載荷法で行った。繰返し載荷試験については、まず供試体に設定した応力履歴を与え、疲労破壊しなかった供試体については上述の方法に従って静的載荷を行い、応力履歴を受けた供試体の残存耐力を確認することとした。なお、設定した応力履歴については、設計せん断力（道路橋示方書の許容せん断力）の2倍相当（109.8kN/1面）を500万回載荷させた。

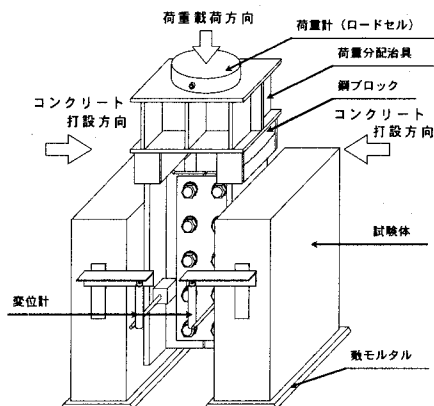


図-4 載荷計測装置

3.2 試験結果と考察

本試験では、底鋼板にトラス鉄筋を溶接するタイプの供試体を含めて結果の全比較を行うため、1面あたりの特性値について考察を行うこととした。試験結果については「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」²⁾に準じて整理を行った。各供試体の試験結果を表-2に示す。

表-2 試験結果一覧表（フランジ1面あたり）

			最大せん断耐荷力 Q_{max} (kN)	破壊形式	ずれ発生荷重 Q_s (kN)	ずれ定数 K_0 (kN/mm)	降伏せん断耐荷力 Q_y (kN)
静的	内板バネ	1	222.0	スタッド破断	80	—	155.0
		2	204.4	スタッド破断	70	390	197.3
		平均値	213.2		75	—	176.2
	外板バネ	1	215.6	スタッド破断	100	—	169.1
		2	209.7	スタッド破断	95	227	180.4
		3	199.9	スタッド破断	70	209	194.9
		平均値	208.4		88	218	181.5
	スタッド	1	208.8	スタッド破断	35	731	120.9
		2	204.4	スタッド破断	45	371	157.3
		平均値	206.6		40	551	139.1
	溶接	1	391.0	斜材筋破断	120	766	376.6
		2	390.1	斜材筋破断	70	—	326.2
		3	391.0	斜材筋破断	170	376	395.4
		平均値	390.7		120	571	366.1
繰返し	外板バネ	1	186.7	スタッド破断	0	419	169.1

(1) 最大せん断耐荷力 Q_{max}

内板バネタイプ、および外板バネタイプは、表-2に明らかなようにスタッドタイプと同程度の最大せん断耐荷力 Q_{max} を有していた。これは、終局時の両タイプに使用されているネジスタッドの破壊形式が頭付きスタッドと同様に、スタッド根元軸部のせん断破断によることから推察できる。また、平城・松井の静的せん断耐荷力算定式³⁾による推定値（207.3kN/1面）とも良く合っていることが確認できた。

(2) ずれ発生荷重 Q_s とずれ定数 K_0

内板バネタイプと外板バネタイプのずれ発生荷重 Q_s は、同径スタッドタイプの約2倍程度の値を示した。これは、板バネを取り付けているためにトラス鉄筋の摩擦抵抗が付加しているものと推定できる。

ずれ定数 K_0 は、 Q_s を基準としたずれ剛性 [Q_s を原点とした $\{(Q_{max} - Q_s) / 3\}$ 割線]⁴⁾ を意味している（図-7 参照）。これより、スタッドタイプの K_0 は既往の研究より得られた結果とほぼ同程度（571kN/mm）であった。それに対して外板バネタイプは特異な値を除く平均値が218kN/mmであり、内板バネは試験体が1体の値であるので390kN/mmが平均的な値と推定すると、MGT床版に用いる内板バネと外板バネのバネ定数は、従来のスタッドタイプのものに比べて低い値を示していた。

(3) 降伏せん断耐力 Q_Y

スタッドタイプと溶接タイプに対しては、3.2 (2) で算出された K_0 の傾きを示す直線を0.2mmオフセットした直線とせん断耐力-相対ずれ曲線との交点から Q_Y を算出した²⁾。それに対して、内板バネタイプおよび外板バネタイプでは、これらタイプのずれ性状の特徴を考慮して、底鋼板とトラス鉄筋との間のすべり発生点を Q_Y とした。これより、内板バネタイプ、外板バネタイプとも、スタッドタイプの約1.3倍の Q_Y を有していることが確認できた。

(4) ずれ性状

内板バネタイプ、および外板バネタイプとも、図-5 より明らかなように、上述の降伏せん断耐力に達するまではスタッドタイプより大きなせん断耐力を示し、その後、急激に耐力が低下する傾向が見られる。この傾向は、底鋼板と板バネによって締結されたトラス鉄筋との間に生じたすべりが原因であると考えられる。内板バネタイプの低下量が外板バネタイプの低下量よりも少ないことに対しては、内板バネはトラス鉄筋に囲まれておりコンファインド効果のためであると推測できる。すべり発生後のずれ性状は、ネジスタッドのみでの耐力負担となることから終局時までスタッドタイプとほぼ同等なものとなることが確認できた。溶接タイプは1トラスあたり2点の溶接箇所耐力負担することや、4本の斜材筋がスタッド1本の代わりとなるため、スタッドタイプ、板バネタイプとは全く異なる挙動を示した。さらに、最大耐力後は、斜材筋の一部が破断したため急激な耐力力の低下が見られた。

