

引張ボルトを用いた道路橋合成床版の配力鉄筋方向継手とその設計曲げモーメントに関する検討

Longitudinal joint with tensile grip connection and its design bending moment
of composite slab decks in highway bridges日野 伸一*, 徐 聖卓**, 太田 俊昭***
Shinichi HINO, Sungtag SEO, Toshiaki OHTA

*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 九州大学大学院教授 (〒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 construction of the composite slab decks, it is necessary to join adjacent blocked bottom plates in the longitudinal direction. As a performance demanded of the joint structure in longitudinal direction, it is necessary to fully transmit bending moment and shearing force and to simplify the connection. 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 stiffness of the tensile grip connection with high strength bolts are discussed by using three-dimensional elasto-plastic FEM. Additionally the paper reports the design bending moment for highway deck slabs with longitudinal joints whose span length of 2 to 8m, based on the FEM analyses.

Key Words: steel-concrete composite slab, tensile grip connection, design bending moment

1. はじめに

近年、道路橋床版の施工においては、コスト縮減・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、橋軸方向（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。現在、合成床版に用いられる継手構造として、施工性重視の観点からコンクリートの漏出防止程度のスタッドボルト添接やゴムシールとし、継手断面の設計は底鋼板を無視したRC断面とする構造が多用されている。しかし、合成床版を連続合成桁に適用し、底鋼板を主桁断面に算入することにより設計の合理化を図る場合、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伝達するとともに、単純化され施工性に優れた継手構造とすることが望まれる。

一方、道路橋示方書¹⁾におけるRC床版の設計曲げモーメントは、RC床版を等方性の無限単純版にモデル化し、断面に発生する曲げモーメントの最大値を求め、これに10~20%の余裕を見込んで設定されたものである。合成床版の設計においても、基本的にはこの考え方を基に解析が行われ、設計曲げモーメントが決められている。これに対して、合成床版の継手部における曲げ剛性は、配力鉄筋方向に比べて主鉄筋方向のほうが大きく、等方性版と考えることが必ずしも適当でない場合が多い。

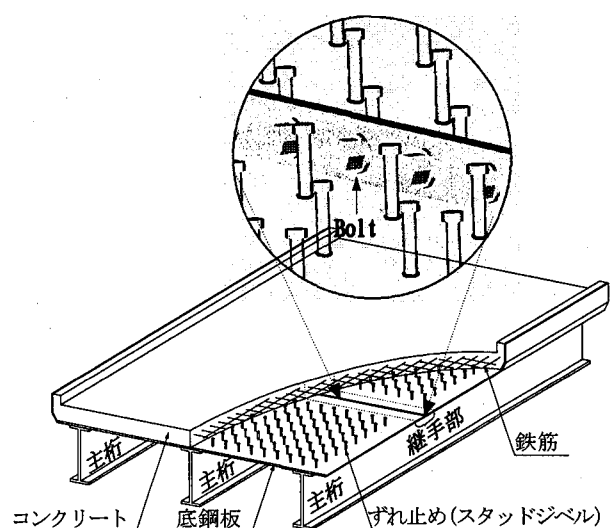
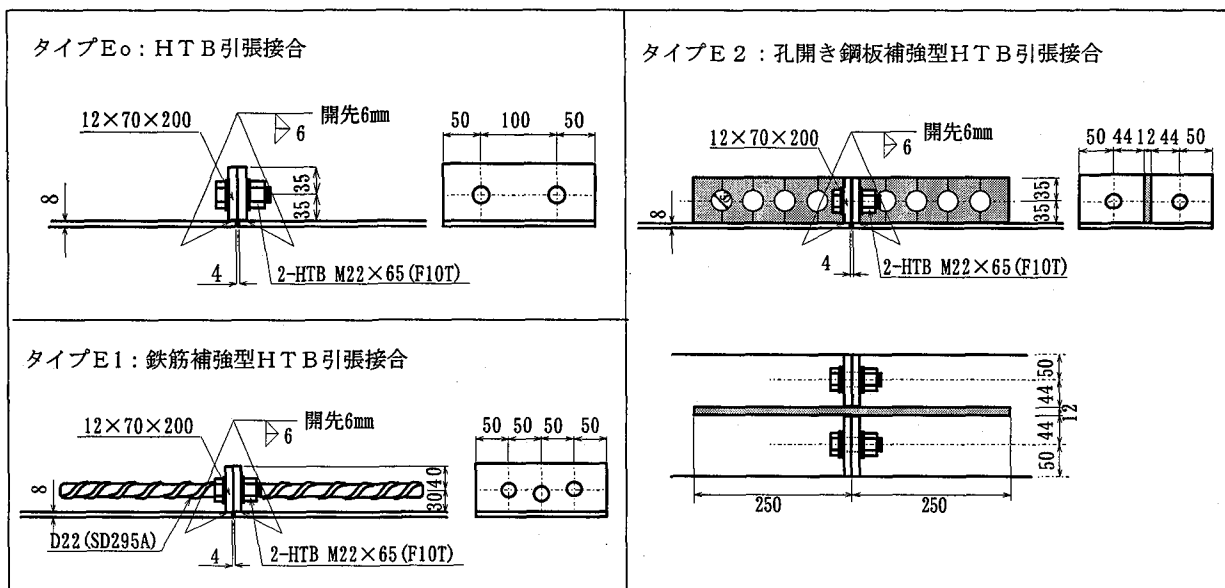


