

## 底鋼板に高力ボルト引張接合を用いた合成床版の配力鉄筋方向継手性能

### Joint stiffness in longitudinal direction of composite slabs with the tensile grip connection with of high strength bolts

徐 聖卓\*, 日野 伸一\*\*, 太田 俊昭\*\*\*, 合田 寛基\*\*\*\*  
 Sungtag SEO, Shinichi HINO, Toshiaki OHTA, Hiroki GODA

\*工修 九州大学大学院工学研究科 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)  
 \*\*工博 九州大学大学院助教授 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)  
 \*\*\*工博 九州大学大学院教授 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)  
 \*\*\*\* 九州大学大学院工学研究科 (〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

Recently, steel-concrete composite slab decks have been widely used as highway bridge decks. In the construction of the composite slab decks, it is necessary to join two adjacent blocked bottom plates to form one unite in the longitudinal direction. As a performance demanded of the connection structure of longitudinal direction, it is necessary to fully transmit bending moment and shearing force and to simplify connection structure. In this paper, several types of longitudinal direction joints for Robinson type composite slab decks are proposed herein and static bending and fatigue test are carried out by using beam specimens. And the stress and deformation of the tensile grip connection with high strength bolts are discussed by using three-dimensional elasto-plastic F.E.M. Additionally the paper reports the design bending moments for slab which joint structure is used of span length of 2 to 8 m based on the FEM analyses. The experimental result of the fatigue test and static test are summarized as follows; (1) It is thought that the difference between the one and two-concentrated loads is not seen remarkably, the crack of the bottom steel plate is not the fatigue by the shearing force but bending fatigue. (2) The separation in the joint between two pates is considerably decreased, which in its turn reduces the stress in the bolts of the joint.

Key Words: steel-concrete composite slab, tensile grip connection, high tension bolt

#### 1. はじめに

近年、道路橋床版の施工においては、コスト節減・高耐久性化・省力化などの強い要求があり、これに応える構造形式として鋼とコンクリートを組み合わせた合成床版が注目されている。工場製作された底鋼板を現場に搬入し、コンクリート打設に先行して、配力鉄筋方向に分割された底鋼板を接合一体化する必要がある。配力鉄筋方向の継手構造に要求される性能として、継手部の曲げモーメントとせん断力をフルに伝達するとともに単純化した継手構造が望まれる。

そこで、本研究は図-1のようなロビンソン型合成床版を対象に、引張ボルト接合を用いた底鋼板の配力鉄筋方向継手構造を提案した。また、スパン中央部で接合した単純梁供試体による疲労試験を行い、継手部の曲げ剛性や疲労強度について検討した。加えて、3次元静的弾塑性FEM解析を行い、継手部の応力および変形を検討した。さらに、以上の結果から、提案した継手構造の剛性度を参考した支間2~8mの床版のFEM解析を行い、床版の設計曲げモーメントについて検討を行った。

#### 2. 実験・解析概要

##### 2.1 継手構造

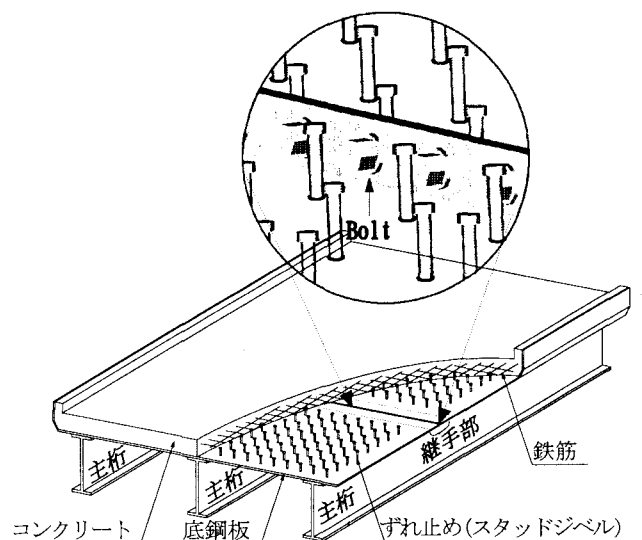


図-1 合成床版概念図

橋軸(配力鉄筋)方向に分割された底鋼板相互の継手構造としては、図-2に示すような高力ボルト(HTB)継手タイプE<sub>0</sub>を基本とし、端部プレートの孔に軸方向鉄筋を挿入して補強した構造E<sub>1</sub>、端部プレートの溝に孔あき鋼板を挿入して補強した構造E<sub>2</sub>および比較用の