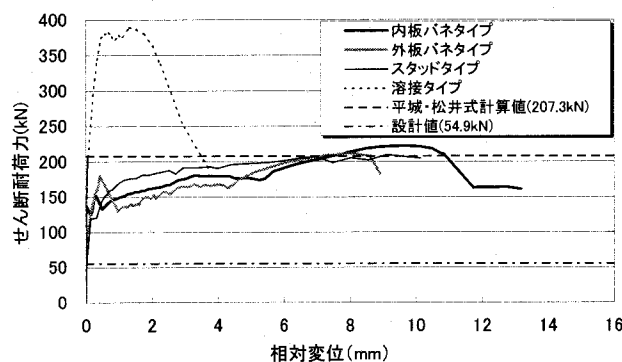


図-5 ずれ性状

(5) 応力履歴の影響について

図-6 に500万回のせん断力履歴の有無に対する外板バネタイプのせん断耐力-相対ずれ関係を示す。この図より明らかなように、応力履歴を受けた供試体は、降伏せん断耐力に達するまでは応力履歴を受けない供試体と同等のずれ性状を有していて、すべり発生後においては耐力力の低下が見られるものの、終局時にはほぼ同程度の最大せん断耐力を有していることが分かった。また、設計荷重の2倍程度の繰返し載荷による応力履歴

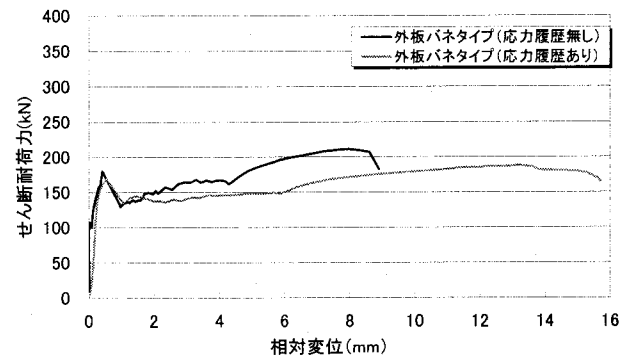


図-6 応力履歴の影響

を受けても性能の低下が無いことが認められた。

(6) 板バネタイプのモデル化

以上の結果から板バネタイプのずれ特性のモデル化が図-7の様になる。すなわち、ずれ発生初期では、①ネジスタッド支圧前面のコンクリートの支圧抵抗に加え、②底鋼板と板バネと締結されたトラス鉄筋との間に働く摩擦力が大きいため、板バネタイプの Q_S と Q_Y がとも高くなる。 Q_Y に達した後は②が発揮しなくなり、①のみの抵抗に移行すると考えられる。それゆえ、終局時まではスタッドタイプと同様のずれ特性を示す。

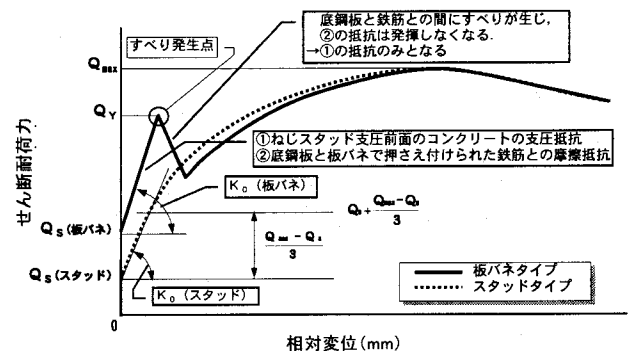


図-7 モデル曲線の模式図

4. 自走式輪荷重走行試験による疲労特性の検討

4.1 試験概要

(1) 試験目的

板バネの配置を3種に変えた実物大床版供試体に対して輪荷重走行試験を実施し、走行回数に伴う以下の項目①～④の経時変化を測定することで、ずれ止め配置が床版としての疲労劣化特性に与える影響を把握する。ただし、比較のためにトラス鉄筋を溶接して接合した供試体を加えた。

- ① 床版のたわみ
- ② 鋼材のひずみ
- ③ コンクリートのずれ量
- ④ コンクリートのひびわれ状況

- 1143 -

供試体は床版支間中央での曲げモーメントが設計値と同等となるように、支間2.0mで単純支持し、各供試体の端部には一方向版の性状を考慮した弾性支持となるように横桁を設けた。

輪荷重は床版支間中央を橋軸方向に走行させ、載荷荷重98～186kNで総計18万回の階段載荷を行った。本試験の載荷プログラムを図-10に示す。

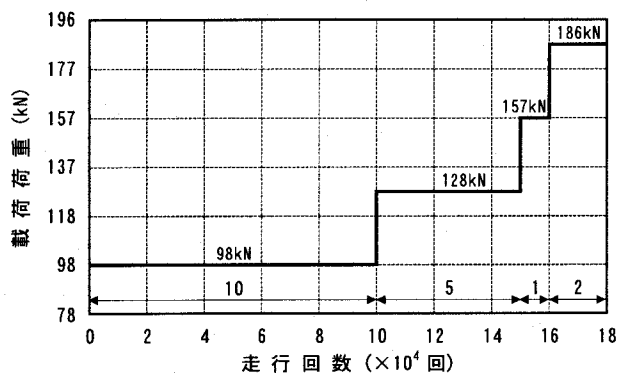


図-10 載荷プログラム

4.2 解析および試験結果

(1) FEM弾性解析

輪荷重走行試験を行う供試体の挙動を追跡することを目的として、供試体の立体FEM解析を行った。解析では図-11に示すように供試体全体をモデル化し、コンクリートはソリッド要素、底鋼板はシェル要素、上弦筋および配筋筋はり要素を用いた。斜材筋についてはモデルを簡略化するため、図-12に示すような2本の斜材筋と同等の橋軸直角方向の剛度を有する1枚のシェル要素（以下、斜材筋換算要素）を用い、底鋼板とはスタッド位置のみでせん断バネ要素で結合することによりモデル化した。