図-1 合成床版概念図

以上より、本研究では、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、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実験的・解析的に検討した。

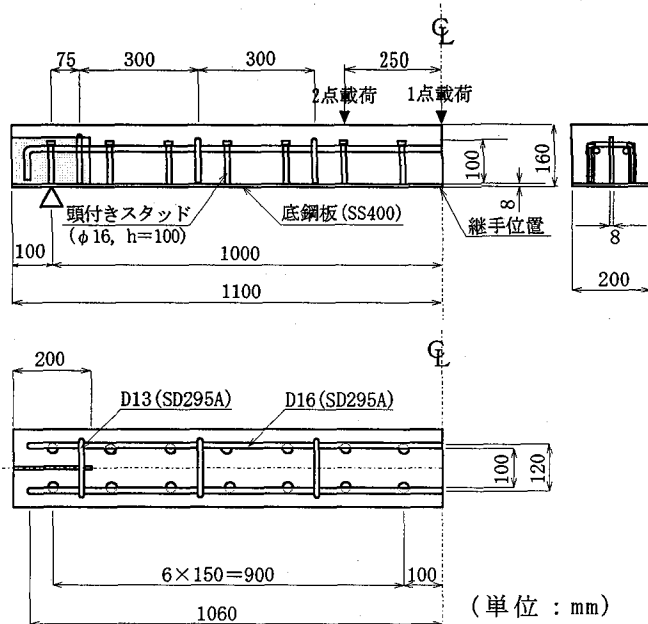


図－2 継手構造

表－1 繰返し载荷試験荷重

ステップ	上限荷重		荷重
	2点载荷	1点载荷	
1	20.5kN	15.6kN	道示 ¹⁾ による配力鉄筋方向設計曲げモーメントに相当する荷重
2	36.2kN	27.4kN	ステップ1の2倍の曲げモーメントに相当する荷重
3	58.8kN	44.1kN	鋼板に発生する直応力範囲が疲労設計指針に定めるスタッド溶接継手の疲労強度に相当する荷重

(下限荷重 1点：3.7kN, 2点：4.9kN)



図－3 供試体諸元

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にした支間2～8m床版のFEM解析を行い、継手部の異方性を考慮した床版の設計曲げモーメントについての考察も行った。

2. 実験・解析概要

2.1 継手構造

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E0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E1、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E2および比較用の継手無し供試体（タイプA）の合計4種類について実験を行った。

2.2 载荷試験方法

曲げ疲労試験は、中央2点载荷、1点载荷ともに底鋼板に作用する引張応力振幅に対して、表－1のような3段階の荷重振幅を設定して、各々50～100万回の繰返し载荷を行った。また、静的繰返し载荷試験は、曲げ疲労試験における各ステップの载荷、除荷を静的に各3回繰返した後、破壊に至るまで荷重増分4.9kNの漸増载荷を行い、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なった。载荷装置は294kN定点疲労载荷試験装置を用いて曲げ疲労試験および静的繰返

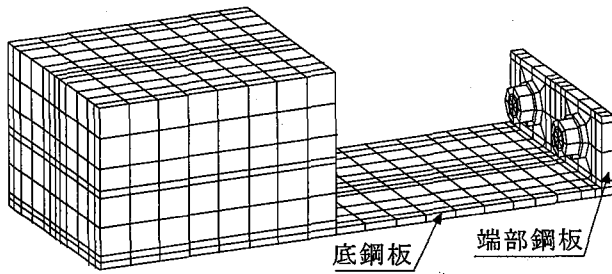
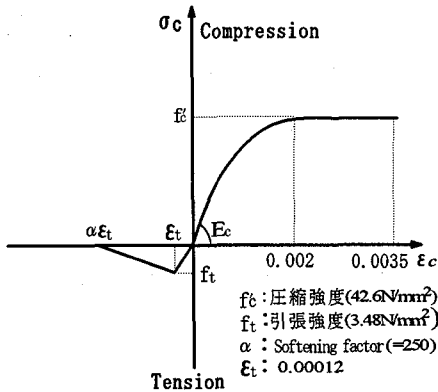
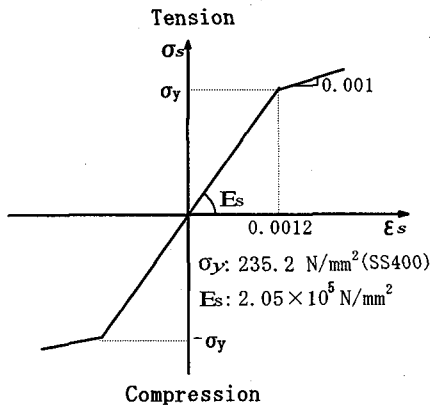


