

開閉断面のアルミニウム床版の開発

Development of aluminum deck of open-hollow sections

大倉一郎*・岡田理**・萩澤亘保***・大澤章吾****

Ichiro OKURA, Osamu OKADA, Nobuyasu HAGISAWA and Shougo OSAWA

*工博 大阪大学助教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

**工修 新日本製鉄(株) 相模原技術センター(〒229-1131 相模原市西橋本5-9-1)

***工修 日本軽金属(株) グループ技術センター 企画室 (〒421-3291 静岡県庵原郡蒲原町蒲原 1-34-1)

****大阪大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

An aluminum deck fabricated by the friction stir welding was introduced at the 8th INALCO, 2001. However, since the deck consisted of hollow sections, it was impossible to examine visually the back surface of the FSW-joints. To solve this problem, an aluminum deck of open-hollow sections was newly designed, where conducting FSW on the open sections made the visual inspection on the back surface of the FSW-joints possible. In this paper, the design procedure of the new deck and the method to connect the deck to steel girders are presented. Then the structural behavior of the aluminum deck laid on the steel girders is investigated by statically loading tests. Fairly large local stresses are produced on the vertical stiffeners and the webs of the steel girders at the connections with the aluminum deck. It is recommended that the overhang of the aluminum deck should be supported by steel brackets.

Key Words : aluminum alloy, deck, friction stir welding, connection

キーワード: アルミニウム合金, 床版, 摩擦攪拌接合, 連結

1. はじめに

わが国においては、1994年の道路構造令における設計自動車荷重の196kNから245kNへの変更があったために、既存のコンクリート床版や橋桁の補強が急がれている。この対策として、コンクリート床版をアルミニウム床版に置き換えることによって、床版自身の重量を低減することを考え、2001年に開催された第8回 INALCO(アルミニウム構造に関する国際会議)において、図-1に示すようなアルミニウム床版を提案した¹⁾。

この床版は、隣り合う押出型材の上下フランジをそれぞれ摩擦攪拌接合で連結することによって製作された。ここで摩擦攪拌接合は、英国の溶接研究所によって1991年に考案された接合法である。図-2に示すように、先端にピンを持つツールを回転させながら、ショルダーが被接合材の表面に接するまでピンを接合面に挿入する。接合面は、摩擦熱により軟化し、ツールの回転に引きずられて攪拌される。ツールを接合線に沿って移動させることによって接合面は一体化する。

図-1の床版は、閉断面で構成されていたので、摩擦攪拌接合部の裏面を目視検査することができなかった。

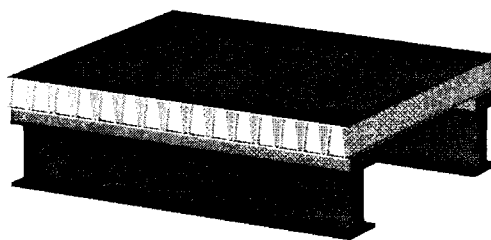


図-1 閉断面のアルミニウム床版

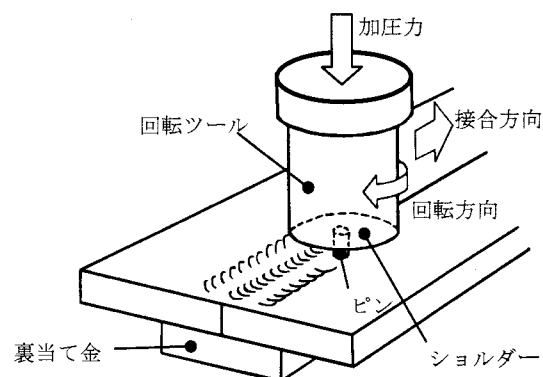


図-2 摩擦攪拌接合の概念

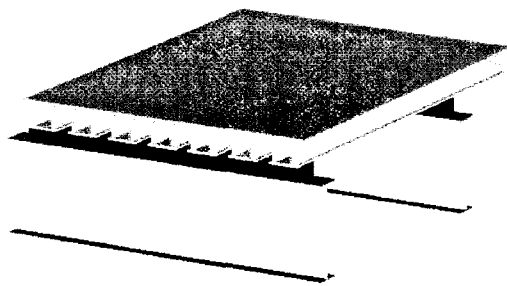


図-3 開閉断面のアルミニウム床版

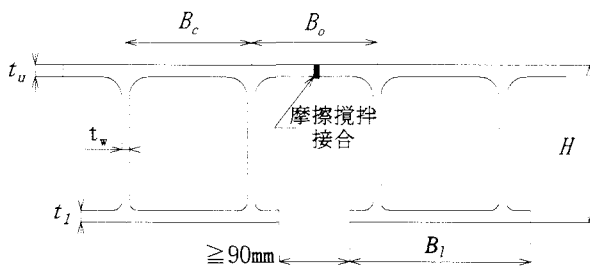


図-4 押出材材の上フランジの張出し端の摩擦撹拌接合

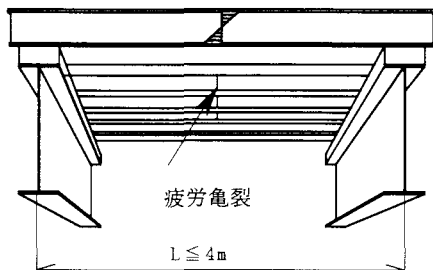


図-6 橋軸方向に発生する下フランジの疲労亀裂

2004 年 1 月に制定された「アルミニウム合金の摩擦撹拌接合部の品質検査指針(案)」²⁾では、摩擦撹拌接合部を目視検査することが規定されている。

この問題を解決するために、開閉断面の道路橋用アルミニウム床版を新たに考案した。この床版においては、開閉面で摩擦撹拌接合が行われるので、摩擦撹拌接合部の裏面を目視検査することが可能である。

