

底鋼板に引張ボルト継手を有する鋼合成床版の押抜きせん断耐力と設計曲げモーメントに関する考察

Punching shear strength and design bending moment for steel-concrete composite deck slabs with tensile grip connection

徐 聖卓*, 日野 伸一**, 太田 俊昭***, 甲斐田 誠****

Sungtag SEO, Shinichi HINO, Toshiaki OHTA, Makoto KAIDA

*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府	(〒812-8581 福岡市東区箱崎 6-10-1)

In the construction of composite deck slabs, it is necessary to join two adjacent blocked bottom plates to form one united plate in the longitudinal direction. In this paper, two types of longitudinal joint for Robinson-type composite deck slabs are proposed, and static test carried out by using slab specimens is described. The paper also reports the design bending moment for jointed slabs with span length of 2 to 8 m by using FEM analysis. The results of the tests and analysis are summarized as follows: (1) The failure mode of test slabs is punching shear failure. The reinforced joint structure E1 is able to enhance the strength against punching shear failure. (2) The rotation spring constant is used to examine the joint performance. As a result, the decrease of joint performance is understood. (3) New design bending moments which change the orthotropic degree of the joint are proposed on the basis of three-dimensional FEM analysis.

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

1. はじめに

近年、橋梁床版の建設においては、コスト縮減・高耐久性・現場作業の省力化・工期短縮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。この構造形式は、施工や運搬などの制約から分割して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。そのため橋軸方向の継手構造に要求される性能として、床版を連続させ、曲げモーメントとせん断力を伝達するとともに、現場施工性を考え、単純化され作業量の少ない継手構造とすることが要求される。

そこで、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橋軸方向継手構造を取上げ、継手部を有する合成床版の剛性や耐力について実験的・解析的検討を行った。さらに、橋軸方向継手部の曲げ剛性 I_x と橋軸直角方向の曲げ剛性 I_y との剛性比（異方性度： $\alpha = I_x / I_y$ ）を $\alpha = 0.5 \sim 0.9$ に変化させた床版支間2～8mの合成床版についてFEM解析を行い、継手部剛度が床版の設計曲げモーメントに及ぼす影響についても考察を行った。