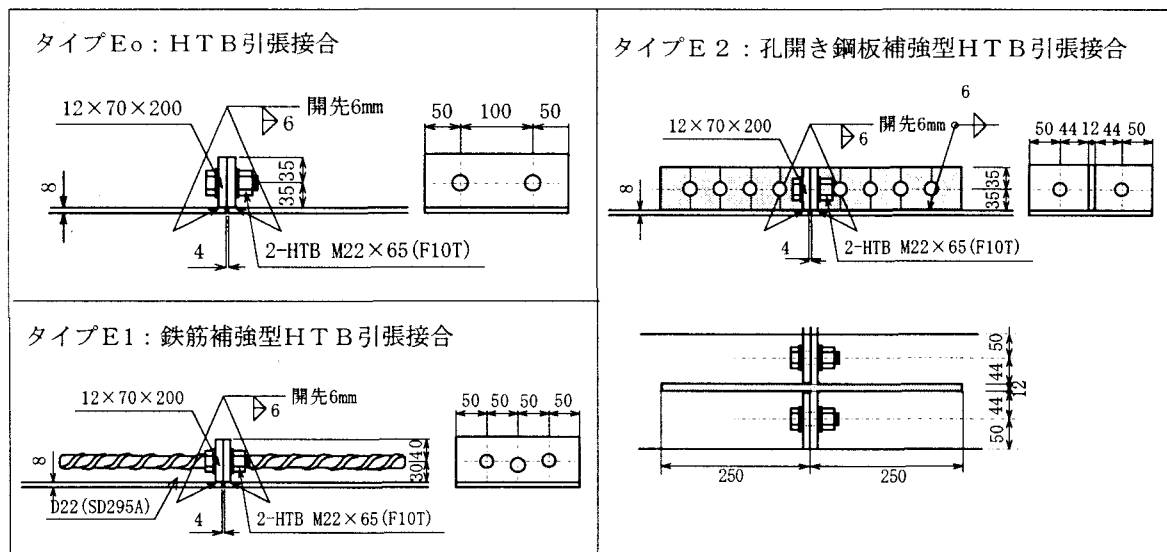


図-2 継手構造

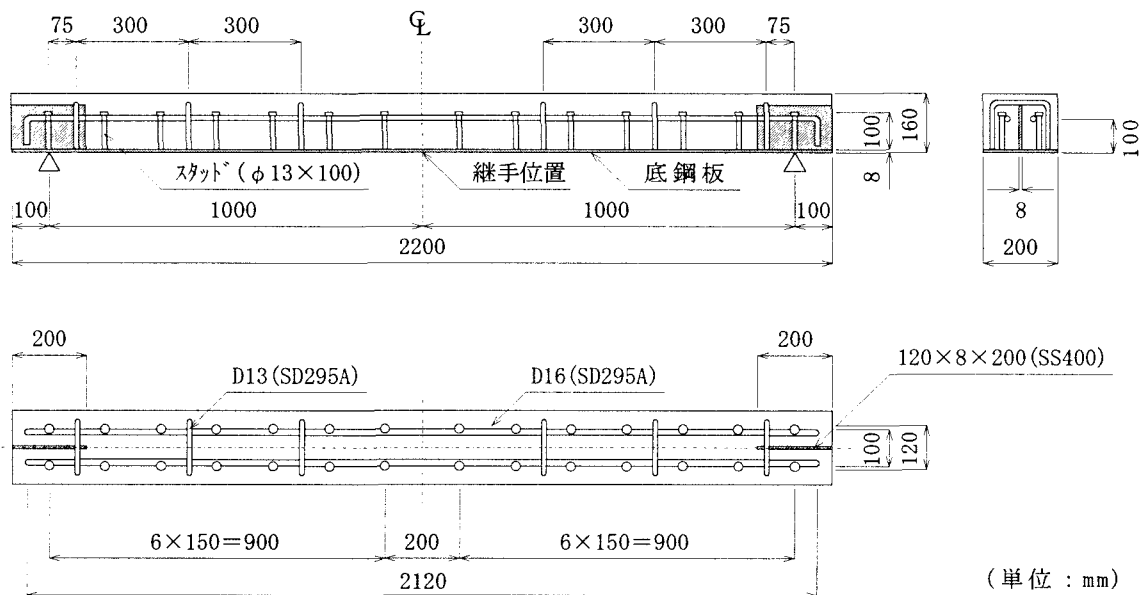


図-3 供試体諸元

継手無し供試体の合計4種類について実験を行った。これらは、いずれも著者らによる先の実験結果<sup>1)</sup>を踏まえて選定したものである。静的繰返し載荷試験と曲げ疲労試験に用いた供試体は図-3に示すスタッド付きの合成はり供試体であり、支間中央部の継手構造を除いて、すべて同一の断面諸元である。