本論文では、この新しいアルミニウム床版の設計法ならびにアルミニウム床版と鋼桁との連結法について述べる。そして鋼桁の上に置かれたアルミニウム床版の構造特性を静的載荷試験によって明らかにする。

2. 開閉断面のアルミニウム床版の設計

鋼主桁の上に置かれた、新たに設計されたアルミニウム床版を図-3に示す。押出材材の長手方向が鋼主桁間に渡されている。図-4に示すように、押出材材の上フランジの張出した端が突合わされ、摩擦撹拌接合される。したがって摩擦撹拌接合部の表裏を目視検査することができる。

コンクリート床版を有する通常の道路橋の主桁間が 4m 以下であるので、アルミニウム床版は、4m 以下の鋼

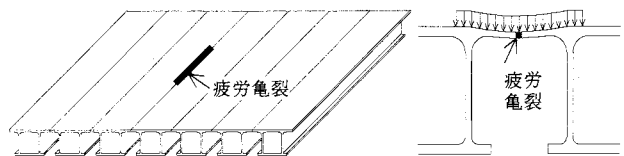


図-5 上板の摩擦撹拌接合線に沿って伝播する疲労亀裂

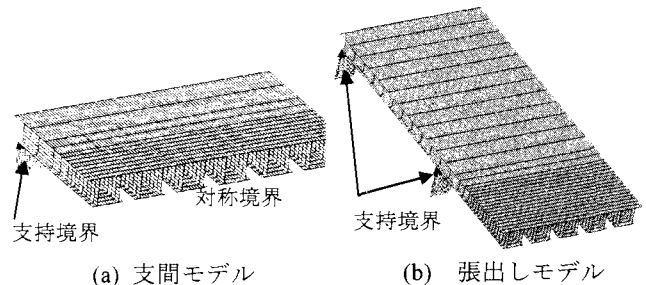


図-7 アルミニウム床版の要素分割

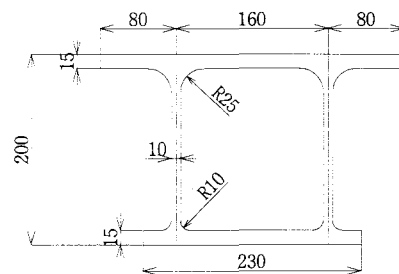


図-8 押出材材の断面形状

主桁間隔に適用できるように設計した。最初、押出材材の上フランジを設計し、続いて、下フランジとウェブを設計した。押出材材の材質と調質は A6061S-T6 である。押出材材の製品品質³⁾および摩擦撹拌接合装置の能力のために、押出材材の板厚は 15mm を超えないことを条件とした。

上フランジの設計では、図-4に示す板厚 t_u と間隔 B_c 、 B_o を、次の条件を満たすように決定した。

- (1) 道路橋示方書⁴⁾に規定されるトラックの輪荷重 98.1kN と衝撃荷重 39.2kN の合計荷重である 137.3kN によって上板に生じる応力の最大値が許容応力を超えない。合計荷重 137.3kN の載荷形状は $500 \times 200mm$ の長方形である。
- (2) 輪荷重の移動によって、上板に生じる応力範囲が疲労強度を超えない。
- (3) アスファルト舗装に悪影響を及ぼさないようにするために、輪荷重によって上板に生じる面外たわみが $B/300$ 以下となるようにする⁴⁾。ここに、 B はウェブ間隔 B_c または B_o である。

(2)で採り上げている疲労亀裂は、図-5に示すように、アルミニウム床版の上板の、摩擦撹拌接合の接合線に沿って伝播するものである⁵⁾。この亀裂は、輪荷重直下の床版の上板の局所的な面外変形によって生じる、橋軸方

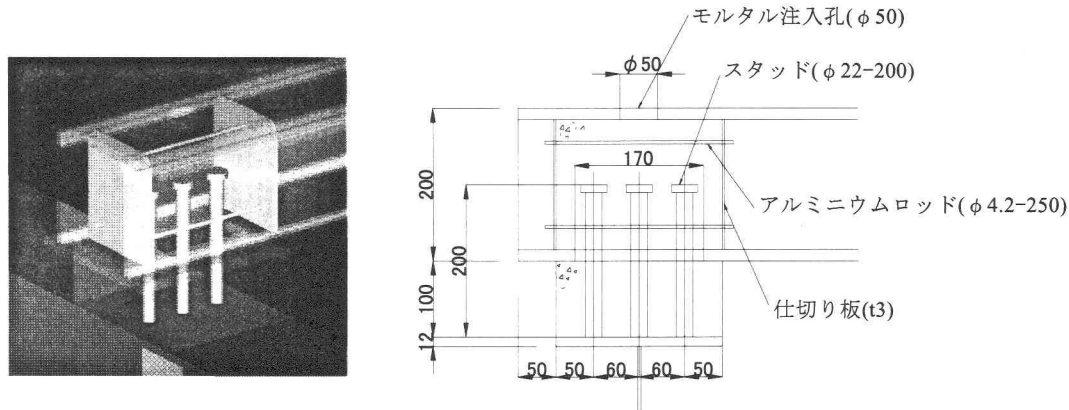


図-9 アルミニウム床版と鋼桁との連結構造

向の板曲げ応力によって発生する。

下フランジとウェブの設計では、図-4 に示す下フランジの板厚 t_f と幅 B_f およびウェブの板厚 t_w と高さ H を、次の条件を満たすように決定した。

- (1) 高さ H は押出ダイスの寸法制限を受ける。
- (2) 摩擦撚拌接合を裏から行うために、隣り合う下フランジの間隔を 90mm 以上とする。
- (3) 道路橋示方書⁴⁾に規定されるトラック荷重によって下フランジに生じる応力の最大値が許容応力を超えない。橋軸直角方向に可能な限りトラックを載荷する。
- (4) (3)で得られた最大応力が疲労強度を超えないようにする。
- (5) アルミニウム床版の過度な鉛直たわみを防ぐために、下フランジの鉛直たわみは $L/300$ 以下にする。ここに、 L は図-6 に示すように鋼桁の間隔であり、その間隔は 4m 以下である。