本研究で取り上げた継手構造の特長は以下の通りである。

①接合端部の鋼板が横リブ機能として、底鋼板を補強し、

コンクリート打設時のたわみを抑制する。

②橋軸方向の鋼版・コンクリート接合面のずれ止めとして機能する。

③継手作業は床版上で可能なため施工性が良い。

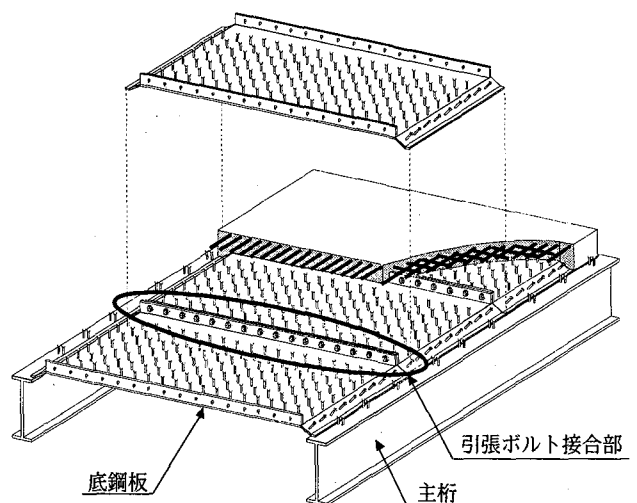


図-1 合成床版の底鋼版概念図

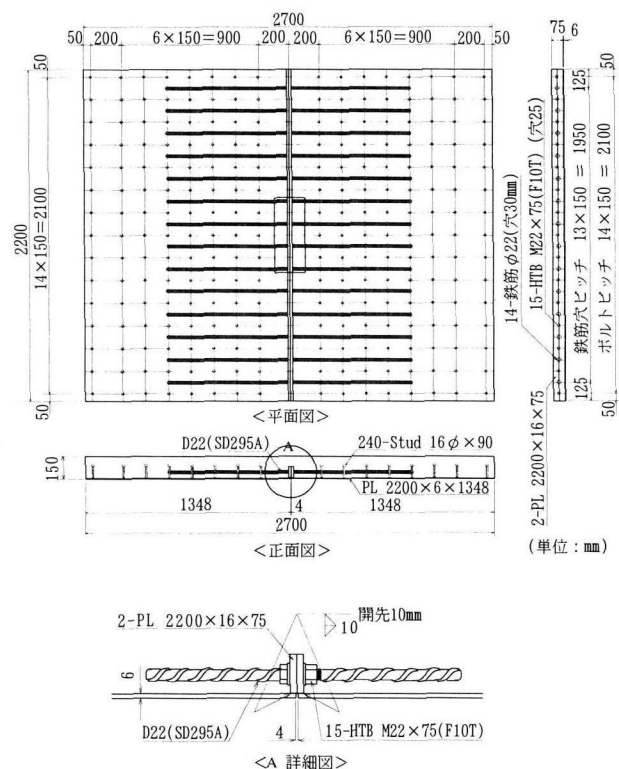
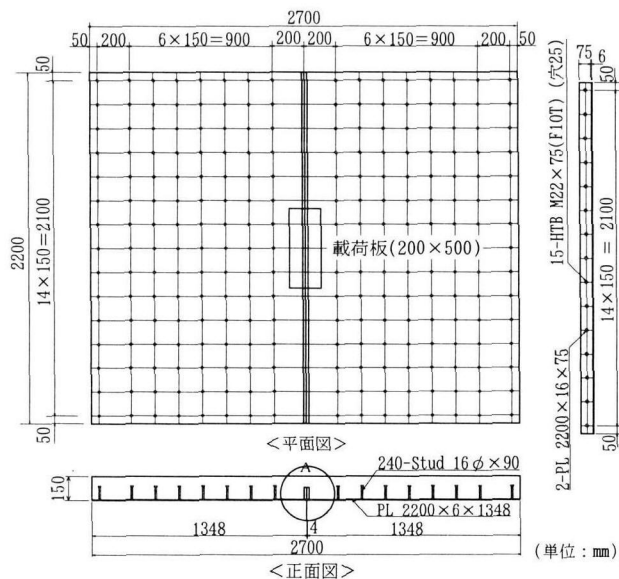


図-2 継手構造

2. 実験と解析の概要

2.1 実験方法

先に行った梁供試体による静的・疲労試験の結果から、

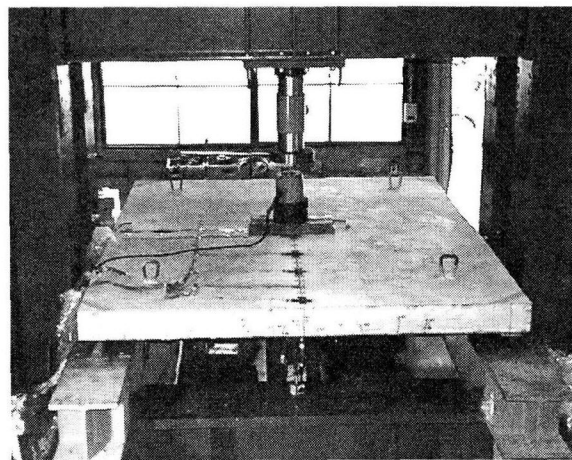


写真-1 実験の状況

疲労耐久性、静的曲げ耐力、施工性などについて継手部の基礎的な性能が把握された¹⁾。ここでは、実断面に近い合成床版継手部を用いた床版供試体に対して、その押抜きせん断挙動の把握を目的としている。

実際の床版は、橋軸直角方向に比べ、継手部の存在のために橋軸方向の曲げモーメント分担率が小さくなる。その影響を把握するとともに、設計の妥当性について検討した。供試体の設計は、鋼構造物設計指針 PART Bをもとに、また、引張ボルト継手部については、梁の実験結果、橋梁用高力ボルト引張接合設計指針（案）および阿部らが行った実験結果を参照して設計を行った²⁾。ボルトピッチは接合部の許容引張力に基づき決定し、補強鉄筋ピッチはボルトピッチと同様とした。また、補強鉄筋長はコンクリート標準示方書の鉄筋の定着長に基づき算定した。