## 2.2 載荷試験方法

曲げ疲労試験は、中央2点載荷、1点載荷ともに底鋼板に作用する引張応力振幅に対して、3段階の荷重振幅を設定して、各々50～100万回の繰返し載荷を行った。また、静的繰返し載荷試験は、疲労試験における各ステップの載荷、除荷を各3回行った後、破壊に至るま

で荷重増分4.9kNの漸増載荷を行い、疲労試験と同様、たわみ、ひずみデータの計測およびひび割れの観測を行った。

## 2.3 解析方法

載荷試験にあわせて、汎用解析プログラムLUSAS VER 13.を用いて、弾塑性FEM解析を行った。継手部の幅方向の非均質性を考慮するため、3次元弾塑性解析で接合板の挙動、すなわち継手の剛性および変形を検討した。図-4は1/2部分の要素分割図を示す。なお、それぞれのモデル化については、鋼板、コンクリートは1つの節点で3つの自由度を持つ3次元8節点ソリッド要素を用い、鉄筋には軸力のみが伝わる2節点棒要素を用いた。引

表-1 実験の結果

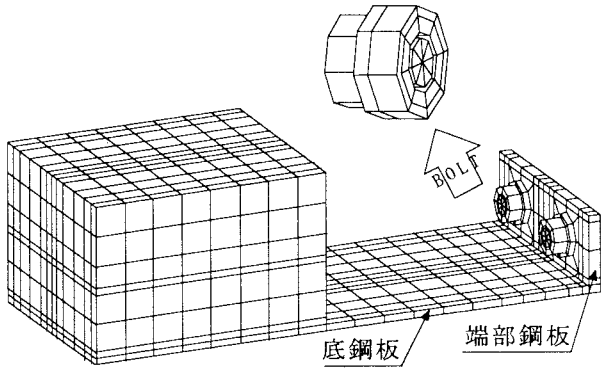


図-4 要素分割図

張継手においては、ボルトは実構造を精度よく表現できるソリッド要素でモデル化し、ボルトの頭部は端部鋼板と剛結とした。また、コンクリートと底鋼板の付着は完全と仮定した。

### 3. 結果および考察

疲労試験および静的載荷試験結果の一覧を表-1に示す。疲労試験に関しては、いずれの供試体も底鋼板の疲労破断により破壊した。一方、静的載荷試験に関しては、いずれもコンクリート上面が圧壊した。破壊荷重の計算値は、RC理論に基づき求めたものである。

#### 3.1 変形状

例として、疲労試験での各タイプの支間中央位置の最大たわみおよび残留たわみの変化を図-5に示している。図より、タイプE1, E2は活荷重による設計曲げモーメントの3倍に相当する荷重レベル(58.8kN)まで残留たわみはほとんど生じておらず、良好な疲労耐久性を示していることがわかる。図-6は、底鋼板の応力振幅と開口幅振幅の関係を示しており、タイプE0, E1, E2とも弾性挙動を示す。これによって継手部の剛性は作用するせん断力より曲げモーメントに支配されることが確認できる。また、図-7は、静的載荷試験での各タイプの支間中央位置のたわみ曲線を示しており、実験、解析値ともに、設計曲げモーメントの2倍程度(荷重36.2kN)までほとんど線形変形をしていることがわかる。図-8はFEM解析により、底鋼板と端部鋼板の変形図を示しており、底鋼板の中央部に局部的な負曲げ応力が発生する。全般的な正曲げ下でのこれらの局部応力の反復が底鋼板の疲労破壊を起こしたと考えられる。

#### 3.2 ひび割れ分布

試験終了後の各供試体側面のひび割れ状況を図-9に示す。タイプE0については、継手部端部鋼板上面から底鋼板にかけてのひび割れが特徴的であり、また継手部鋼材とコンクリートとの接合面にも大きくずれが生じており、継手部鋼材のL型形状に起因した局部的なせん断力が作用していると思われる。