図-4 要素分割図



a) コンクリートの材料特性



b) 鋼材の材料特性

図-5 材料特性

し載荷試験を行った。

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

表-2 実験の結果

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 (2)	36.2kN 54.8万	底鋼板の疲労破壊
		No. 3 (1)	20.5kN 100万	ボルトの疲労破壊
		(2)	36.2kN 55.9万	
		No. 4 (2)	36.2kN 94.2万	底鋼板の疲労破壊
		(1)	20.5kN 50万	
	疲労 (1点)	(2)	36.2kN 51万	底鋼板の疲労破壊
		No. 6 (1)	15.6kN 50万	底鋼板の疲労破壊
		(2)	27.4kN 91万	
		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)	(1)	20.5kN 50万	
		(2)	36.2kN 100万	底鋼板の疲労破壊
		(3)	58.8kN 12万	
	疲労 (1点)	(1)	15.6kN 50万	
		(2)	27.4kN 100万	底鋼板の疲労破壊
		(3)	44.1kN 20万	
		(1)	15.6kN 50万	
		(2)	27.4kN 100万	底鋼板の疲労破壊
		(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)	(1)	20.5kN 50万	
		(2)	36.2kN 100万	底鋼板の疲労破壊
		(3)	58.8kN 2.8万	
	疲労 (1点)	(1)	15.6kN 50万	
		(2)	27.4kN 100万	底鋼板の疲労破壊
		(3)	44.1kN 30万	
		(1)	15.6kN 50万	
		(2)	27.4kN 100万	底鋼板の疲労破壊
		(3)	44.1kN 9万	
タイプA	静的 No. 1	実験: 157.3kN, 計算: 133.3kN		上面コンクリート破壊

い、鉄筋には軸力のみが伝わる2節点棒要素を用いた。引張継手においては、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。コンクリートおよび鋼材の材料特性を図-5に示す。コンクリートの圧縮域は圧縮側の終局ひずみを0.0035とし、鋼材はEuler Von and Hillによるバイリニアモデルを使用した。

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-2に示す。疲労試験に関しては、タイプE0 No. 3供試体を除き、いずれ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 変形性状

変形性状の一例として、疲労試験でのタイプE1, E2の支間中央位置のたわみ変化を図-6に示す。図より、各タイプ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

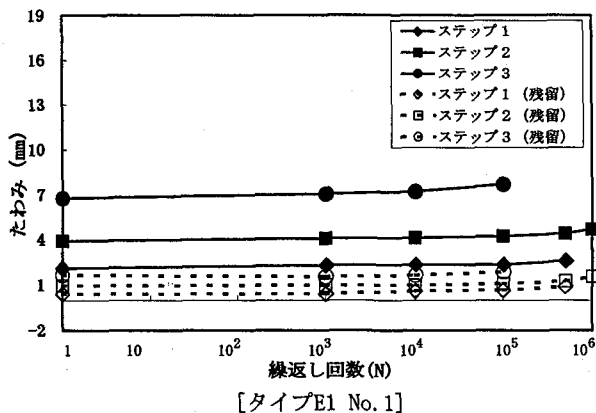


図-6 支間中央部のたわみ履歴曲線 [疲労]

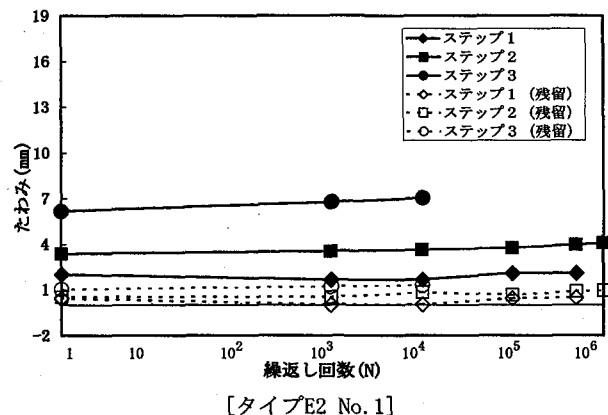


図-7 底鋼板の応力振幅－開口幅振幅曲線

る。図-7は、底鋼板の応力振幅－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曲げモーメントに支
配されることが確認できる。また、図-8は、静的載荷
試験での各タイプの支間中央位置の荷重－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）までほとんど線形挙動をして
いることがわかる。継手部の補強鉄筋および孔開き鋼板
の応力伝達状況を把握するために、図-9、10に補強
材の荷重－ひずみ曲線を示す。補強材は端部鋼板の開口
に抵抗し、曲げ剛性を高める作用がある。図より、補強
材は低い荷重段階から降伏まで曲げ引張力を分担する。
その結果、継手部の応力集中が緩和され、継手部を補強
しないものより開口幅が1/2以下に抑えられた。図-1
1はFEM解析による底鋼板と端部鋼板の変形図を示して