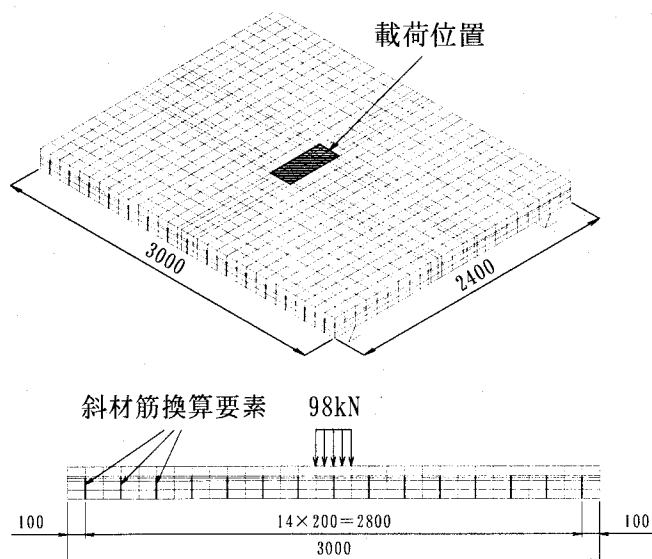
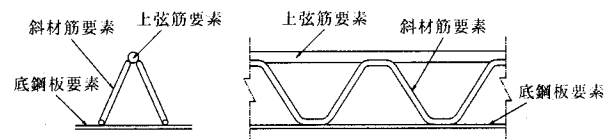
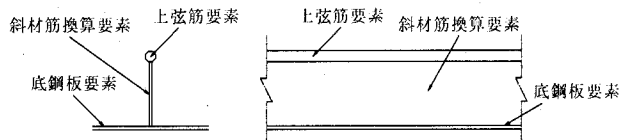


図-11 立体解析モデル



(a) 斜材筋 実物モデル



(b) 斜材筋 換算モデル

図-12 斜材筋のモデル化概念図

コンクリート要素は引張、圧縮ともに等方性で全断面有効とし、ヤング係数はコンクリートの材料試験結果より32.3kN/mm²を用いた。

コンクリート要素と底鋼板要素の結合は鉛直成分のみが伝達するものとし、水平せん断力はスタッド位置でのみ伝達されるようにモデル化した。なお、スタッド位置では斜材筋換算要素と底鋼板要素の接点を2重接点とし、2重接点間にせん断バネ要素を配置することで、スタッドの変形を考慮できるようにした。

解析モデルの拘束条件は、橋軸方向の単純支持は鉛直成分および橋軸回り以外の回転成分を固定とする。橋軸直角方向の弾性支持は横桁をモデル化し、鉛直成分のみ伝達するものとした。

荷重は輪荷重の接地面積を橋軸方向200mm、橋軸直角方向500mmと仮定し、供試体中央に分布荷重として98kNを載荷した。

スタッド位置に配置したせん断バネ要素のバネ定数は、スタッドの変形を無視した非常に大きな値と、スタッドの変形を考慮した押抜き試験結果から得られた値のうちの外板バネ形式のもの（109kN/mm = 218kN/mm / 2）の2種類を用いて解析を行った。表-5に各モデルの設定バネ定数と供試体中央点での解析値を示す。なお、その他のバネ定数については現在検討中である。

表-5 供試体中央点の解析値の比較（98kN載荷時）

	スタッドの変形を無視	スタッドの変形を考慮
設定バネ定数 (kN/mm)	50,000	109
床版のたわみ (mm)	0.28	0.31
底鋼板のひずみ (μ)	44.8	32.0
上弦筋のひずみ (μ)	-30.8	-31.2

(2) 床版のたわみ

図-13および図-14に各供試体中央点での鉛直たわみの経時変化を示す。

図-13は、所定の走行回数毎に走行荷重と同じ大きさの静的荷重を供試体中央に載荷したときの総たわみおよび残留たわみである。総たわみおよび残留たわみは各供試体ともほぼ同じ挙動を示しており、走行回数が多くなり、載荷荷重が大きくなるに伴っていずれも増加している。

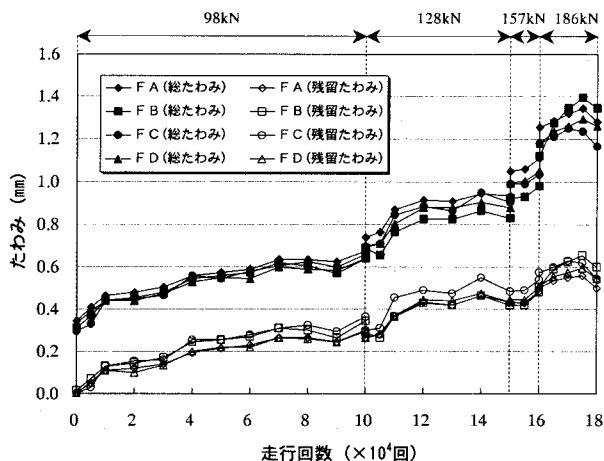


図-13 供試体中央点の鉛直たわみ（静的載荷時）

図-14は総たわみから残留たわみを差し引いた弾性たわみであり、載荷荷重98kN（B活荷重に相当）に換算した値で表している。また、図中にはFEMによる解析値も示す。供試体ごとの弾性たわみは初期載荷時で0.29～0.34mmと約17%の差であるが、18万回の載荷でも0.33～0.41mmと約24%の差であり、走行回数および載荷荷重が増加しても大きな差は見られない。なお、FBについては16万回以降で若干のたわみの増加が見られる。これは、その他の供試体と異なり鉄筋ピッチが倍であることからひびわれが発生し、曲げ剛性が低下したためと推測できる。測定値と解析値を比較すると、スタッドの変形を考慮した解析値の方が測定値とほぼ一致していることが分かる。

