

アルミニウム床版と鋼桁の合成作用

Composite effects of aluminum deck with steel girder

大倉一郎*, 石川敏之**, 高木真広***, 武野正和****
Ichiro Okura, Toshiyuki Ishikawa, Masahiro Takagi and Masakazu Takeno

*工博, 大阪大学准教授, 大学院工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)
**博(工), 名古屋大学助教, 大学院環境学研究科都市環境学専攻 (〒464-8603 名古屋市千種区不老町)
***修(工), ㈱IHI, エネルギー事業本部 (研究当時大阪大学学生) (〒135-8710 江東区豊洲 3-1-1)
****修(工), ㈱新日本製鐵, 建材事業部 (研究当時大阪大学学生) (〒100-8071 千代田区大手町 2-6-3)

Since stud shear connectors are used for the connection of an aluminum deck to a steel girder, composite effects are produced between both. In this study, statically loading tests of composite girders consisting of an aluminum deck and a steel girder clarifies their yield and maximum loads as well as their behavior of collapse. Applicability of the incomplete composite theory to the composite effects of an aluminum deck with a steel girder is verified by the elastic behavior of the test girders.

Key Words: aluminum deck, composite effect, steel girder, incomplete composite theory
キーワード: アルミニウム床版, 合成効果, 鋼桁, 不完全合成理論

1. はじめに

損傷した鉄筋コンクリート床版(以後 RC 床版と呼ぶ)を取替える場合あるいは RC 床版の補修・補強を行なう場合, 現行の道路橋示方書¹⁾を適用すると, 床版が厚くなることによって死荷重が増加するため, 鋼桁の補強が必要になる場合がある. これに対して, アルミニウム床版の導入により, 床版自身の重量を減らすことによって対処できないかとの考えが出されている²⁾. アルミニウム床版は軽量であるため, 地震による上部工の慣性力の低減, 小型重機の使用による工期の短縮および高い耐食性によるライフサイクルコストの削減などの利点がある.

著者らは, アルミニウム押出型材を摩擦攪拌接合(FSW)により連結した開閉断面のアルミニウム床版を開発してきた^{3), 4)}. アルミニウム床版は RC 床版に対して約 1/5 の重量であるため, 死荷重を大幅に低減できる. アルミニウム床版を有する鋼桁橋の概念図を図-1 に示す.

アルミニウム床版と鋼桁のずれを防止するために, 鋼桁に溶着された頭付きスタッド(以後スタッドと呼ぶ)をアルミニウム床版の開断面内へ挿入し, 部分的にモルタルを充填することにより, アルミニウム床版と鋼桁とが

結合されている⁵⁾. したがって, アルミニウム床版と鋼桁は合成作用を示すと考えられる.

本研究では, アルミニウム床版を有する鋼桁の静的載荷試験を行い, その降伏荷重, 最大荷重および崩壊挙動を明らかにする. さらに, 試験体の弾性域での挙動から, アルミニウム床版と鋼桁の合成作用に対して弾性合成理論が適用できることを示す.