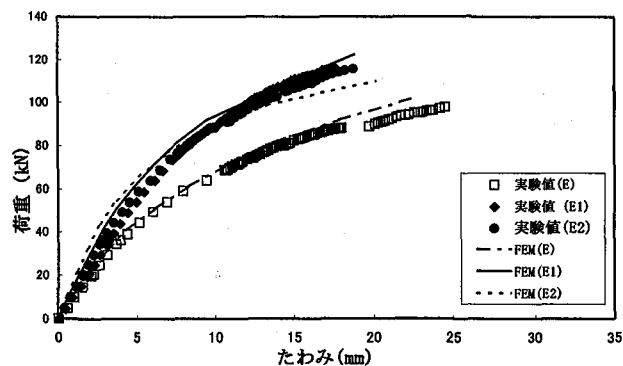


図-8 支間中央部の荷重－たわみ曲線 [静的]

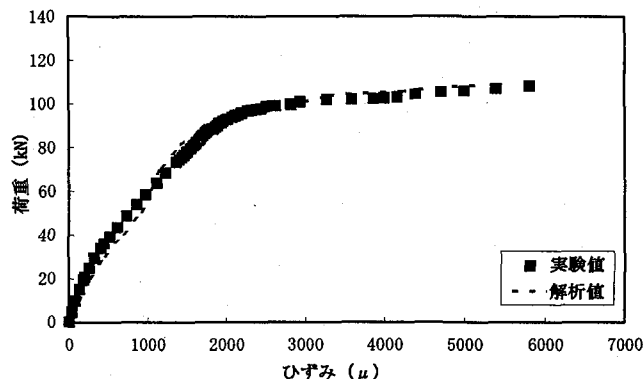


図-9 補強鉄筋の荷重－ひずみ曲線 [タイプE1 静的]

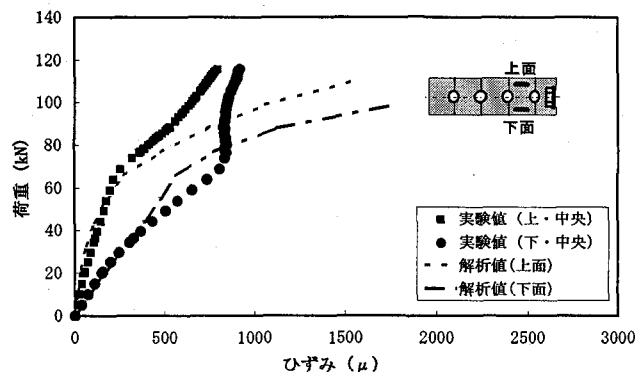


図-10 孔開き鋼板の荷重－ひずみ曲線 [タイプE2 静的]

おり、底鋼板の中央部に局所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 簡易式による開口幅の算定

実験の結果、中央部の継手開口幅曲線とたわみ曲線は
非常によく似た挙動を示しており、継手部開口幅とたわ
みの間には相関性があるといえる。

そこで、その相関性がどのような関係なのかを明らか
にするために簡単なモデル³⁾を用いて開口幅を計算す
る。図-12にたわみと開口幅の変形を示しており、接
合部の端部鋼板の変形はなく、直線形状で接合部が開く
ものと仮定する。