供試体	載荷ステップ	上限荷重	繰返し回数	破壊形式
タイプE0	静的 No.1	実験: 97.8kN, 計算: 106.7kN		上面コンクリート破壊
	疲労(2点) No.2	(1)	36.2kN 54.8万	底鋼板の疲労破壊
		(2)	36.2kN 100万	
	疲労(2点) No.3	(1)	20.5kN 100万	ボルトの疲労破壊
		(2)	36.2kN 55.9万	
	疲労(2点) No.4	(1)	36.2kN 94.2万	底鋼板の疲労破壊
		(2)	36.2kN 51万	
疲労(1点) No.6	(1)	15.6kN 50万	底鋼板の疲労破壊	
	(2)	27.4kN 91万		
疲労(1点) No.7	(1)	15.6kN 50万	底鋼板の疲労破壊	
	(2)	27.4kN 89万		
タイプE1	静的 No.1	実験: 116.3kN, 計算: 117.1kN		上面コンクリート破壊
	疲労(2点) No.2	(1)	20.5kN 50万	底鋼板の疲労破壊
		(2)	36.2kN 100万	
		(3)	58.8kN 12万	
	疲労(1点) No.3	(1)	15.6kN 50万	底鋼板の疲労破壊
		(2)	27.4kN 100万	
		(3)	44.1kN 20万	
	疲労(1点) No.4	(1)	15.6kN 50万	底鋼板の疲労破壊
		(2)	27.4kN 100万	
		(3)	44.1kN 15万	
タイプE2	静的 No.1	実験: 115.6kN, 計算: 117.8kN		上面コンクリート破壊
	疲労(2点) No.2	(1)	20.5kN 50万	底鋼板の疲労破壊
		(2)	36.2kN 100万	
		(3)	58.8kN 2.8万	
	疲労(1点) No.3	(1)	15.6kN 50万	底鋼板の疲労破壊
		(2)	27.4kN 100万	
		(3)	44.1kN 30万	
	疲労(1点) No.4	(1)	15.6kN 50万	底鋼板の疲労破壊
		(2)	27.4kN 100万	
		(3)	44.1kN 9万	

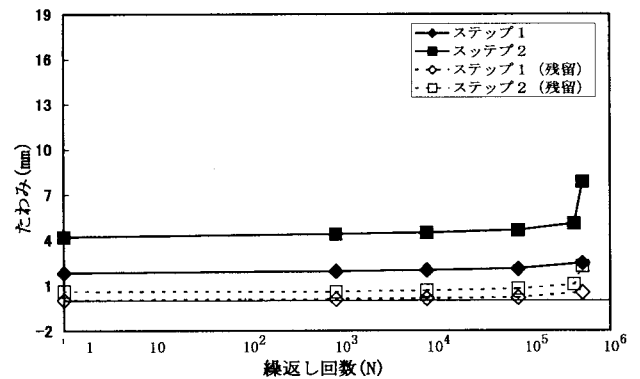


図5-a 支間中央部のたわみ履歴曲線[タイプE0 No.1]

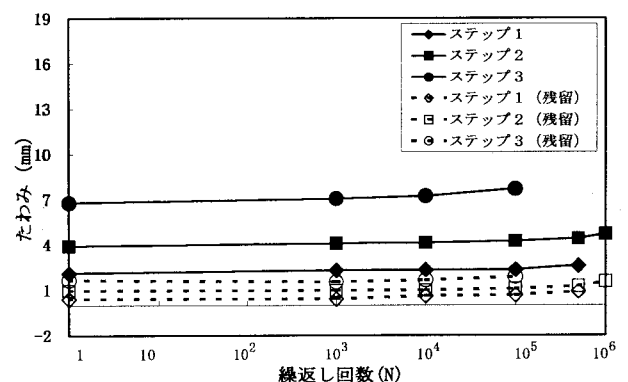


図5-b 支間中央部のたわみ履歴曲線[タイプE1 No.1]

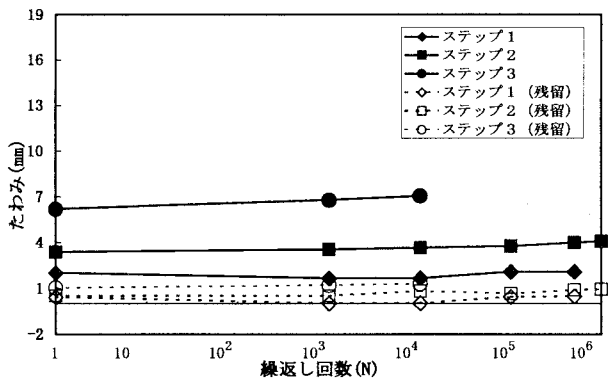


図5-c 支間中央部のたわみ履歴曲線[タイプE2 No. 1]