2. 試験体

2.1 試験体の設計

図-2 に示す 4 体の試験体を製作した. 損傷した RC 床版をアルミニウム床版へ取り替える場合, RC 床版を

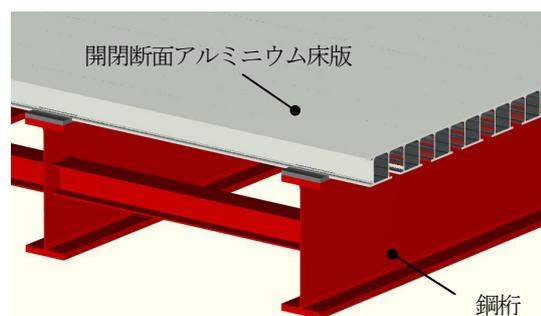
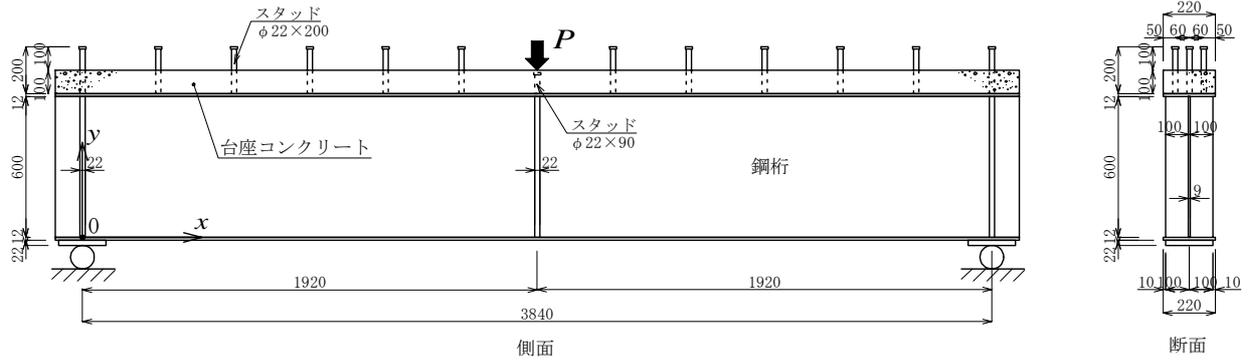
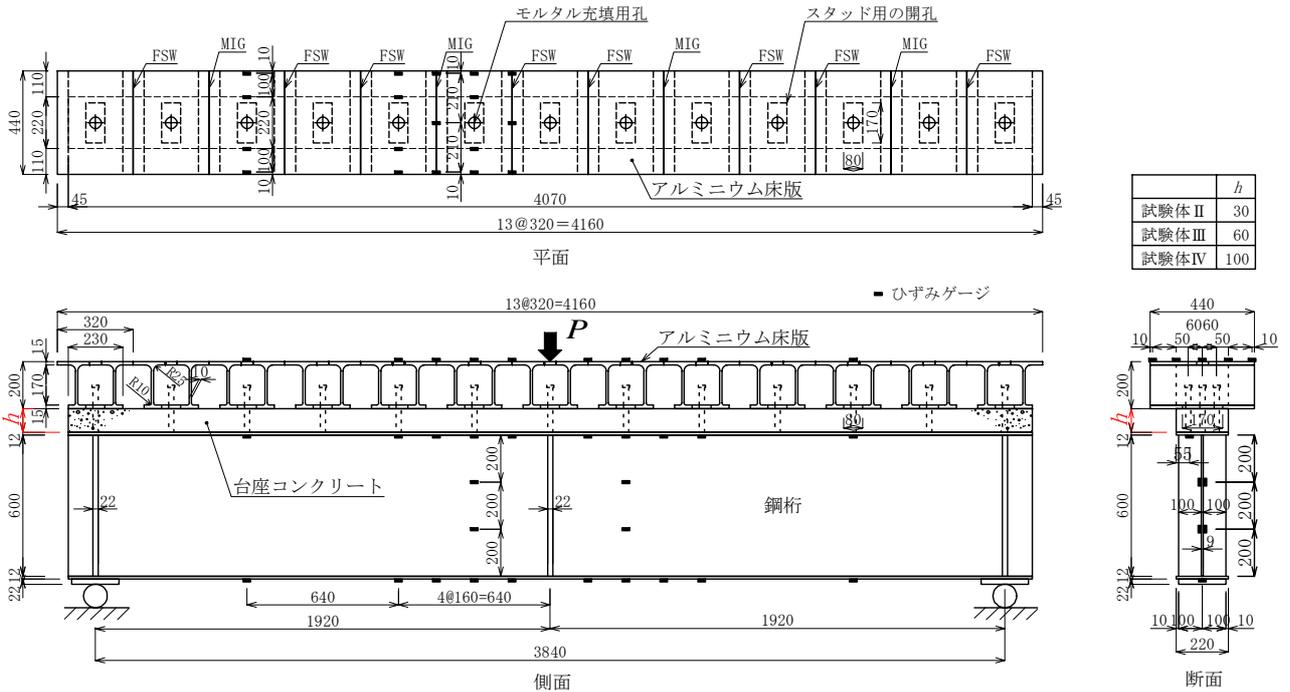