(4)で採り挙げている疲労亀裂は、図-6 に示すように、下フランジに橋軸方向に発生するものである⁵⁾。この亀裂は、鋼桁間の曲げモーメントによって生じる、橋軸直角方向の膜応力によって発生する。

(5)で述べた下フランジの鉛直たわみに対する制限 $L/300$ の妥当性は今後の検討課題である。

図-7(a), (b) に示すアルミニウム床版の有限要素分割に対して FEM 解析を行い、図-8 に示す押出型材の断面形状を得た。有限要素モデルの境界条件として、鋼主桁との連結部を鉛直方向に支持した。さらに図-7(a)の支間モデルに対しては、他方の側に対称の境界条件を与えた。

3. アルミニウム床版と鋼桁との連結

アルミニウム床版と鋼桁との連結構造を図-9 に示す⁶⁾。⁷⁾ 直径が 22mm で高さが 200mm のスタッドを、橋軸直角方向に、一列に鋼桁の上フランジに 3 本溶植した。スタッドの周りに型枠を置き、鋼桁の上フランジとアルミニウム床版の下フランジとの間にモルタル台座を設けた。

アルミニウム床版の下フランジに開けられた長方形

の穴にスタッドを挿入し、型枠の上にアルミニウム床版を置いた。アルミニウム床版の上板に設けられた開孔から無収縮モルタルを充填した。3 本のアルミニウム棒で連結された 2 枚のアルミニウム仕切り板を押出型材の中空部に設置し、モルタルが押出型材の中空部を流れ出ないようにした。

コンクリート床版を撤去する際、鋼桁は上に反る。台座モルタルは、この反りを吸収する役目を果たす。さらに台座モルタルは、鋼桁とアルミニウム型材とを電氣的に絶縁し、アルミニウムと鋼の異種金属接触腐食を防ぐ役目も果たす。

4. アルミニウム床版と鋼桁で構成された試験体

開閉断面のアルミニウム床版と鋼桁で構成された試験体を図-10 に示す。摩擦撚拌接合できる押出型材の本数は、摩擦撚拌接合装置の能力のために 3 本以下である。

最初、押出型材の上フランジを突合わせ、板厚の半分以上を摩擦撚拌接合し、次に押出型材を裏返し、板厚の半分以上を摩擦撚拌接合した。摩擦撚拌接合する際に上下面に発生するバリをグラインダーで削り取った。図-10 に示すように、摩擦撚拌接合した 3 本組のパネルと、2 本組の 2 枚のパネルを MIG 溶接で連結した。2 本の MIG 接合線のうち、1 本の MIG 溶接部の余盛りをグラインダーで削り取った。

3 章で述べた方法で、アルミニウム床版の開断面部と鋼桁の上フランジを連結した。アルミニウム床版は、間隔が 2m の鋼桁で支持され、右側の鋼桁から 1.39m 張出している。

鋼桁の材質は SS400 である。道路橋示方書⁴⁾に従って、ウェブに水平補剛材を設けない場合の SS400 の上限値 152 をウェブの幅厚比に採用した。鋼桁の下フランジに高力ボルトで溝形鋼を取り付け、PC 鋼棒を用いて溝形鋼を試験場の床に固定した。

試験体を構成するアルミニウム床版、鋼桁および無収縮モルタルの機械的特性を、それぞれ表-1, 2, 3 に示す。

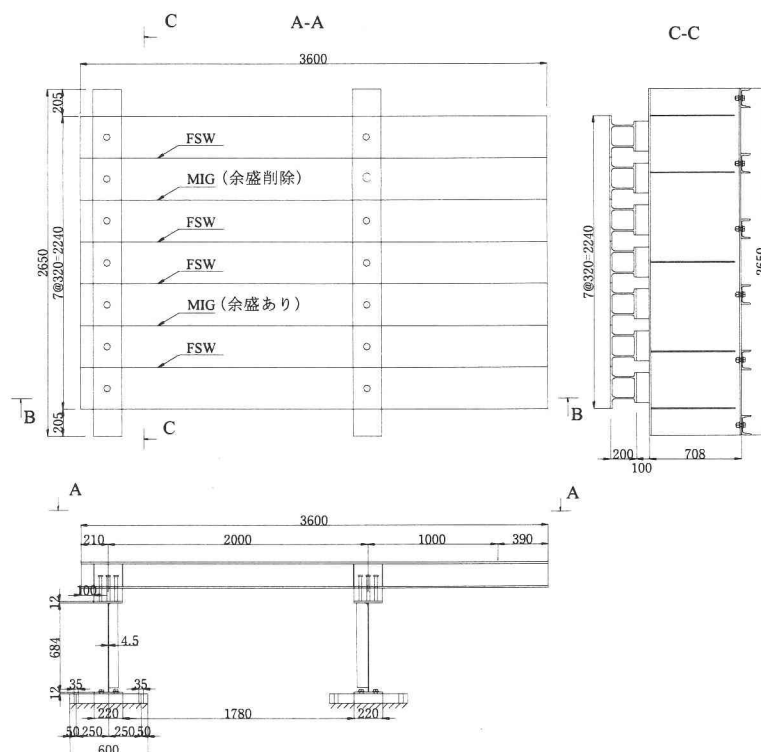


図-10 試験体

表-1 アルミニウム床版の機械的特性

A6061S-T6		測定板厚 (mm)	引張強さ (MPa)	0.2%耐力 (MPa)	伸 び (%)	ヤング係数 (GPa)	ポアソン比
母 材		14.7	309	292	12.0	71.5	0.31
FSW	長手方向	15.0	232	156	22.7	69.5	0.32
	幅 方 向	15.1	229	138	—	72.8	0.34