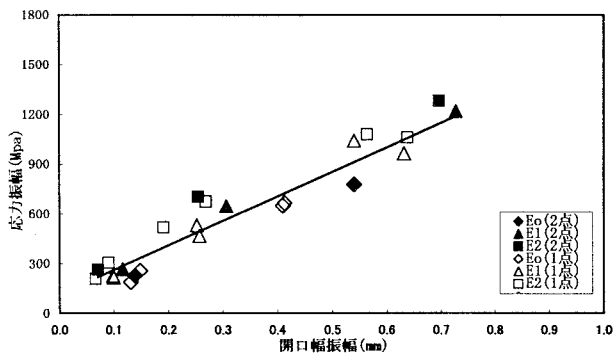


図-6 底鋼板の応力振幅と開口幅振幅曲線

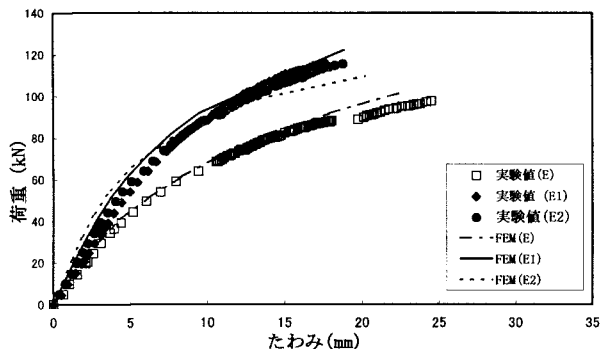


図-7 支間中央部のたわみ曲線 [タイプE0 静的]

タイプE1, E2については、ひび割れはタイプAに比べると、継手部に集中しているが、タイプE0に比べるとひび割れは分散しており、継手部の補強の効果が認められる。

### 3.3 接合部の端部鋼板の応力分布

疲労载荷試験のステップ2の時得られた接合部端部鋼板と中央断面から5cmのところの応力分布を図-10に示す。タイプE0の中央断面は底鋼板の引張力によるボルト位置で圧縮応力が発生し、端部鋼板の変形が見られる。

これに対して、タイプE1, E2は中央断面の応力変動は大きく見られず、補強材とボルトが応力分担し、変化断面で応力集中を十分に避けることができる。

### 3.4 曲げモーメントと曲率 (M-φ) 曲線

接合部の変形による曲げ剛性の低下を調べるため図-11に曲げモーメントMと曲率φとの関係を示す。曲線

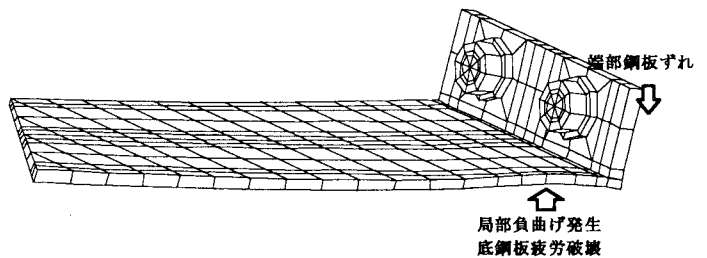


図-8 FEM解析による変形状

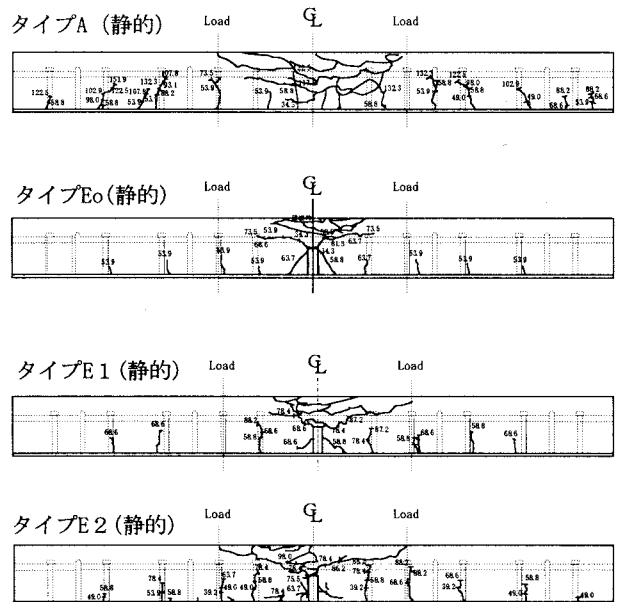


図-9 ひび割れ分布図

の勾配は直ちに接合部の曲げ剛性EIを示しており、荷重の初期においては弾性的に変化するが、3.2節のひび割れ分布図に示すように、端部鋼板とコンクリートの接合面にひび割れが発生するとともに曲げ剛性が急激に変化し、その後徐々に低下する。各タイプの曲げ剛性を比較するとタイプAが最も大きく、以下タイプE1, E2順となり、いずれもタイプE0に比べて剛性は明らかに大きく、継手構造E1, E2の補強効果が認められる。