2.1.1 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(a)に示すような高力ボルト（HTB）継手タイプE0を基本とし、接合端部のリブプレートの開孔に軸方向鉄筋を挿入して補強した構造E1（図2-(b)）および比較用の継手無し供試体（タイプA）の合計3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梁供試体による実験結果を踏まえて選定したものである³⁾。また、高力ボルトはトルク法により、ボルト耐力の75%となる軸力を導入した。押抜き試験に用いた供試体は図-2に示すようにスパン2mの中央点で結合された橋軸方向の幅2.7m、全高15cm（底鋼板厚6mm）の合成床版供試体であり、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。使用材料は、鉄筋：SD295A、ボルト：F10T、M22、底・端部鋼板：SS400、コンクリート圧縮強度：35.1N/mm²を用いた。

2.1.2 荷重試験方法

実験の状況を写真-1に示す。床版支間は2.0mとし、支点は、回転および水平方向の移動を可能とした。荷重載荷は油圧ジャッキを用い、200mm×500mm×50mmの載荷板を介して行った。荷重は10kNのステップで単調増加載荷し、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。

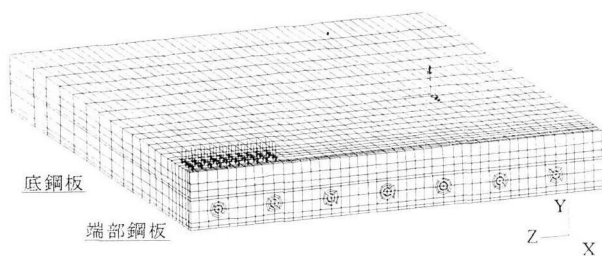


図-3 要素分割図 (対称 1/4 モデル)

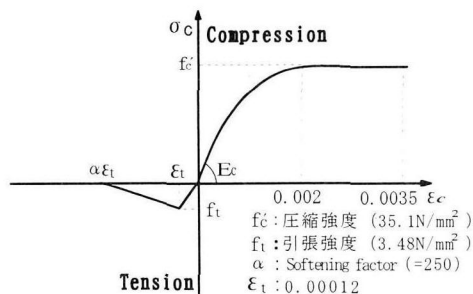


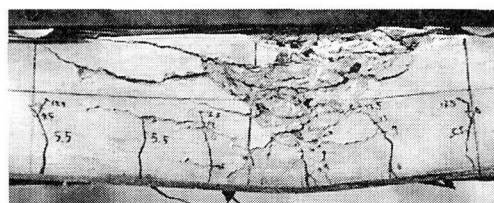
図-4 コンクリートの構成則

表-1 実験の結果

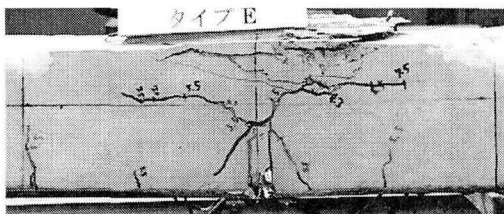
供試体		荷重ステップ	上限荷重	繰返し回数	破壊形式
タイプE0	静的	No. 1	実験: 97.8kN, 計算: 106.7kN		上面コンクリート破壊
	疲労 (2点)	No. 2	(2)	36.2kN 54.8万	底鋼板の疲労破壊
		No. 3	(1)	20.5kN 100万	ボルトの疲労破壊
		No. 3	(2)	36.2kN 55.9万	
		No. 4	(2)	36.2kN 94.2万	底鋼板の疲労破壊
		No. 5	(1)	20.5kN 50万	底鋼板の疲労破壊
		No. 5	(2)	36.2kN 51万	
	疲労 (1点)	No. 6	(1)	15.6kN 50万	底鋼板の疲労破壊
		No. 6	(2)	27.4kN 91万	
		No. 7	(1)	15.6kN 50万	底鋼板の疲労破壊
	No. 7	(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
		No. 2	(2)	36.2kN 100万	
		No. 2	(3)	58.8kN 12万	
	疲労 (1点)	No. 3	(1)	15.6kN 50万	底鋼板の疲労破壊
		No. 3	(2)	27.4kN 100万	
		No. 3	(3)	44.1kN 20万	
		No. 4	(1)	15.6kN 50万	底鋼板の疲労破壊
		No. 4	(2)	27.4kN 100万	
		No. 4	(3)	44.1kN 15万	
		No. 4	(3)	44.1kN 15万	
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