表-2 鋼主桁の機械的特性

SS400	板 厚 (mm)	引張強さ (MPa)	上降伏点 (MPa)	下降伏点 (MPa)	伸 び (%)	ヤング係数 (GPa)	ポアソン比
フランジ	12.1	438	293	276	27.4	215	0.277
ウェブ	4.4	443	307	307	30.2	213	0.272

表-3 無収縮モルタルの機械的特性

試験材齢 (日)	圧縮強度 (MPa)	ヤング係数 (GPa)	ポアソン比
3	51.0	—	—
28	70.3	—	—
50	75.5	27.7	0.215

5. 開閉断面のアルミニウム床版の構造特性

5.1 静的載荷試験

鋼桁の上に置かれた、開閉断面のアルミニウム床版の静的載荷試験の状況を図-11 に示す。500×200×15mm の硬質ゴムを介して床版に荷重を与えた。2 章で述べたように、500×200mm は、道路示方書⁴⁾で規定されるトラ

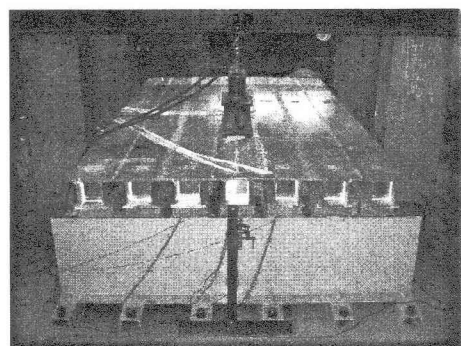
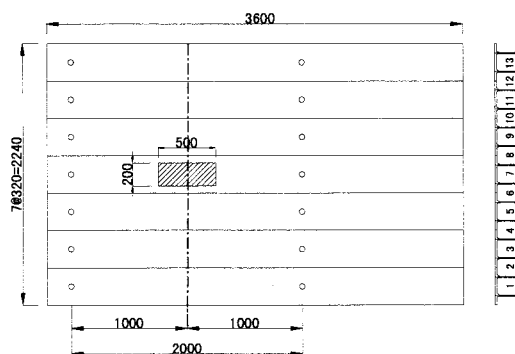


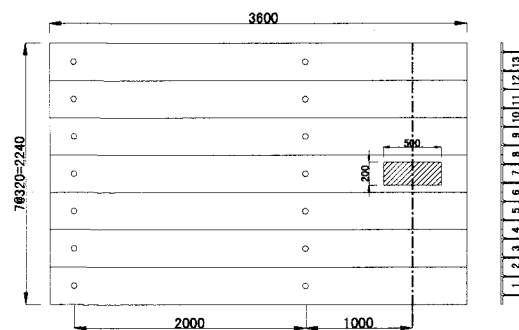
図-11 静的載荷試験の状況

ックの輪荷重の載荷形状である。

載荷ケースを図-12 に示す。支間載荷では鋼桁間の中央に荷重を載荷し、張出し載荷では右側の鋼桁から 1m



(a) 支間載荷



(b) 張出し載荷

図-12 載荷ケース

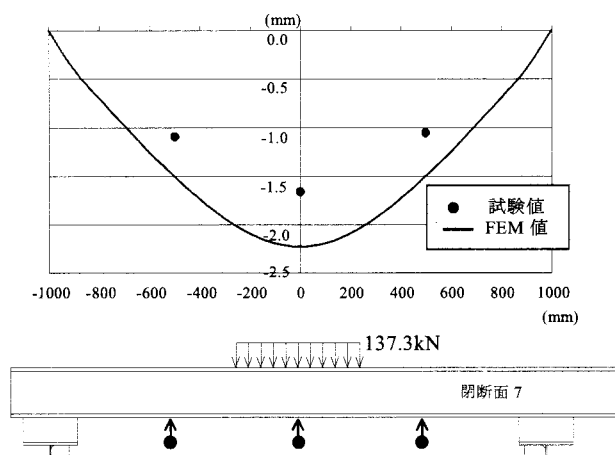


図-13 下フランジの鉛直たわみ [閉断面 7]

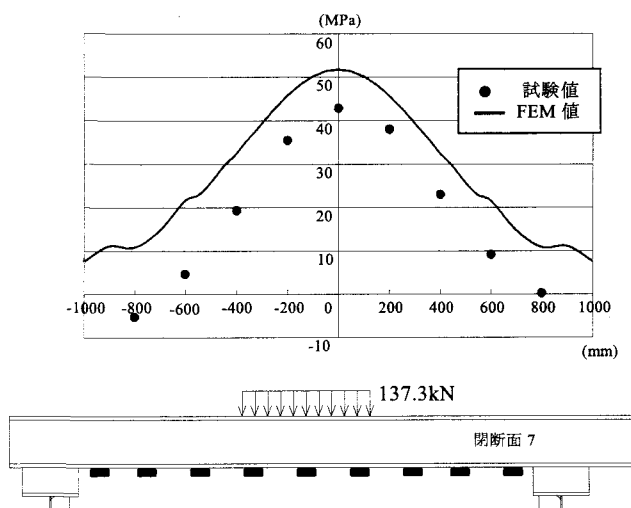


図-14 下フランジの橋軸直角方向応力 [閉断面 7]