### 3.5 S-N曲線と継手性能の評価

図-12は継手部底鋼板のS-N曲線を示す。载荷荷重の変化によってひずみ範囲は変動するので、次式によって定義される等価応力範囲を用いて考察した。

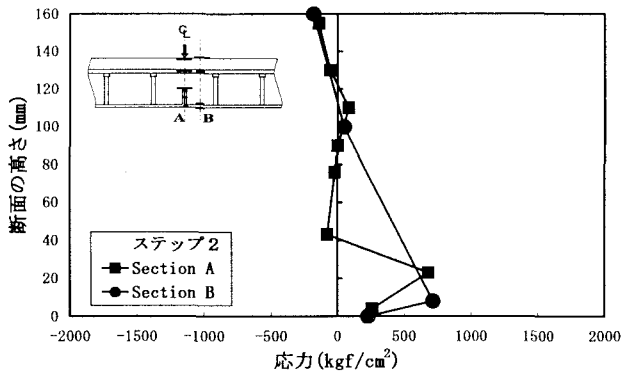
$$\Delta\sigma_e = \left[ \sum_{i=1}^n \left\{ (\Delta\sigma_i)^3 (N_i / N_e) \right\} \right]^{1/3}$$

ここに、 $\Delta\sigma$  : 等価応力範囲

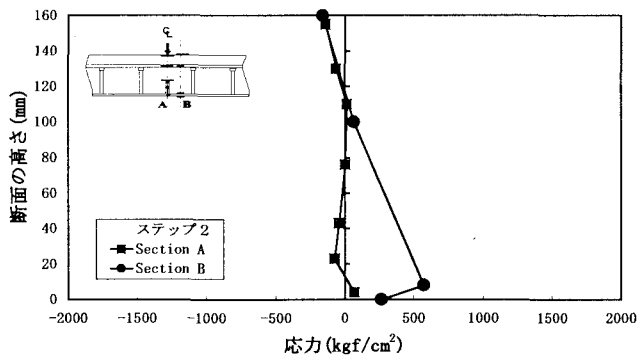
$\sigma_i$  : レベルiの応力範囲

$N_i$  :  $\Delta\sigma_i$ の繰返し回数

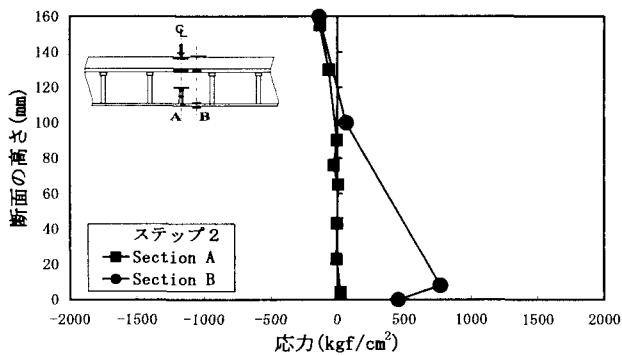
$N_e$  : 全繰返し回数。



(a) [タイプE0 No. 3]



(b) [タイプE1 No. 3]



(c) [タイプE2 No. 3]

図-10 端部接合板の応力分布

ここで、実線は日本鋼構造協会の疲労設計指針<sup>2)</sup>に規定される許容疲労応力範囲であり、継手部底鋼板の疲労強度はF等級とH等級の間に分布している。

次に、以上の疲労・静的繰返し载荷試験の結果を総合的に分析し、疲労耐久性、耐荷力、施工性について継手性能の評価を試みる。

疲労試験の結果、1点载荷と2点载荷の差異は顕著にみられず、このことよりせん断力による疲労劣化ではなく曲げ疲労による接合部底鋼板の亀裂およびコンクリートのひび割れが卓越したと考えられる。補強継手構造E1, E2は、疲労試験ではステップ3で破壊しており、継手下面の開口を抑え、底鋼板の疲労破壊に至るまで継手性能の低下は顕著に見られず、接合板の溶接継手に相当する性能を有していることがわかる。