同図より、

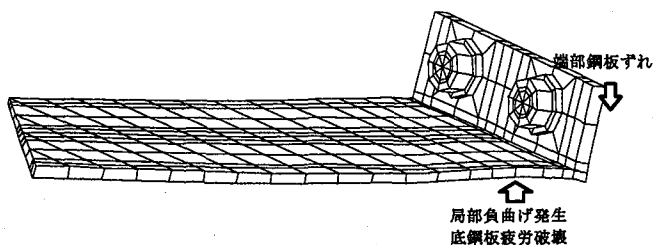


図-11 FEM解析による変形状

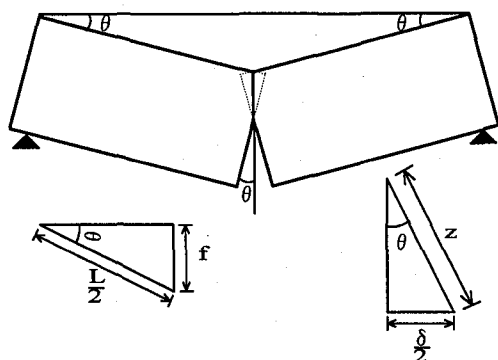


図-12 たわみと開口幅の関係図

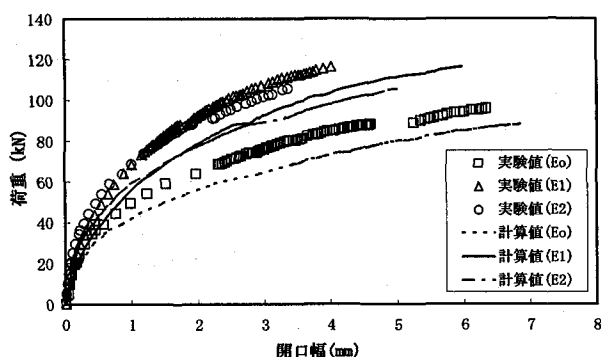


図-13 継手部の開口幅曲線 [静的]

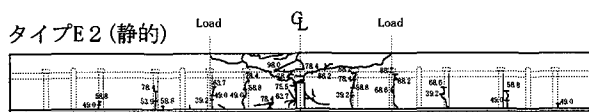
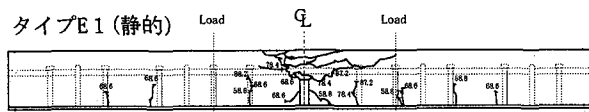
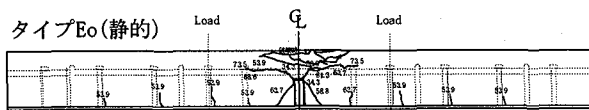


図-14 ひび割れ分布図

$$f = \frac{L}{2} \sin \theta$$

$$\delta = 2z \sin \theta$$

$$\therefore \delta = \frac{4zf}{L}$$

ここに、

θ : 継手部のたわみ角

z : 底鋼板下面からボルト位置までの距離

δ : 継手部の開口幅

L : スパン

f : 継手部のたわみ

上の式を用いて実験のたわみから開口幅を求めると図-13のようになる。この結果から、たわみと開口幅の相関性を十分に説明でき、接合部断面の剛性がはり全体剛性を決定すると考えられる。

3.3 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-14に示す。タイプE0については、継手部端部鋼板の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曲げやせん断の影響によるものと思われる。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、継手部の補強効果が認められる。

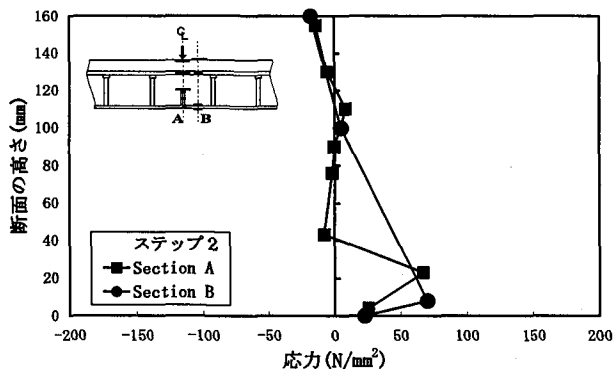
3.4 接合部の端部鋼板の応力分布

疲労試験のステップ2でひずみゲージ計測値より得られた継手部端部鋼板と中央断面から5cmの位置の支間方向応力分布を図-15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。

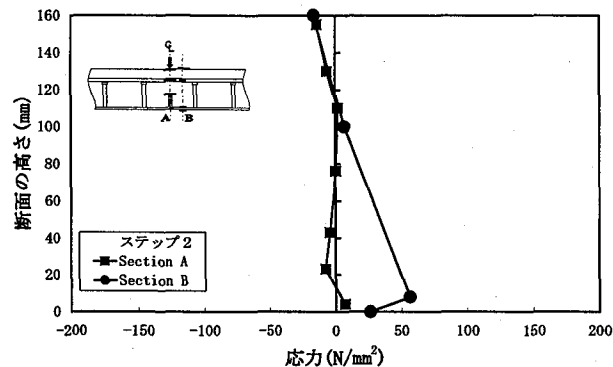
これに対して、タイプE1, E2は中央断面の応力変動は大きく見られず、補強材とボルトが応力分担し、変化断面で応力集中を十分に避けることができる。