2.2 解析方法

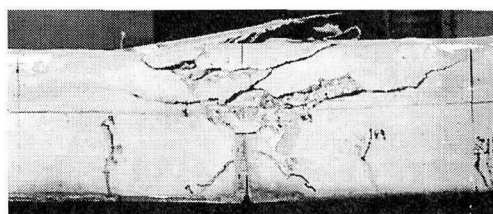
荷重試験にあわせて、汎用解析プログラムLUSAS VER 13.を用いて、弾塑性FEM解析を行った。継手部の幅方向の非均質性を考慮するため、3次元弾塑性解析で接合板の挙動、すなわち継手の剛性および変形を検討した。図-3は対称1/4部分の要素分割図を示す。なお、それぞれのモデル化については、鋼板、コンクリートは3次元8節点ソリッド要素を用い、鉄筋には軸力のみが伝わる2節点棒要素を用いた。引張継手においては、ボルトは実構造を精度よく表現できるソリッド要素でモデル化し、ボルトの頭部は端部鋼板と剛結とした。また、コンクリートと底鋼板および補強鉄筋の付着は完全と仮定した。コンクリートおよび鋼材の



(a) タイプA



(b) タイプE0



(c) タイプE1

写真-2 梁の曲げ破壊状況 (静的荷重)

材料特性について、コンクリートは図-4に示すように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

3.1 梁の静的および疲労荷重試験

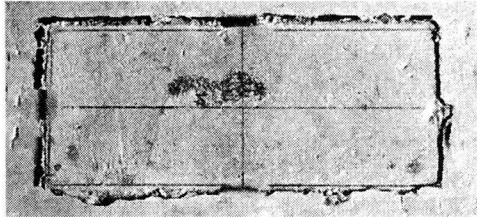
合成床版供試体の試験結果について考察する前に、参考のため、先に行った同一の継手構造を有する梁供試体の破壊耐力および形式について概要を紹介する¹⁾。供試体は支間の中央部に継手構造を設置し、橋軸直角方向を対象として製作したものであり、疲労試験および静的荷重試験結果の一覧を表-1に示す。疲労試験に関しては、タイプE0 No. 3供試体を除き、いずれも支間中央から約2.5cmのところで底鋼板の疲労破断により破壊した。一方、静的荷重試験に関しては、いずれもコンクリート上面が圧壊した。破壊荷重の計算値は、RC理論に基づき求めたものである。その静的荷重試験の破壊形式を写真-2に示す。

3.2 床版の荷重試験

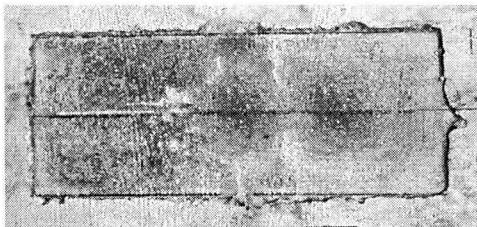
床版の荷重試験の結果を表-2に示す。写真-3は各供試体の破壊状況を示しており、いずれの供試体においても押抜きせん断破壊であった。表に示している梁の曲げ耐力の計算値は、RC理論に基づいて求めたものである。梁試験の場合は、計算値と良く一致しており、版試験の場合は、曲げ耐力(タイプA: 1195.6kN)が押抜きせん断耐力に比べて大きい。押抜きせん断破壊であった。押抜きせん断耐力は、タイプAに比べてE1が0.84、E0が0.73である。このことより、押抜きせん断耐力についても、梁試験の曲げ破壊と同様に、鉄筋補強によるタイプE1の補強効果が認められる。