静的载荷試験では、各タイプの最大荷重は設計荷重に対して3倍以上の安全率を有し、タイプE1, E2はE0よ

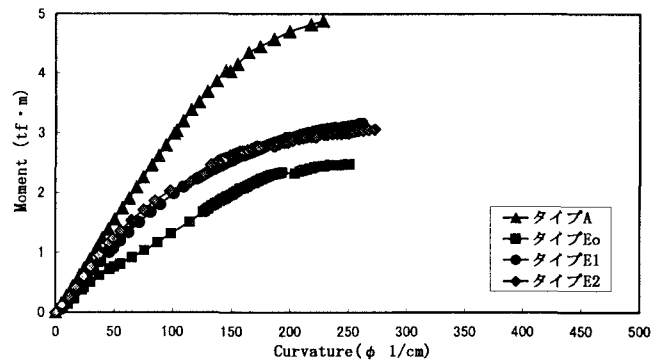


図-11 曲げモーメントと曲率 (M-φ) 曲線

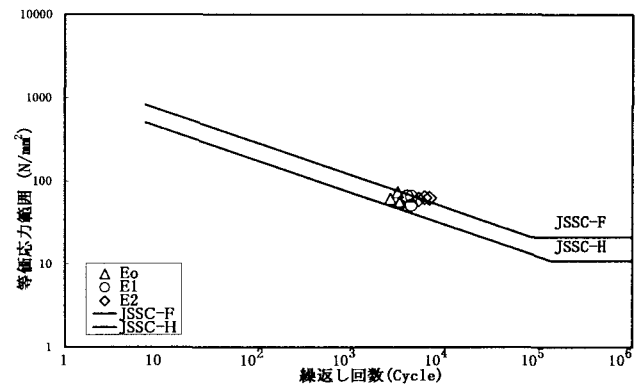


図-12 HTB引張接合継手のS-N曲線

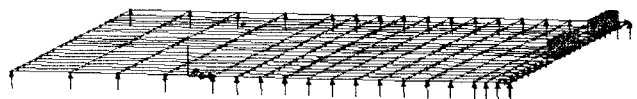


図-13 解析モデル

りひびわれの分散性も向上が認められた。

施工面については、全ての継手が床版の上で作業することから施工性が良く、特にタイプE1はE2に比べて同程度の継手性能を有し、簡単な構造であるため実用性が高いと思われる。

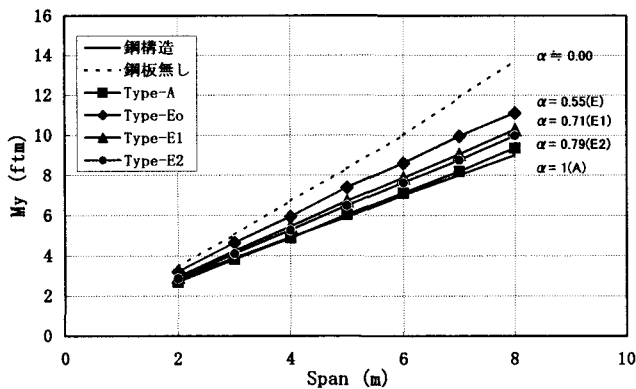
今後は、本研究の試験結果を反映した版供試体による検討が必要である。

#### 4. FEM解析による床版の曲げモーメントの検討

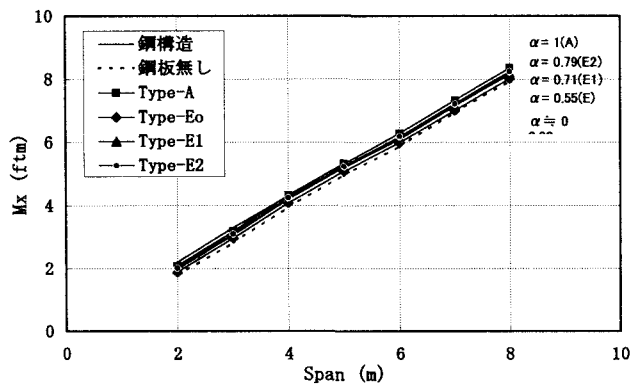
##### 4.1 解析概要

疲労試験および静的繰返し载荷試験から疲労耐久性および耐荷力について検討した。接合部が完全に剛結され、曲げとせん断をフルに伝達できれば理想的である。しかし、経済性・施工性の面から、疲労耐久性および耐荷力に大きな悪影響がなければ、ある程度簡易化した継手構造が実用上望ましいと考えられる。このことから、前掲各継手構造に対応する設計曲げモーメントについて検討する。