離れた位置に荷重を載荷した。各載荷ケースにおいて、橋軸方向に 20mm ずつ硬質ゴム板を移動させて、その上に 137.3kN の荷重を静的に載荷した。

5.2 支間載荷

図-12(a) の閉断面 7 の上に 137.3kN を載荷したときの、アルミニウム床版の下フランジ下面の鉛直変位を図-13 に示す。図-13 に描かれた曲線は、図-7(a) の要素分割に対する FEM 解析の結果である。試験値は FEM 値より小さい。これは、FEM 解析においては鋼桁が考慮されていないので、アルミニウム床版が、鋼桁の回転拘束を受けていないからである。

アルミニウム床版の下フランジ下面の、橋軸直角方向応力を図-14 に示す。試験値は FEM 値より小さい。この理由は、アルミニウム床版の下フランジ下面の鉛直変位に関する、前述の理由と同じである。

閉断面 7 の上に 137.3kN を載荷したときの、同断面の上板の上面の、橋軸直角方向と橋軸方向の応力を図-15 に示す。閉断面 8 の上に 137.3kN を載荷したときの、同断面の上板の上下面の、橋軸直角方向応力を図-16(a) に、橋軸方向応力を図-16(b) に示す。

図-15 と図-16(a) に示すように、橋軸直角方向応力は、

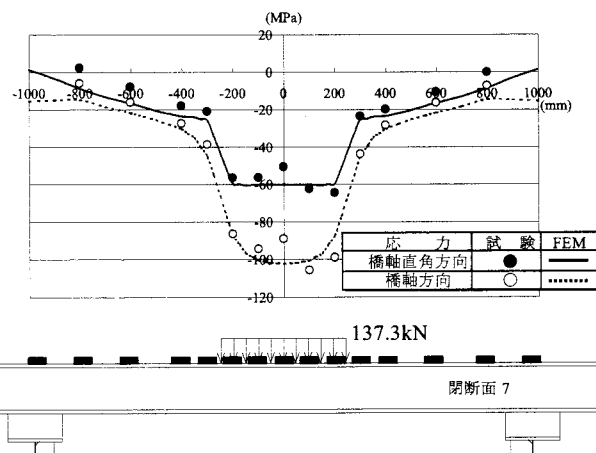
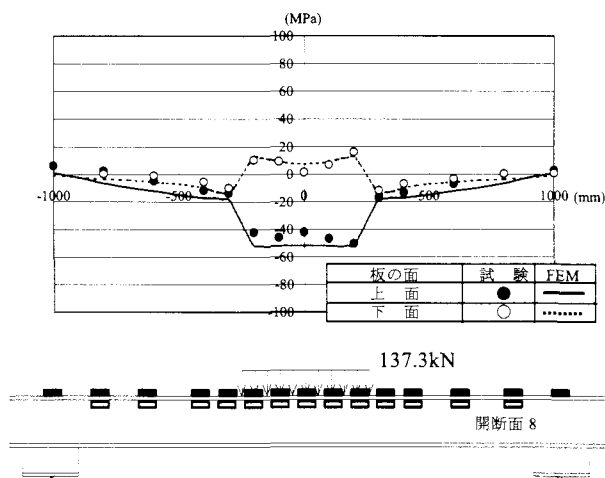
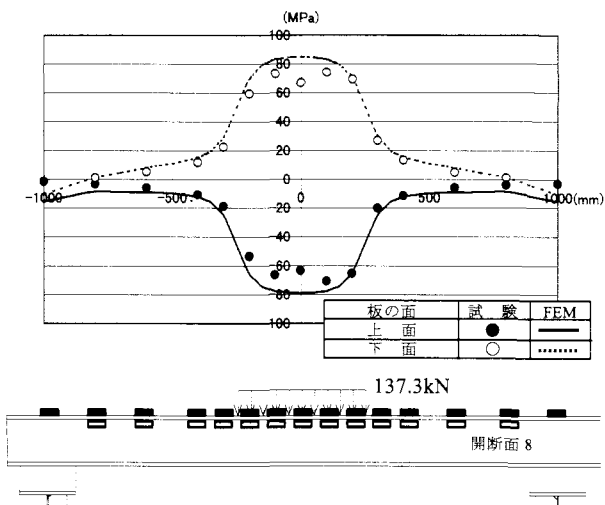


図-15 上板の橋軸直角方向と橋軸方向の応力 [閉断面 7]

荷重直下で板曲げ応力で、この領域の外で膜応力である。図-15 と図-16(b) に示すように、橋軸方向応力は、全領域で板曲げ応力であり、荷重直下で非常に高く、この領域の外で急速に低下する。この板曲げ応力は、荷重直下の上板の局所的な面外変形によって生じる。図-15 および図-16(a), (b) から分かるように、試験値は FEM 値とよく一致している。



(a) 橋軸直角方向応力



(b) 橋軸方向応力

図-16 上板の橋軸直角方向と橋軸方向の応力 [閉断面 8]

閉断面 7 の下フランジ下面の橋軸直角方向応力の影響線を図-17 に示す。閉断面 7 の上板の上面の橋軸直角方向と橋軸方向の応力の影響線を図-18 に示す。閉断面 8 の上板の上面の橋軸直角方向と橋軸方向の応力の影響線を図-19 に示す。これらの影響線は、荷重 137.3kN が橋軸方向を移動する場合に対応する。試験値は、FEM 値より若干小さい。