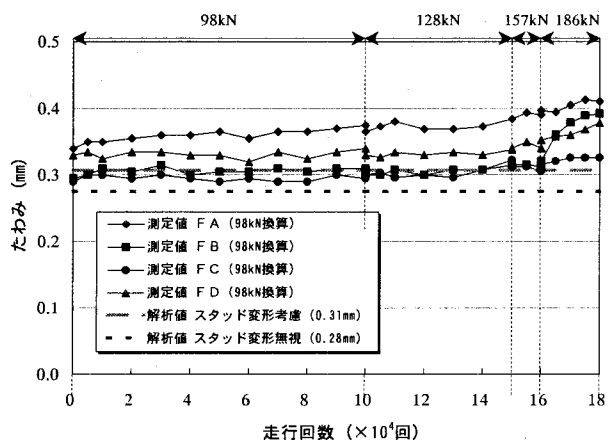


図-14 供試体中央点の弾性たわみ（静的載荷時）

また、表-6 に載荷荷重98kNに対する186kN時の静的載荷時のたわみおよび走行時（以下、動的載荷時）のたわみの比較をまとめる。

動的載荷時と静的載荷時のたわみを比較すると、98kNおよび186kN時の静的載荷時たわみに対する動的載荷時たわみの割合（④／③）は、それぞれ1.11～1.27および1.08～1.20であった。これは走行に伴う衝撃の影響が関与しているためと考えられる。設計では動的載荷時の荷重の扱いは衝撃係数 $i = 20 / (50 + 2) = 0.38$ を考慮して行っているが、本試験装置の走行速度（4km/h）程度ではいずれの荷重であっても0.27倍程度の影響しかないと言える。

載荷荷重98kNのたわみに対する186kNのたわみの割合（②／①）は荷重値が1.9倍に対して、FCとFDでは静的載荷時で2.07と2.18、動的載荷時で1.91と1.93とほぼ同等であるが、FAとFBでは静的載荷時で2.23と2.42、動的載荷時で2.15と2.37と大きくなっている。すなわち荷重がB活荷重の2倍程度に達すると線形関係が損なわれ、たわみが2倍以上の値となる点には十分配慮することが必要であると推測される。

表-6 静的載荷時および動的載荷時のたわみの比較

	供試体名	走行回数および載荷荷重		②／①
		① 10,000回 98kN	② 180,000回 186kN	
静的載荷 ③	FA	0.35 mm	0.78 mm	2.23
	FB	0.31 mm	0.75 mm	2.42
	FC	0.30 mm	0.62 mm	2.07
	FD	0.33 mm	0.72 mm	2.18
動的載荷 ④	FA	0.39 mm	0.84 mm	2.15
	FB	0.38 mm	0.90 mm	2.37
	FC	0.35 mm	0.67 mm	1.91
	FD	0.42 mm	0.81 mm	1.93
④／③	FA	1.11	1.08	
	FB	1.23	1.20	
	FC	1.17	1.08	
	FD	1.27	1.13	

(3) 底鋼板および主鉄筋のひずみ

図-15および図-16に供試体中央点における橋軸直角方向の底鋼板、および上弦筋の静的載荷に対する弾性ひずみの経時変化を示す。同図の弾性ひずみは、弾性たわみと同様に総ひずみから残留ひずみを差し引いた値であり、載荷荷重98kNに換算している。

図-15よりFB～FDの底鋼板のひずみは、15万回までほとんど変化していないが、15万回以降増加する傾向にあり、18万回では初期載荷時に比べ19～33%増加している。一方、FAのひずみ値は載荷荷重が98kNから128kNに増加する10万回ぐらいから若干増加し始め、18万回では初期載荷時に比べて41%増加している。解析値との比較では、全ての供試体で初期載荷時から測定値が解析値