表－2 実験結果および計算結果との比較

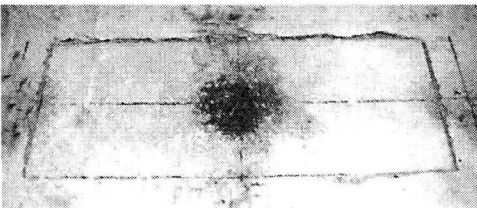
供試体	床版		耐力比（床版）		備考（梁）			
	破壊荷重 (Ps) (kN)	押抜きせん断耐力計算値 (Pc) (kN)	Ps/Pc	Ps/Ps (A)	破壊荷重 (Pb) (kN)	曲げ耐力計算値 (Pbu) (kN)	Pb/Pbu	Pb/Pb (A)
タイプ A	1048.6	839.3	1.25	1.00	157.3	133.3	1.18	1.00
タイプ E1	882.0	726.2	1.21	0.84	116.3	117.1	0.99	0.74
タイプ Eo	764.4	611.2	1.25	0.73	97.8	106.7	0.92	0.62



(a)タイプ A

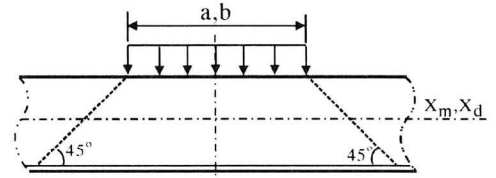


(b)タイプ Eo

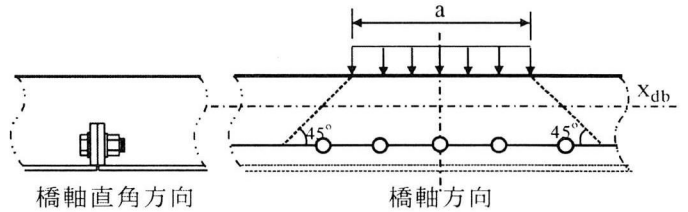


(b)タイプ E1

写真－3 載荷面の押し抜きせん断破壊状況



(a)タイプ Aの橋軸直角方向および橋軸方向断面



(b)タイプ Eo, E1の橋軸方向断面

図－5 押抜きせん断破壊時の応力分布仮定（断面）

$$\tau_{smax} : \text{コンクリートの最大せん断応力度} \\ = 24.6 \cdot \sigma_{ck} - 0.024 \sigma_{ck}^2 \text{ (kN/mm}^2\text{)}$$

ここで、図－5に破壊直前の破壊断面の応力分布を推定したモデルに示す。タイプEo, E1の橋軸方向には、載荷板の下の継手部による不連続断面を含んでいる。その不連続断面があることによって、載荷板の下の中立軸 (X_{db}) が変化する。その影響を考慮するため、橋軸方向の断面は中央の継手断面を用いて耐力を算出した。表より明らかなように、上記計算値は実験値のほぼ80%の値を一様に示していることがわかる。以上より、本構造による継手部の有無に関わらず、合成床版の押抜きせん断耐力は、松井式を準用した算定式で安全側に評価可能と考えられる。

3.3 押抜きせん断耐力

表－2の押抜きせん断耐力 (P_c) の計算値は、RC床版を対象とした松井式を準用した以下の算定式に基づき求めたものである⁴⁾。

(a)タイプ A

$$P_c = \tau_{smax} \{ 2(a + 2x_m)x_d + 2(b + 2x_d)x_m \} \quad (1-1)$$

(b)タイプ Eo, E1

$$P_c = \tau_{smax} \{ 2(a + 2x_m)x_{db} + 2(b + 2x_{db})x_m \} \quad (1-2)$$

ここに、

- a, b : 載荷板の橋軸直角方向、橋軸方向の辺長(cm)
- X_m, X_d : 橋軸直角方向および橋軸方向に直角な断面の引張側コンクリートを無視した断面の中立深さ(cm)
- X_{db} : 橋軸方向に直角な断面 (Eo : ボルト, E1 : 補強鉄筋まで) の引張側コンクリートを無視した断面の中立深さ(cm)