設計曲げモーメント式を誘導するために、3次元FEM解析を行った。解析モデルは図-13に示す2辺単純支持



(a) 橋軸直角方向曲げモーメント



(b) 橋軸方向曲げモーメント(Mx)

図-14 曲げモーメント図

の無限連続版モデルとした。また、T荷重(後輪のみ、 $P=10\text{tf}$ 、載荷面積 $20\text{cm} \times 50\text{cm}$ )を橋軸方向1組、橋軸直角方向に可能なかぎり配置した。床版の支間は2~8mのケースとした。橋軸方向の長さは、無限版として扱うために、床版支間の2.5倍とした。各タイプの継手部の曲げ剛性は主鉄筋方向の剛性(EI<sub>y</sub>)が配力鉄筋方向(EI<sub>x</sub>)に比して大きい場合、直交異方性版として図-11のM-φ関係より求めたEI<sub>x</sub>を用いた曲げ剛性比 $\alpha$ (EI<sub>x</sub>/EI<sub>y</sub>)として考慮した。

#### 4.2 解析結果

各タイプの継手構造を用いた床版解析の結果得られた床版支間と曲げモーメントの関係を図-14に示す。また、比較のため鋼構造物設計指針<sup>3)</sup>の設計曲げモーメント(等方性版)の解析値も同図に示した。

図により、継手部の曲げ剛性比 $\alpha$ が小さくなるほど主鉄筋方向の曲げモーメントの分担率は大きくなり、逆に配力鉄筋方向の分担率はわずかに小さくなる。

##### (1) 橋軸直角方向曲げモーメントMy

継手構造を有する床版の断面設計にあたって、上の図に従って以下の設計曲げモーメント式を提案する。

なお、余裕量としては、支間2mに対して20%を、当面の合成床版における最大支間と考えられる12mで、0となるよう設定した。道路橋示方書<sup>4)</sup>の設計曲げモーメント $My_0 = (0.12L+0.07)P$ (ここに、P : T荷重(10tf))

を基準として、次式のように表わされる。

- ① タイプE0  
 $My = 1.23 My_0$  [tf m/m]
- ② タイプE1  
 $My = 1.13 My_0$  [tf m/m]
- ③ タイプE2  
 $My = 1.10 My_0$  [tf m/m]

##### (2) 橋軸方向曲げモーメントMx

本解析で得られた橋軸方向曲げモーメントM<sub>x</sub>は、道路橋示方書の設計曲げモーメント $Mx_0 = (0.10L+0.04)P$ に比べ、(1.03~1.07)M<sub>x0</sub>となり、継手構造の違いによる変化はほとんど見られず、道路橋示方書と同一の設計曲げモーメントを用いて良いことが確認された。

以上の結果から、道路橋示方書の設計曲げモーメント(等方性版)と比較して、床版解析値の橋軸方向曲げモーメントは継手構造(剛性比)に関わらずほぼ同程度の値である。しかし、橋軸直角方向の曲げモーメントは、曲げ剛性比によって大きく変化しているため設計時に十分考慮し、安全で経済的な継手構造を採択するのが望まれる。

#### 5. まとめ

- (1) HTB引張接合タイプE0は、疲労試験の場合に、継手部下面での開口により、ステップ2で底鋼板が破壊した。
- (2) 改良継手E1, E2は、継手部下面の開口を抑え、底鋼板の疲労破壊に至るまで継手性能の低下がほとんど見られず、最大荷重は設計荷重に対して3倍以上の安全率を有している。
- (3) 疲労試験の破壊形式は、接合鋼板の溶接点付近における底鋼板の疲労による破壊であり、底鋼板の疲労強度はJSSCのF等級とH等級の間に分布している。
- (4) 継手構造を有する床版の活荷重に対する曲げモーメントについてFEM解析を行った。道路示方書の設計曲げモーメントと比較して、主鉄筋方向の曲げモーメントは曲げ剛性比によって大きく変化するが、配力鉄筋方向曲げモーメントは同程度の値であることがわかった。

#### 参考文献

- 1) 土木学会合成床版WG: 道路橋合成床版の橋軸方向継手の疲労性状に関する実験的研究 1996.3
- 2) 日本鋼構造協会: 鋼構造物の疲労設計指針・同解説 1993
- 3) 土木学会: 鋼構造物設計指針 PART B 1997
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 1996