図-17 に示すように、下フランジの橋軸直角方向応力は、着目点から左右、各 300mm 以内で増加する。同様に、図-18, 19 に示すように、上板の上面の橋軸直角方向と橋軸方向の応力は、着目点から左右、各 200mm 以内で圧縮応力として増加する。これは、アルミニウム床版が、荷重点近傍の限られた領域で荷重を支える構造であることを意味している。

図-10 の右側の鋼桁の上フランジとアルミニウム床版との連結部の応力の測定結果を図-20 に示す。図-20(a) は、スタッド直下に垂直補剛材がある場合であり、図-20(b) は、スタッド直下に垂直補剛材がない場合である。スタッドの中心軸に関して対称な位置に貼り付けられた

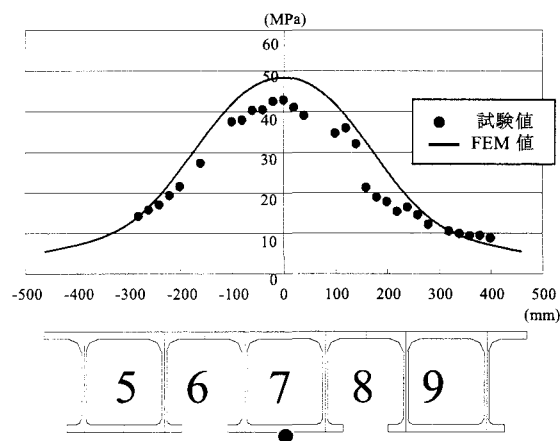
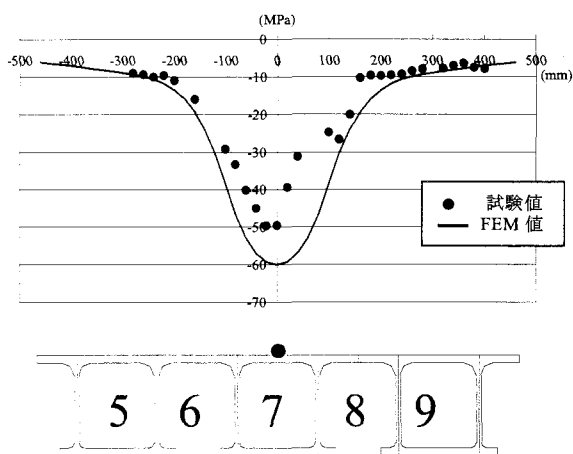
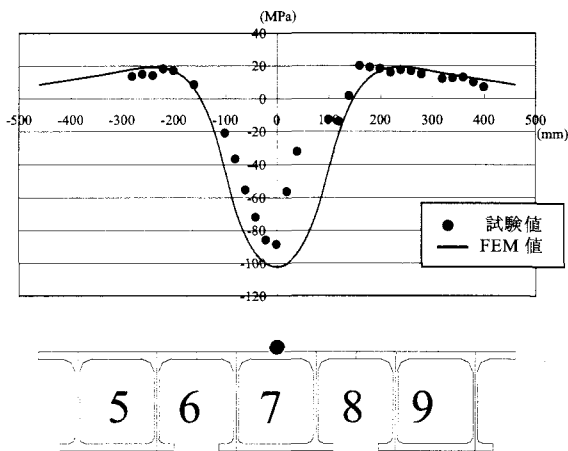


図-17 下フランジ下面の橋軸直角方向応力の影響線 [閉断面 7]



(a) 橋軸直角方向応力



(b) 橋軸方向応力

図-18 上板の上面の橋軸直角方向と橋軸方向の応力の影響線 [閉断面 7]

2 枚のひずみゲージが与える平均ひずみにヤング係数 200GPa を乗じて、スタッドに生じる軸応力を求めた。

図-20(a)に示すように、スタッドの軸応力は小さいが、垂直補剛材の上縁には大きな圧縮応力が生じている。同様に、図-20(b)に示すように、スタッドの軸応力は小さいが、鋼桁のウェブの上縁には大きい板曲げ応力が生じている。

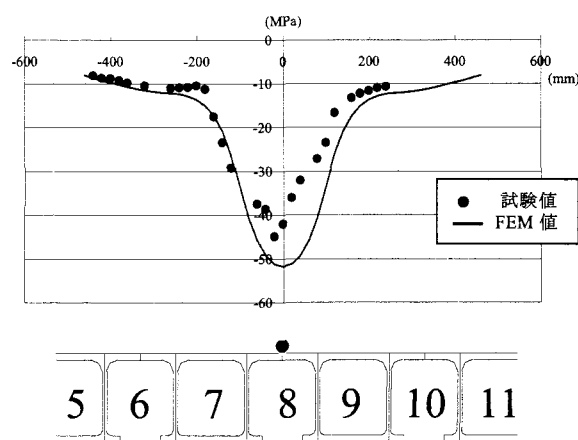
5.3 張出し載荷

閉断面 7 の上に 137.3kN を載荷したときの、アルミニウム床版の下フランジ下面の鉛直変位を図-21 に示す。試験値は、図-7(b)の要素分割に対する FEM 値とよく一致している。張出しの荷重中心点直下のたわみは 7mm と大きい。