3.4 変形状

図－6, 7に静的載荷試験でのタイプA, Eo, E1の中央面鉛直変位分布の計測値とFEM解析値を示す。各タイプを比較すると、やはりタイプAが一番小さく、E1, Eoの順番で、たわみが見られる。また、図中のFEM解析値は実験値とほぼ一致している。図－8に、タイプEo, タイプE1の継手部の開口幅履歴曲線を示す。荷重の初期段階ではタイプEo, E1ともに弾性挙動をしており、ほぼ同値を示すが、その後、タイプEoは開口幅が大きくなる。しかし、設計荷重の1.5倍まで、0.08mmとなり、開口幅とたわみの相関関係によれば、十分に安全側に評価できると思われる¹⁾。

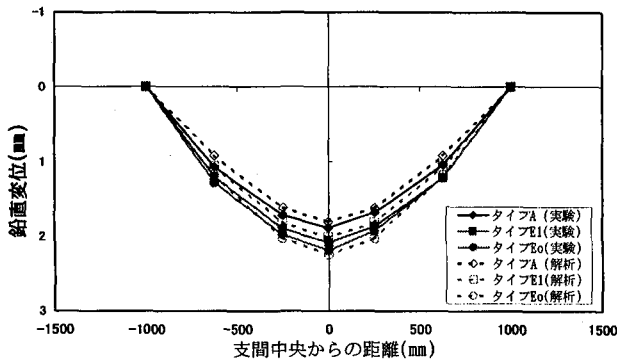


図-6 橋軸直角方向の鉛直変位分布(荷重294kN)

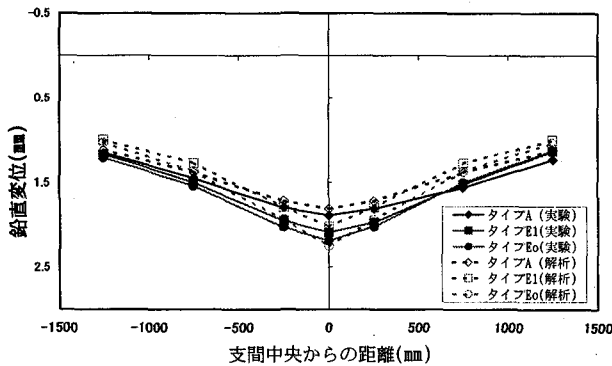


図-7 橋軸方向の鉛直変位分布(荷重294kN)

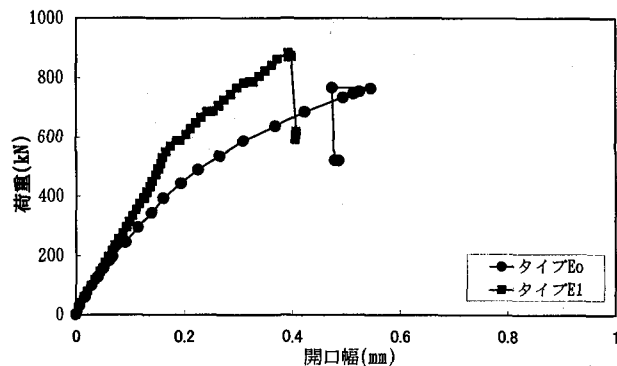


図-8 継手部の開口幅履歴曲線曲線

3.5 簡易式による回転剛性バネの算定

継手部の剛性を評価するため回転バネモデルを用いて検討した。図-9に継手部の簡単なモデルを示しており、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、