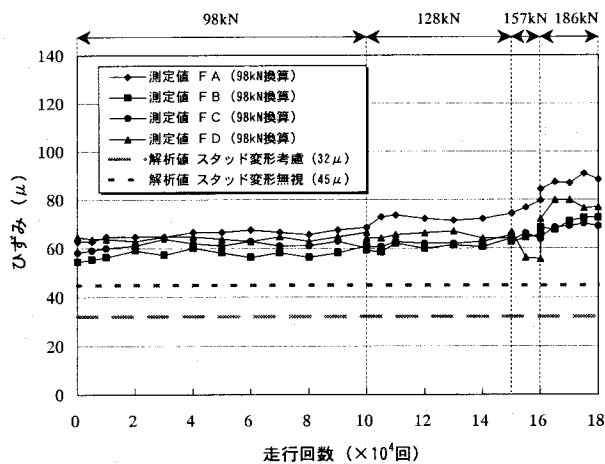


図-15 供試体中央点の底鋼板の弾性ひずみ

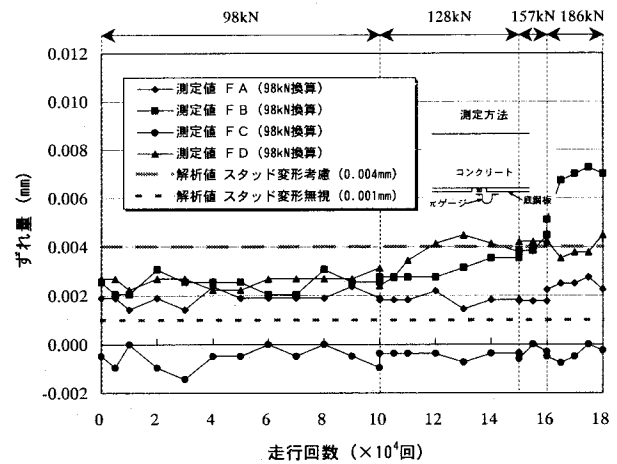


図-17 底鋼板とコンクリート下面の弾性ずれ量

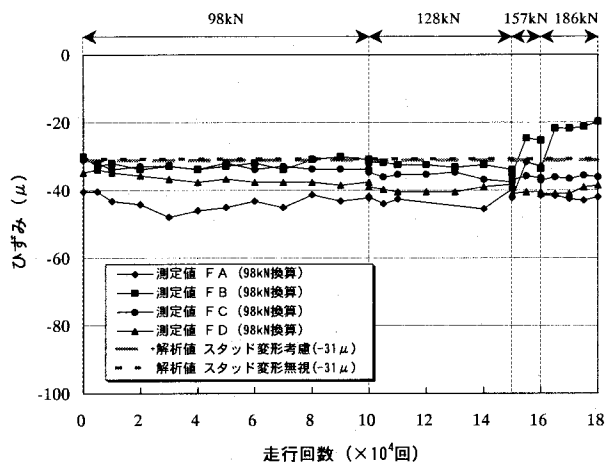


図-16 供試体中央点の上弦筋の弾性ひずみ

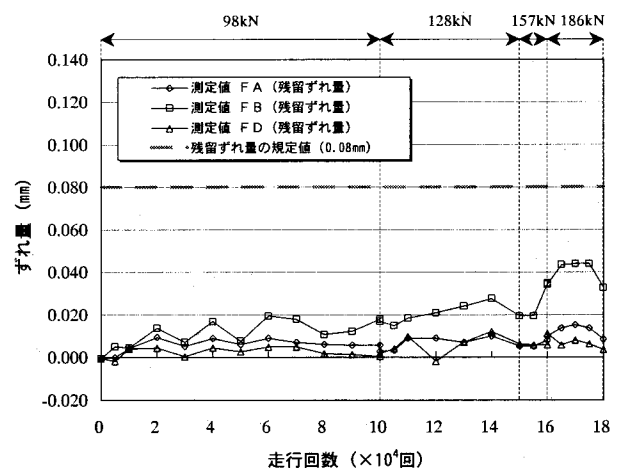


図-18 底鋼板とコンクリート下面の残留ずれ量

を上回っており、スタッドの変形を無視した解析値の方が測定値に近く、実際の床版でも解析値よりも大きなひずみが発生している。このため、解析方法について改善が必要である。

次に、上弦筋のひずみはいずれの供試体も15万回まであまり変化はしないが、157kNとなる15万回以降で若干変動している。供試体ごとで測定値に若干のばらつきがあるものの解析値に近い値となっている。

(4) 底鋼板とコンクリート下面のずれ量

図-17および図-18に底鋼板とコンクリート下面の橋軸直角方向のずれ量(図-8のA点)の経時変化を示す。A点の位置は、橋軸方向については底鋼板に負荷を与えない端部とし、橋軸直角方向は輪荷重の荷重分散範囲内になるように決定した。

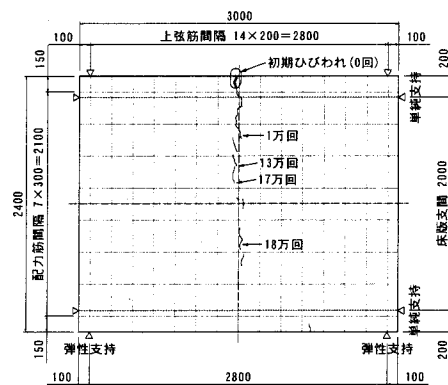
図-17より弾性ずれ量は、底鋼板とトラス鉄筋を溶接にて結合したFCではほとんど発生していないが、底鋼板とトラス鉄筋の結合にネジスタッドを使用した他の供試体では微少ではあるが初期載荷時からずれが発生している。FC以外の測定値は、ほぼスタッドの変形を無視した解析値と考慮した解析値の間に挟まれた値で推移し

ていることが分かる。FBについては16万回以降で弾性たわみと同様に大きな弾性ずれ量に成長している。この理由は明らかではないが、FBのみ斜材筋の曲げ間隔が2倍であるため、トラス鉄筋内のコンクリートが拘束されることによるコンファインド効果が小さいことや、曲げひびわれが発生したためずれやすくなったことが考えられる。なお、FCでは負の値となっているが、これは底鋼板の局部曲げによる影響と考えられる。

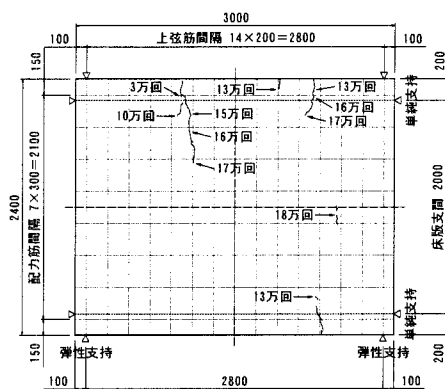
図-18より残留ずれ量は、弾性ずれ量の大きいFBが走行回数の増加につれて変化しており、最大で0.044mmに至っている。この量は合成桁での残留ずれ量の既定値0.08mm²)に比べて小さく、問題になる量ではないと推測される。

(5) ひびわれ状況

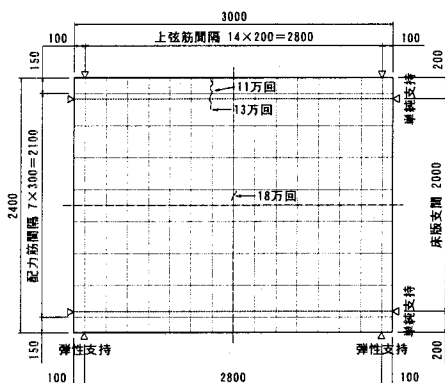
図-19に18万回走行後の供試体上面でのひびわれ状況図を示す。試験前はFAについて乾燥収縮に起因すると考えられる初期ひびわれ(長さ10cm程度、幅0.08mm以下)が同図に示すように供試体上面の上弦筋位置に発生していた。他の供試体については、初期ひびわれは全く認められなかった。FAについては初期ひびわれが徐々



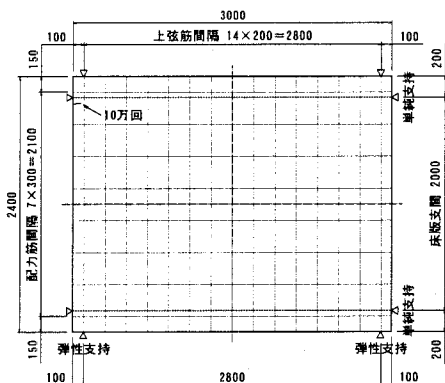
(a) FA



(b) FB



(c) FC



(d) FD

図-19 ひびわれ状況図 (18万回走行後)