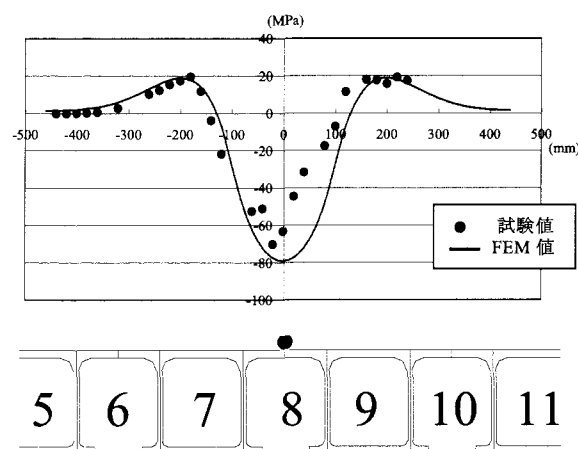
アルミニウム床版の下フランジ下面の、橋軸直角方向応力を図-22 に示す。張出しでは、試験値は FEM 値とよく一致しているが、支間では、試験値が FEM 値より小さい。

閉断面 7 の上に 137.3kN を載荷したときの、同断面の上板の上面の、橋軸直角方向と橋軸方向の応力を図-23 に示す。閉断面 8 の上に 137.3kN を載荷したときの、同断面の上板の上下面の、橋軸直角方向応力を図-24(a)に、橋軸方向応力を図-24(b)に示す。

図-15 と図-23 および図-16(b) と図-24(b)の比較から、荷重直下の橋軸方向の応力は、支間より張出しの方が大きいことが分かる。これは、張出し端にダイヤフラムが設けられてないことによる。

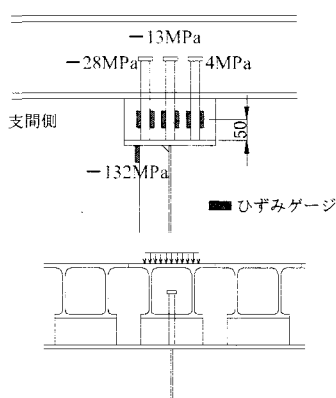


(a) 橋軸直角方向応力

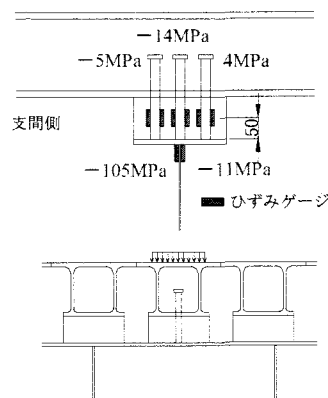


(b) 橋軸方向応力

図-19 上板の上面の橋軸直角方向と橋軸方向の応力の影響線 [閉断面 8]



(a) 垂直補剛材がある連結部



(b) 垂直補剛材がない連結部

図-20 アルミニウム床版と鋼桁の上フランジとの連結部の応力

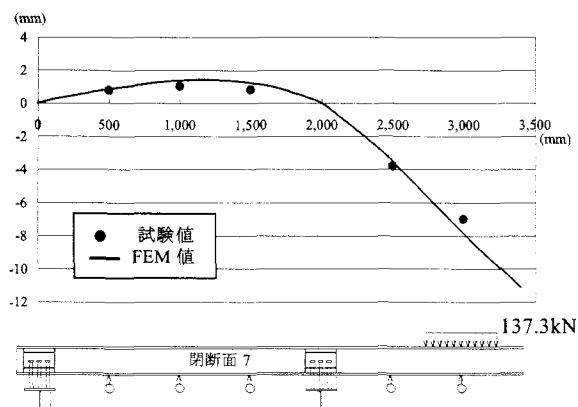


図-21 下フランジの鉛直のたわみ [閉断面 7]

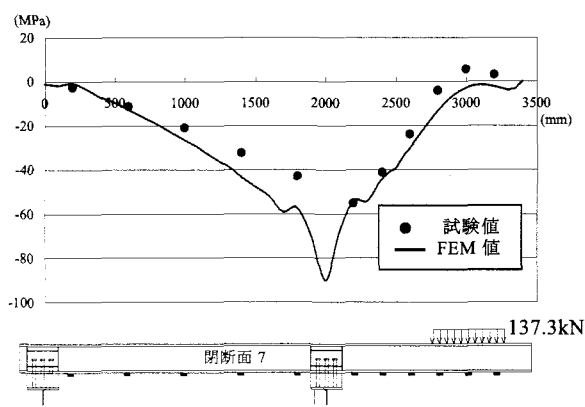


図-22 下フランジの橋軸直角方向応力 [閉断面 7]

図-10 の右側の鋼桁の上フランジとアルミニウム床版との連結部の応力の測定結果を図-25 に示す。 図-20 と図-25 の比較から分かるように、垂直補剛材の上縁の応力と鋼桁の上縁のウェブの板曲げ応力は、支間载荷より張出し载荷の方がはるかに大きい。