3.5 曲げモーメントと曲率 ($M-\phi$) 曲線

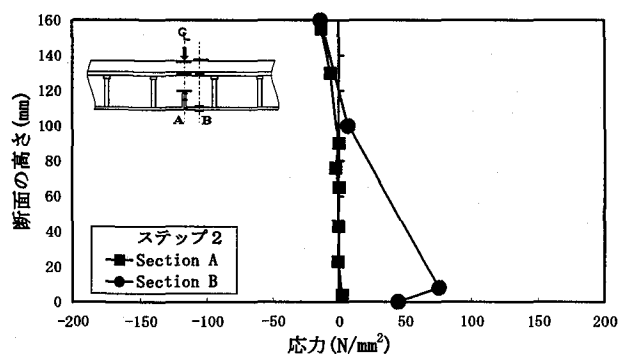
継手部の変形による曲げ剛性の低下を調べるため図-16に継手部の曲げモーメント M と曲率 ϕ の関係を示す。ここで、曲率 ϕ はコンクリート上面および底鋼板下面のひずみ実測値を用いて求めた。曲線の勾配は接合部の曲げ剛性 EI を示しており、荷重の初期においては弾性的に変化するが、3.3節のひび割れ分布図に示すように、端部鋼板とコンクリートの接合面にひび割れが発生するとともに曲げ剛性が急激に変化し、その後徐々に低下する。各タイプの曲げ剛性を比較するとタイプAが最も大きく、以下タイプE1, E2順となり、いずれもタイプE0に比べて剛性は明らかに大きく、継手構造E1, E2の補強効果が認められる。



(a) [タイプE0 No. 3]



(b) [タイプE1 No. 3]



(c) [タイプE2 No. 3]

図-15 端部接合板の応力分布

3.6 S-N曲線と継手性能の評価

図-17は継手底部鋼板のS-N曲線を示す。載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

σ_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

ここで、実線は日本鋼構造協会の疲労設計指針⁴⁾に規定される許容疲労応力範囲であり、継手底部鋼板の疲労強度はF等級とH等級の間に分布している。

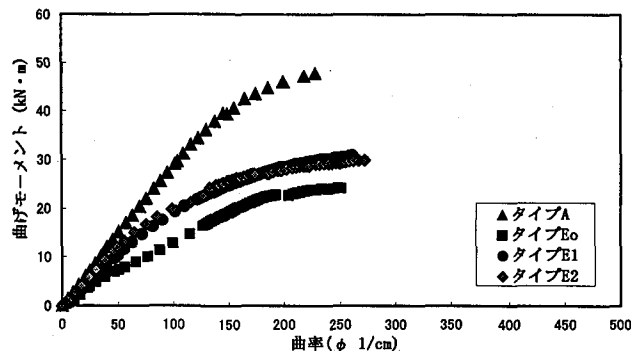


図-16 曲げモーメント-曲率 (M-φ) 曲線

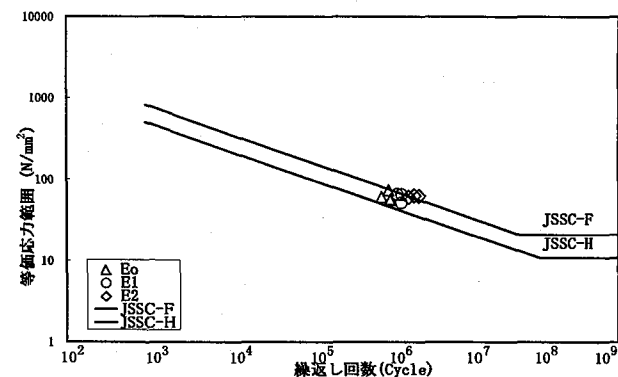


図-17 HTB引張接合継手のS-N曲線

次に、以上の疲労・静的繰返し載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点載荷と2点載荷の差異は顕著にみられず、曲げ疲労により継手底部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。

静的載荷試験では、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、全ての継手施工が床版の上での作業とな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載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、

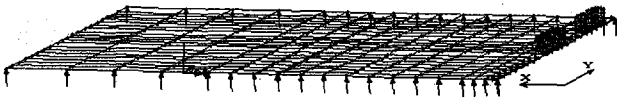


図-18 解析モデル

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-18に示す2辺単純支持の無限連続版モデルとした。T荷重（後輪のみ（ $P=10\text{tf}$ 、載荷面積 $20\text{cm}\times 50\text{cm}$ ）、前輪考慮（支間5m以上））を橋軸方向1組、橋軸直角方向に可能なかぎり配置した。また、衝撃の影響として、衝撃係数 $i=20/(50+L)$ を考慮した。床版の支間は2～8mのケースとし、底鋼板の1パネルは2.5m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_y ）が配力鉄筋方向の剛性（ EI_x ）に比して大きいため、直交異方性版として図-16の $M-\phi$ 関係より求めた EI_x を用いた曲げ剛性比 α （ I_x / I_y ）として考慮した。