に進展し、床版支間中央方向に床版幅の2/3程度に達した (長さ160cm程度、最大ひびわれ幅0.1mm)。FB～FDについては同図に示すひびわれが発生したが、最大ひびわれ幅は0.08mm以下であった。FAの初期ひびわれが進展したものを除くと、FBにおいて数本のひびわれを観察しているが、載荷荷重の大きさを考慮すると懸念される量ではない。

5. クランク式輪荷重走行試験による疲労耐久性の検討

5.1 試験概要

(1) 試験目的

4章におけるMGT床版の疲労試験から、最も性能がよいと判断した外板パネ型のFD、すなわち自走式輪荷重試験機で走行回数18万回を経験したFDを対象にクランク式輪荷重走行試験機を用いて走行試験を継続し、床版の持つ疲労耐久性について検証を行う。

(2) 供試体

供試体は、すでに繰返し載荷の履歴をもつ外板パネ型のFDである。図-20に供試体の構造図を示す。

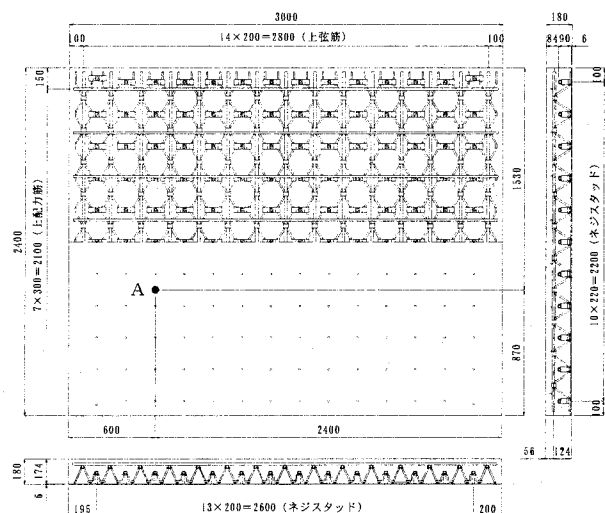


図-20 供試体構造図 (FD)

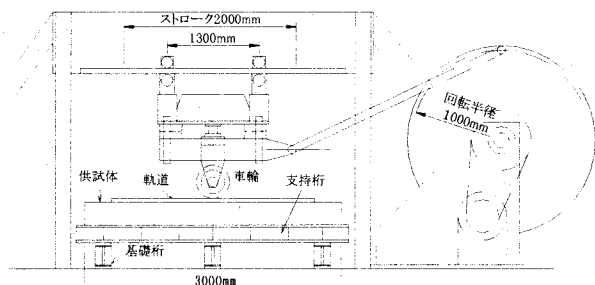


図-21 供試体の配置

(3) 試験方法

試験は鉄輪により比較的大きな輪荷重を高速で載荷できるクランク式輪荷重走行試験機を用いて実施した。図-21に供試体の配置状況を示す。供試体は4章と同様に支間2.0mで単純支持し、供試体の端部は横桁による弾性支持とした。輪荷重は床版支間中央を橋軸方向に作用させており、輪荷重の載荷範囲は中央より橋軸方向に±1.0mの合計2.0mである。輪荷重はブロック材を介して床版に輪荷重を伝え、ブロック材の大きさは橋軸方向に120mm、橋軸直角方向に300mmであった。

載荷荷重については、すでに4章の輪荷重走行試験において186kNまで走行載荷を行っていることも考慮し、176kN～235kNで、総計80万回の階段載荷を行った。図-22に本試験の載荷プログラムを示す。

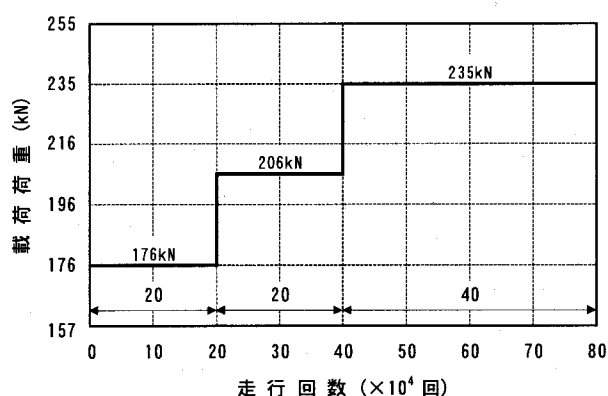


図-22 載荷プログラム

5.2 試験結果と考察

(1) FEM弾性解析

試験の結果を考察するため、4章と同様のFEM解析を行った。解析モデルは供試体全体をモデル化し、横桁の断面2次モーメント、載荷面積などは、クランク式試験での寸法に合致させている。表-7に各モデルの設定バネ定数と供試体中央点での解析値を示す。

表-7 供試体中央点の解析値の比較 (98kN載荷時)

	スタッドの変形を無視	スタッドの変形を考慮
設定バネ定数 (kN/mm)	50,000	109
床版のたわみ (mm)	0.29	0.32
底鋼板のひずみ (μ)	47.5	33.8
上弦筋のひずみ (μ)	-30.6	-31.1

(2) 床版のたわみ

図-23に静的荷重での床版中央の弾性たわみの経時変化を示す。弾性たわみは載荷荷重98kNに換算している。また、同図中にはFEMによる解析値も示す。図-23より176kN載荷直後のたわみ値は、スタッドの変形を考慮

したたわみ理論値とほぼ一致しており、この時点でFDはまだひびわれは少ないと考えられる。その後1～2万回にて15%ほど急増したが、新しい大きな荷重によって曲げひびわれが発生したものと推定できる。その後の増加はほとんどなく、235kNで80万回の終了時でも25%程度に止まっている。よって、優れた耐久性を有していると判断できる。