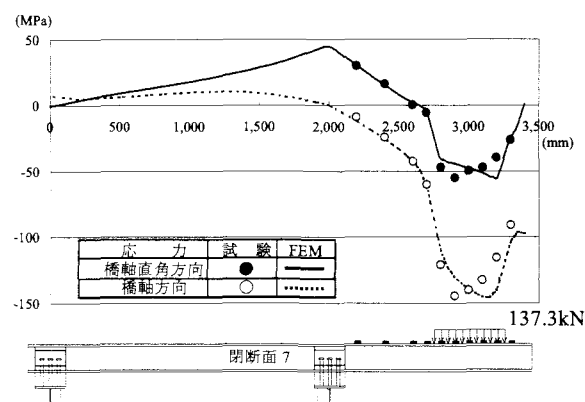
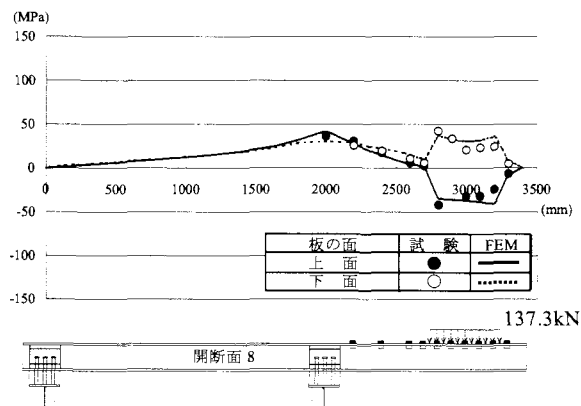
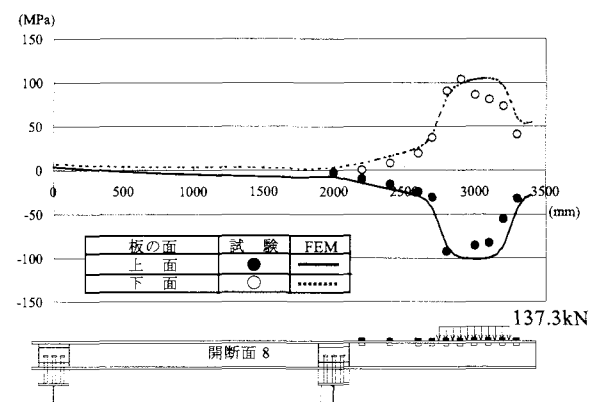


図-23 上板の橋軸直角方向と橋軸方向の応力 [閉断面 7]

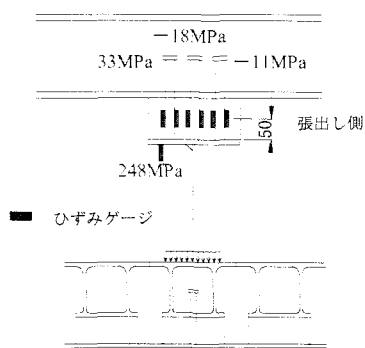


(a) 橋軸直角方向応力

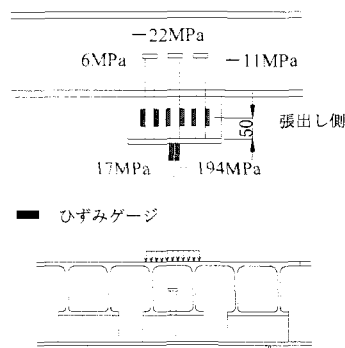


(b) 橋軸方向応力

図-24 上板の橋軸直角方向と橋軸方向の応力 [閉断面 8]



(a) 垂直補剛材がある連結部



(b) 垂直補剛材がない連結部

図-25 アルミニウム床版と鋼桁の上フランジとの連結部の応力

以上から、アルミニウム床版の張出しに荷重が載荷された場合、張出しのたわみは大きく、張出しと鋼桁に生じる局部応力も大きくなる。したがって実際のアルミニウム床版の設計において、アルミニウム床版の張出しが長くなる場合には、鋼ブラケットによって張出しを支持することを考えなければならない。

6. 結 論

本研究では、開閉断面のアルミニウム床版の設計法ならびにアルミニウム床版と鋼桁との連結法を示した。そして鋼桁の上に置かれたアルミニウム床版の構造特性を静的載荷試験により明らかにした。主な結論は次の通りである。

- (1) アルミニウム床版に発生する応力は、連結部が単純支持されたFEM解析により安全側に予測できる。
- (2) アルミニウム床版の張出しに荷重が載荷された場合、張出しのたわみは大きく、張出しと鋼桁に生じる局部応力も大きくなる。したがって実際のアルミニウム床版の設計において、アルミニウム床版の張出し端にダイヤフラムを設けたり、アルミニウム床版の張出しが長くなる場合には、鋼ブラケットによって張出しを支持することを考えなければならない。

謝辞：本研究は、科学技術振興調整費充当戦略的研究拠点「阪大フロンティア研究機構」の研究プロジェクト(プロジェクト名：アルミニウム合金構造物実現のための基

礎研究)の下で行われた。さらに本研究は、科学研究費補助金 基盤研究(B)(課題番号 15360241)を受けた。

参考文献

- 1) I. Okura, M. Naruo, L.G. Vigh, N. Hagiwara and H. Toda: Fatigue of aluminum deck fabricated by friction stir welding, 8th INALCO, Munich, Germany, pp.4.1.1-4.1.12, 2001.
- 2) 日本アルミニウム協会, 土木構造物委員会: アルミニウム合金の摩擦撹拌接合部の品質検査指針 (案), 1月, 2004.
- 3) JIS H 4100: アルミニウム及びアルミニウム合金の押出型材, 1999.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I 共通編 II 鋼橋編, 2002.
- 5) 大倉一郎, 萩澤亘保, 鳴尾亮, 戸田均: 摩擦撹拌接合で製作されたアルミニウム床版の疲労特性, 土木学会論文集, No.703/I-59, pp255-266, 2002.
- 6) I. Okura, N. Hagiwara, O. Okada and S. Yamaguchi: Static and fatigue behavior of the connections of aluminum decks to steel girders, 19th US-Japan Bridge Engineering Workshop, Tsukuba, Japan, pp.105-116, 2003.
- 7) 大倉一郎, 萩澤亘保, 中原太樹, 岡田理, 山口進吾: アルミニウム床版と鋼主桁との連結部の静的および疲労挙動, 鋼構造年次論文報告集, 第 11 巻, pp.199-206, 2003.

(2004 年 9 月 17 日受付)