$$k_{\theta} = \frac{M_j}{\theta} \quad (2)$$

$$\theta = 2 \sin^{-1} \left(\frac{\delta}{2z} \right)$$

ここに、

θ : 継手面の回転角

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

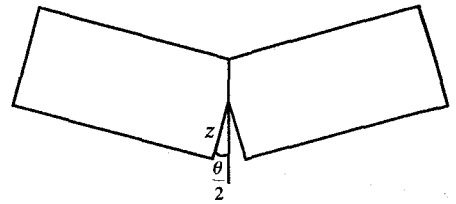


図-9 接合部の概念図

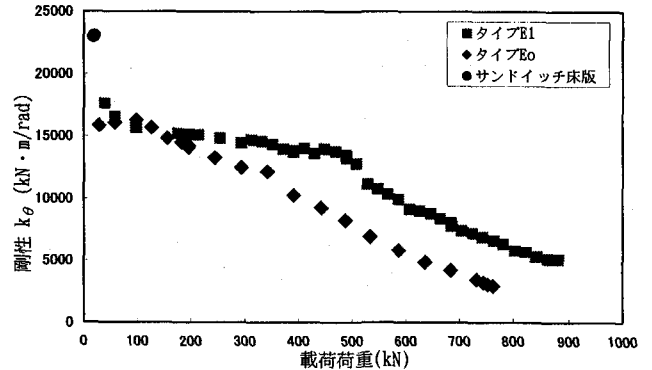


図-10 載荷荷重と剛性 k_{θ} の関係曲線

上式を用いて各タイプの回転バネ定数を図-10に示す。また、比較のためにタイプE0の継手構造を用いたサンドイッチ型複合床版のパネ定数も示した²⁾。この結果から、サンドイッチ床版に比べて、オープンサンドイッチ型の本合成床版の初期剛性は30%程度小さいこと、また、基本型のタイプE0では荷重の増加とともに、継手剛性が直線的に減小していくのに対し、鉄筋補強型のタイプE1では、荷重500kNまでは顕著な低下がなく初期剛性の90%程度を保持することがわかる。

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

一般的に継手部の剛性が母材の剛性と同等であるのが望ましいことは言うまでもない。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、継手剛度が低下しても、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、橋軸方向継手部の剛度を変化させ、それぞれに対応する橋軸直角方向および橋軸方向の設計曲げモーメント⁵⁾について検討する。

曲げモーメントを求めるために、3次元FEM解析を行った。解析モデルは、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($P=10tf$ 、載荷面積 $20cm \times 50cm$))、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。各モデルの継手部の曲げ剛性は、直交異方性版として曲げ剛性比(異方性度) $\alpha(I_x / I_y)$ が0.5~0.9と範囲に幅を持たせて検討した。また、E0、E1の異方性度 α (E0:0.55, E1:0.71)は先に行った梁試験での結果¹⁾より求めた値である。

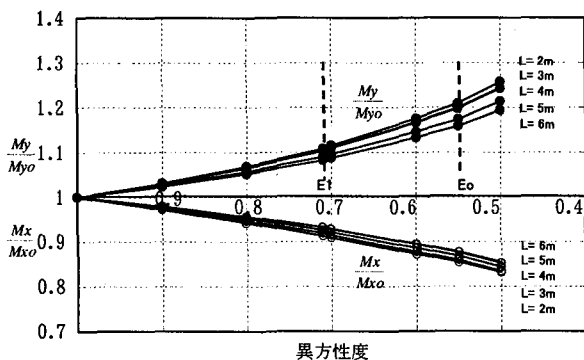


図-11 継手部の異方性度と曲げモーメント

4.2 解析結果

継手部の異方性度を変化させ、各モデルの解析の結果、得られた継手部の異方性度と曲げモーメントの関係を図-11に示す。ここに、 M_x, M_y は橋軸方向および橋軸直角方向を、 M_{x0}, M_{y0} は等方性版の場合の曲げモーメントを示す。同図より、継手部の曲げ剛性比が小さくなるほど橋軸直角方向の曲げモーメントの分担率は大きくなり、逆に橋軸方向の分担率は小さくなるのが分かる。

(1) 橋軸直角方向曲げモーメント M_y

図-12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。本解析で得られた橋軸直角方向曲げモーメント M_y は、鋼構造物設計指針の設計曲げモーメント $M_{y0} = (0.114L + 0.144)P$ (ここに、 P : T荷重1輪分の設計荷重、 L : 床版の支間 (0~8m)) に比べ、継手剛度の減少により3~23%増加する。本研究で取り上げた継手タイプE0、タイプE1を用いた場合は、それぞれ19%、10%増加する。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⁶⁾。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。