4.2 解析結果

継手部の異方性度⁵⁾を考慮して、各タイプの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-19に示す。また、比較のため鋼構造物設計指針⁶⁾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。同図より、継手部の曲げ剛性比 α 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のが分かる。なお、 $\alpha=1$ （等方性版）の本解析値と鋼構造物設計指針と一致しないのは、後者が20%（2m）～0%（12m）の余裕率を考慮しているためである。

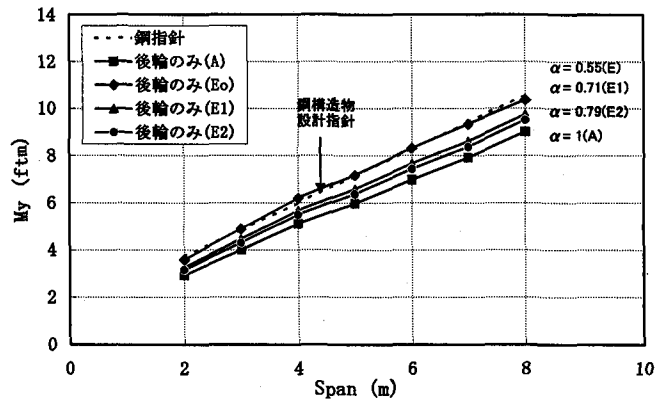
(1) 主鉄筋方向曲げモーメント M_y

解析値に対する鋼板・コンクリート合成床版の設計式の余裕率（設計値／解析値）を図-20の(a)に示しており、余裕率は支間長が大きくなるほど小さくなる。特にタイプEoは3m、タイプE1、E2は7mから余裕率が1以下となる。この結果から、この種の継手構造を用いた床版に対して新しい主鉄筋方向設計曲げモーメントを設定する必要がある。

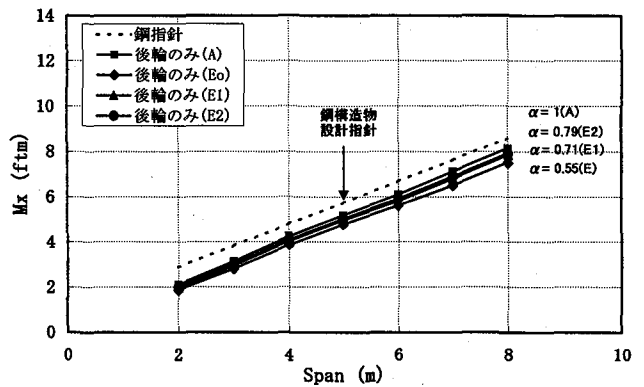
そこで、前・後輪のT荷重と、余裕量を考慮した設計曲げモーメント式を鋼構造物設計指針の設計曲げモーメント $Myo = (0.114L + 0.144)P$ （ここに、 P ：T荷重1輪分の設計荷重、 L ：床版の支間（0～8m））を基準として、次式のように提案する。