ここで、4章の自走式と5章のクランク式の輪荷重走行試験結果を連続させた全体的な経時変化(98kN換算値)を図-24に示す。これより、両試験を通じて98kN換算値には急激な変化もなく、床版の曲げ剛性が保持されていることが分かる。

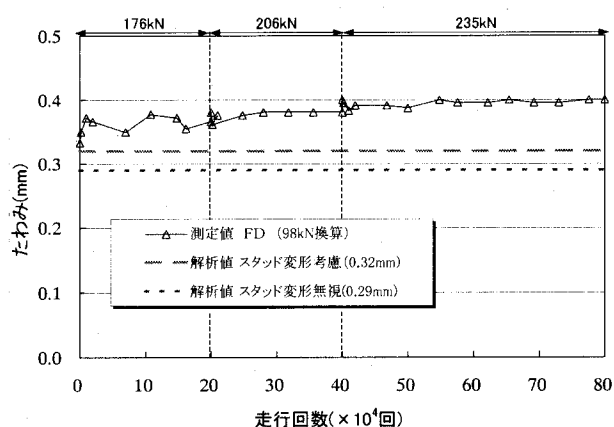


図-23 供試体中央点の弾性たわみ (静的載荷時)

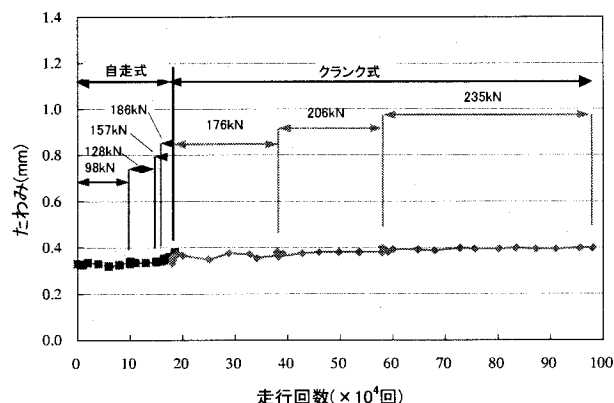


図-24 自走式・クランク式の比較

(3) 底鋼板および主鉄筋のひずみ

図-25、および図-26に供試体中央における橋軸直角方向の底鋼板、および上弦筋の静的載荷に対する弾性ひずみの経時変化を示す。図-25より、測定値は解析値を上回っているが、試験終了時においてもひずみに急激な変化などはみられず、大きな剛性低下がないことが分かる。

図-26によれば、上弦筋のひずみは緩やかに逓減していることから、疲労作用によってひびわれが進展し中立軸が床版上面へと上がっていると推測されるが、上昇速度が小さくまだ耐久性は持続している。

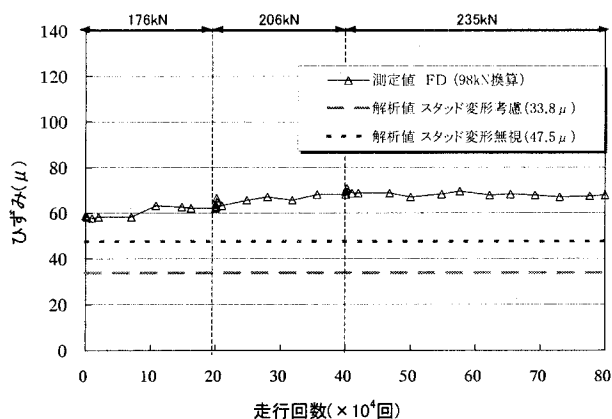


図-25 供試体中央点の底鋼板の弾性ひずみ

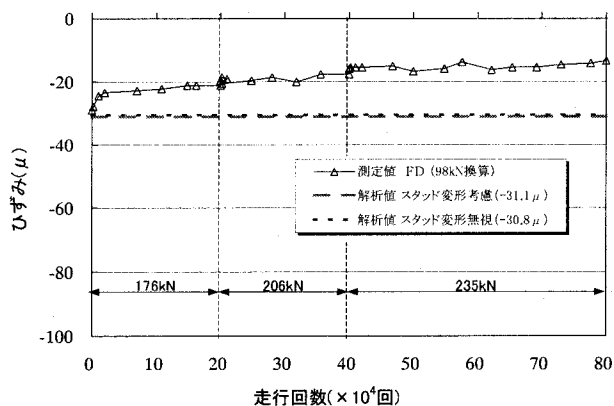


図-26 供試体中央点の上弦筋の弾性ひずみ

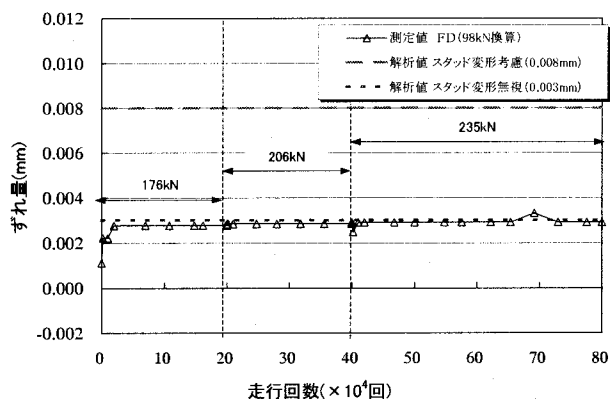


図-27 底鋼板とコンクリートの下面のずれ量

(4) 底鋼板とコンクリート下面のずれ量

図-27に底鋼板とコンクリート下面の橋軸直角方向の弾性ずれ量(図-20のA点)の98kN換算値の経時変化を示す。これより、測定値は解析値より小さく、さらに急激な変化は見られない。