(2) 橋軸方向曲げモーメント M_x

図-13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。本解析で得られた橋軸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 $M_{x0} = (0.095L + 0.098)P$ (ここに、 P : T荷重1輪分の設計荷重、 L : 床版の支間 (0~8m)) に比べ、2~20%減少し、継手剛度の違いによる変化と曲げモーメント値は小さく、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。本研究で取り上げた継手タイプE0、タイプE1を用いた場合は、それぞれ14%、8%減少する。

5. まとめ

- (1) いずれの床版供試体においても、破壊形式は押抜きせん断破壊であった。継手部のないタイプAの押し抜きせん断耐力に比べて鉄筋補強タイプ継手E1が0.84、基本タイプの継手E0が0.73となった。
- (2) タイプE0、E1の押抜きせん断耐力の計算式は、橋軸直角方向には全断面、橋軸方向には接合部断面(ボ

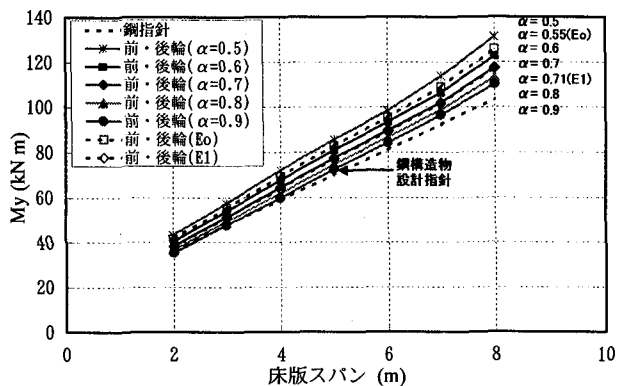


図-12 橋軸直角方向設計曲げモーメント(前後・ M_y)

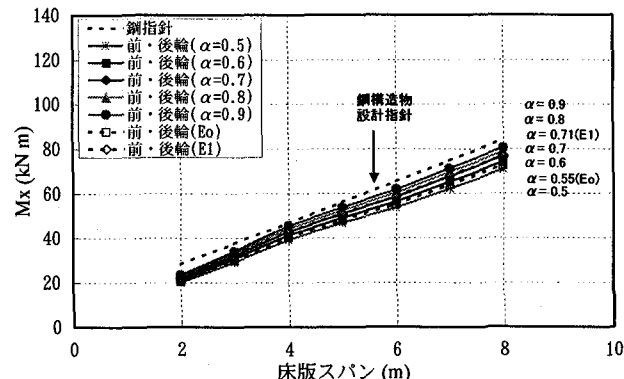


図-13 橋軸方向設計曲げモーメント(前後・ M_x)

ルト・補強鉄筋高さまで)として松井式を準用した算定式で、20%過大で評価することが可能である。

- (3) 継手部の剛性を調べるため回転バネ定数を用いた。それにより特にタイプE1は顕著な継手部の剛性低下は見られない。
- (4) 継手構造の剛性低下を考慮した活荷重による、設計曲げモーメントを求めたが、本構造の継手部を有する合成床版のタイプE0、タイプE1の場合、橋軸直角方向に関しては19%、10%増加する。逆に橋軸方向に関しては14%、8%減少することになり、設計に際して配慮しておく必要がある。

参考文献

- 1) 日野伸一、徐聖卓、太田俊昭：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、構造工学論文集、2001.3
- 2) 阿部幸夫、柳本泰伴、井澤衛：サンドイッチ型複合床版の継手に関する研究、第一回鋼橋床版シンポジウム講演論文集、pp.241-246、1998.11
- 3) 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
- 4) 前田幸雄、松井繁之：鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐力の評価式、土木学会論文集、1984.8
- 5) 土木学会：道路橋床版の新技術と性能照査型設計、2000.10
- 6) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART B、1997。

(2001年9月14日受付)