① タイプEo

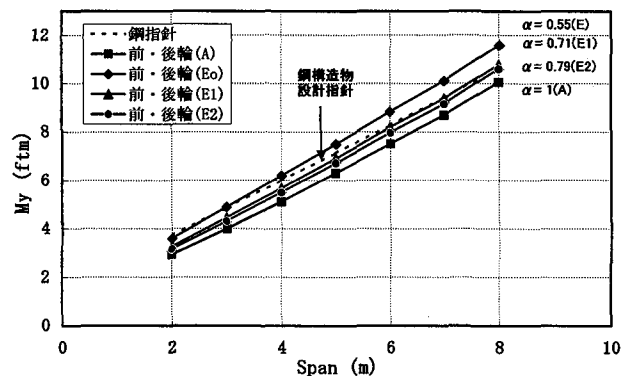
$$My = 1.20 Myo \text{ [tf m/m]}$$



(a) 主鉄筋方向曲げモーメント（後輪のみ・ M_y ）



(b) 配力鉄筋方向曲げモーメント（後輪のみ・ M_x ）



(c) 主鉄筋方向曲げモーメント（前後輪・ M_y ）

図-19 解析値と鋼構造物設計指針と比較

② タイプE1

$$My = 1.11 Myo \text{ [tf m/m]}$$

③ タイプE2

$$My = 1.08 Myo \text{ [tf m/m]}$$

また、これを図示したものを図-21(a)に示す。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。

(2) 配力鉄筋方向曲げモーメント M_x

鋼板・コンクリート合成床版の設計値に対する余裕率（設計値／解析値）を図-20(b)に示しており、余裕率

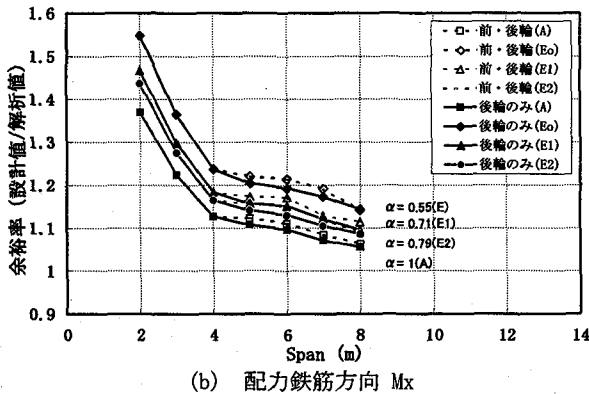
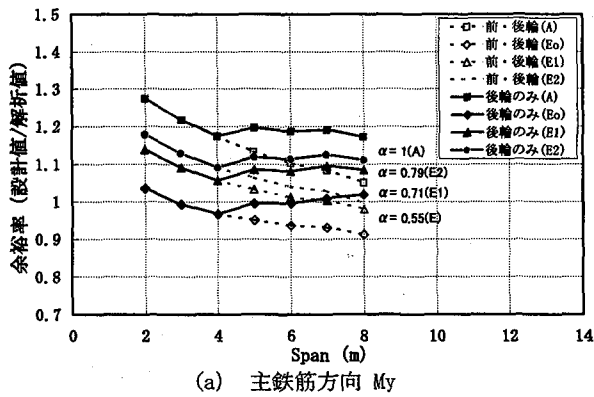


図-20 床版支間と設計指針の余裕率関係

は支間長が大きくなるほど小さくなるが、曲げ剛性比 α が低下するほど逆に大きくなる。しかし、すべての継手構造に対して 1 以上の余裕率を有している。

図-21の(b)に、前・後輪のT荷重と、余裕量を考慮した設計曲げモーメント式を提案する。

本解析で得られた配力鉄筋方向曲げモーメント M_x は、鋼構造物設計指針の設計曲げモーメント $M_{xo} = (0.095L + 0.098)P$ (ここに、 P : T荷重1輪分の設計荷重、 L : 床版の支間 ($0 \sim 8m$)) に比べ、 $(0.94 \sim 0.99)M_{xo}$ となり、継手構造の違いによる変化はほとんど見られず、鋼構造物設計指針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、鋼構造物設計指針の設計曲げモーメント (等方性版) と比較して、床版解析値の配力鉄筋方向曲げモーメントは継手構造 (剛性比) に関わらず十分な余裕率を有し、ほぼ同程度の値である。しかし、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しているので設計時に十分考慮し、安全で経済的な継手構造を選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

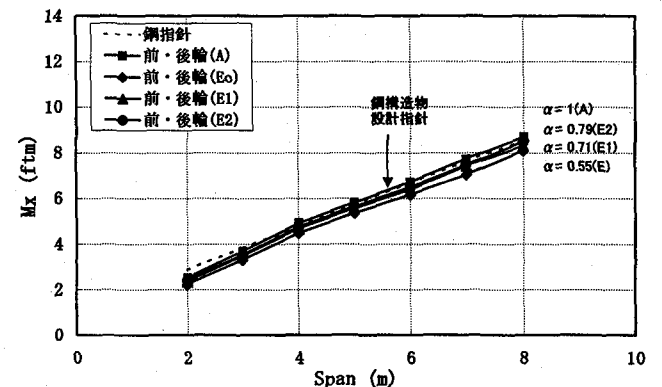
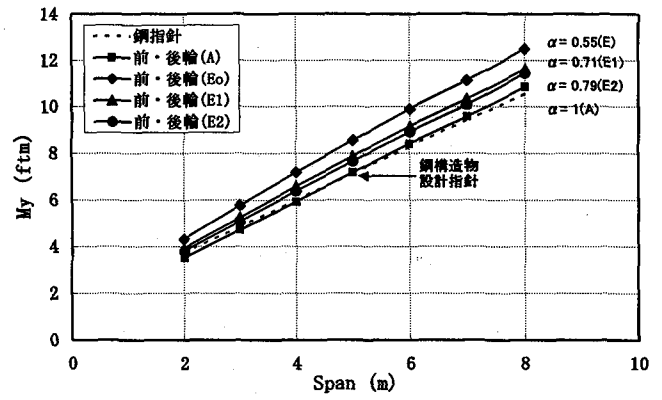


図-21 設計曲げモーメントの提案

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) 引張ボルト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解析を行い、等方性版に基づく現設計式は継手部の剛性度によって大きく変動することから異方性を考慮した設計モーメント式を提案した。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 1996
- 2) 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
- 3) Michel Virlogeux 著、若狭、西村訳：アウトケーブル構造における非線形解析、橋梁
- 4) 日本鋼構造協会：鋼構造物の疲労設計指針・同解説 1993
- 5) 土木学会：鋼橋床版調査研究小委員会第2分科会報告 (案)、(執筆中)
- 6) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 1997

(2000年9月14日受付)