(5) ひびわれ状況

図-28に試験終了時の供試体上面でのひびわれ状況を示す。試験終了時においてもひびわれは単純支持線から200mm程度までしか進展しておらず、終了時点ではまだ十分な耐久性を残していると思われる。既往の研究において劣化が進んだ合成床版では、全幅にわたって橋軸直

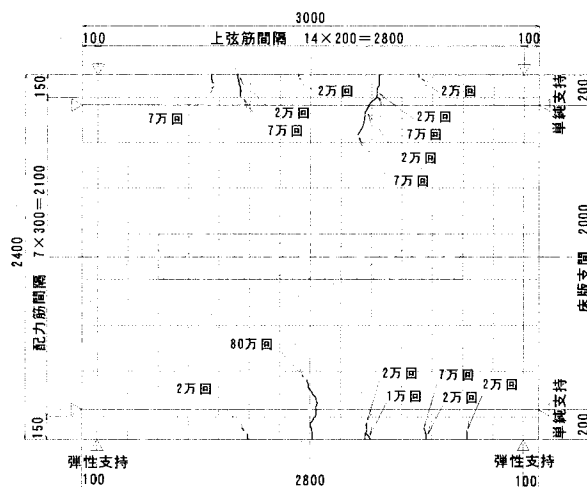


図-28 ひびわれ状況

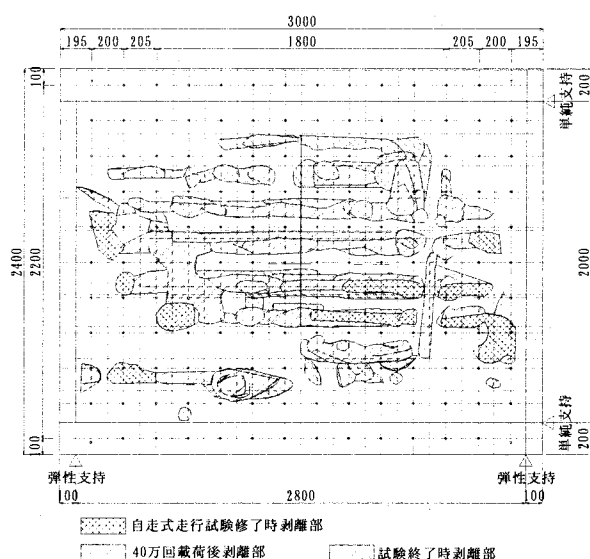


図-29 底鋼板の付着状況

角方向の貫通ひびわれが発生し、コンクリート部が梁状化するという特徴が確認されている⁶⁾。

(6) 底鋼板とコンクリート下面の付着状況

図-29に打音点検による底鋼板とコンクリート下面との付着状況の結果をまとめた。载荷初期は橋軸方向にスタッド間で剥離が進んでいることが分かる。これは、スタッド位置においてトラス鉄筋の斜材筋が板バネで押さえ付けられており、剥離が進行しにくいためと考えられる。このように、試験終了時には供試体の全面に剥離が進展しているが、たわみやひずみには大きな増加は見受けられていない。まだ、十分な疲労耐久性が残存していると判断できる。

6. まとめ

本研究では、MGT床版の基礎的なずれ止めの構造形式の差異によるずれ性能を把握する目的の押抜き試験、ずれ止め配置の違いによる床版の疲労特性を確認するための自走式輪荷重走行試験、および疲労耐久性の検証を目的としたクランク式輪荷重走行試験を行った。また、押抜き試験から得られた結果を反映した解析モデルを用いたFEM弾性解析を行い、それぞれの輪荷重走行試験による結果との比較を試みた。

本研究から得られた結果を以下にまとめる。

- (1) ずれ止め機構として汎用されるスタッドタイプと比較することにより、MGT床版で採用されている各種タイプのずれ止め性能の基礎的データを得ることができた。MGT床版のずれ止めは、頭付きスタッドと比べてずれ発生荷重が高いが、ずれ定数はやや小さい。
- (2) 異なるずれ止め配置をした供試体4体に対する自走式輪荷重走行試験では、斜材筋の曲げ間隔を2倍とした供試体において、186kn載荷時におけるたわみの増加率が他の供試体より大きいことが分かったが、その他の供試体においては走行回数18万回の結果、顕著な差は見出せなかった。
- (3) 押抜き試験の結果から求めたスタッドのバネ定数を用いたスタッドの変形を考慮したFEM解析値と、MGT床版の輪荷重走行試験によるたわみとの対比から、たわみは概ね初期の段階で一致するが、その値はコンクリートの曲げひびわれによって実験値は理論値より大きくなる。しかし、その増加度は高々25%程度であり曲げ剛性の低下は少ない。これより、まだ十分な耐久性を残存していると思われる。

本実験に対して、FEMによる弾性解析を試みたが、コンクリートのひびわれを考慮していないので、実験値よりも小さめの解析値となった。今後、この結果をふまえて、より合理的な解析方法を見出す必要がある。

参考文献

- 1) 小堀義隆, 小林 勝, 影石真一, 小栗文泰: 鋼製グリップを用いたトラス鉄筋床版の長支間適用に関する研究, 第二回道路橋床版シンポジウム講演論文集, pp.19-24, 2000.
- 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, JSSCテクニカルレポート No.35, 1996
- 3) 平城弘一, 松井繁之, 福本嘸士: 頭付きスタッドの強度評価式, 構造工学論文集 Vol.35A, pp.1221-1232, 1989.
- 4) 榊田智子, 平城弘一, 渡邊滉, 高田嘉秀, 宮地真一, 牛島祥貴: スラブアンカーの静的ずれ耐荷力特性に関する実験的研究, 構造工学論文集 Vol.47A, pp.1373-1380, 2001
- 5) 土木学会: 鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物〔平成9年版〕, 1997.
- 6) 土木研究センター: 道路橋床版の輪荷重走行試験における疲労耐久性評価方法の開発に関する共同研究報告書(その5), 共同研究報告書 整理番号第277号, 2001.

(2003年9月12日受付)