図-1 アルミニウム床版を有する鋼桁橋



(a) 試験体 I



(b) 試験体 II, III, IV

図-2 試験体

撤去すると、RC 床版と舗装の重量に対して設けられていた鋼桁のキャンバーが開放されるため、鋼桁は上向きに反る。この反りは、鋼桁上フランジの上に台座コンクリートを打設することによって調整される。さらに、台座コンクリートは、アルミニウム床版と鋼桁の接触を避けるので、アルミニウムと鋼の異種金属接触腐食を防ぐ役目も持つ。

台座コンクリートは、鋼桁上フランジの上に連続して打設されるため、台座コンクリートと鋼桁は合成作用を示すと考えられる。そこで、図-2 (a)に示す、鋼桁に台座コンクリートが設けられた試験体 I を製作した。試験体 I の台座コンクリートの厚さは 100mm である。

鋼桁に設けられているキャンバーの高さは、橋軸方向に沿って異なる。したがって台座コンクリート厚が 30mm, 60mm, 100mm のアルミニウム床版を有する試験体 II, III, IV をそれぞれ製作した。試験体 II~IV を図

2 (b)に示す。図中の h は台座コンクリート厚である。

2.2 試験体の製作

図-2 (b)に示すアルミニウム床版は、A6061S-T6 材である。アルミニウム合金の押出形材は、幅 320mm, 高さ 200mm, 奥行き 440mm である。アルミニウム合金の押出形材の奥行きは、アルミニウム床版上板の全断面が有効に作用する幅を想定して、鋼桁のフランジ幅の 2 倍としている。アルミニウム床版に対して、十分な数の開断面と閉断面を確保するため、押出形材 13 本のアルミニウム床版上板が、摩擦攪拌接合 (FSW) および MIG 溶接により結合されている。

図-2 に示す鋼桁は、SS400 材である。鋼桁の上下フランジは幅 220mm×高さ 12mm であり、ウェブは高さ 600mm×高さ 9mm である。アルミニウム床版の開断面の中心間隔 320mm の間隔で、幅方向に 3 本、鋼桁の上フランジに $\phi 22$ mm×高さ 200mm のスタッドを溶接した。

表-1 機械的特性

(a) アルミニウム合金材		(b) 鋼材		(c) コンクリート		
上板厚さ (mm)	14.7	ウェブ	フランジ	材齢 (日)	150	
0.2%耐力 (MPa)	328	実測板厚 (mm)	8.71	12.0	圧縮強度 (MPa)	22.5
引張強さ (MPa)	346	降伏応力 (MPa)	291	290	ヤング係数 (GPa)	21.5
ヤング係数 (GPa)	70.6	引張強さ (MPa)	426	450	ポアソン比	0.172
ポアソン比	0.312	ヤング係数 (GPa)	210	202	(d) 無収縮モルタル	
伸び (%)	11.6	ポアソン比	0.285	0.283	材齢 (日)	60
		伸び (%)	27.2	29.4	圧縮強度 (MPa)	79.6
					ヤング係数 (GPa)	26.8
					ポアソン比	0.222

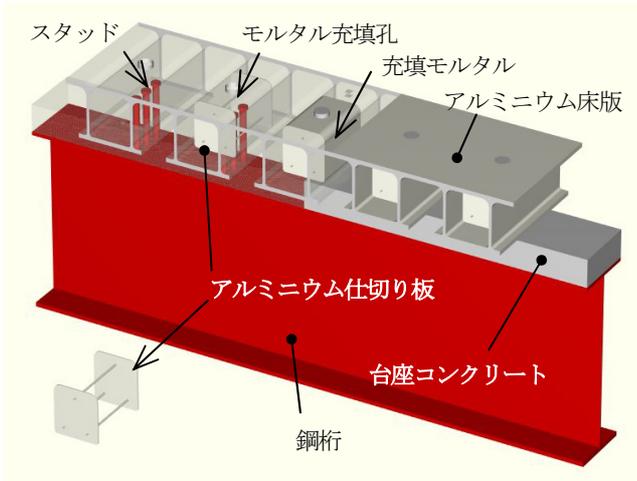


図-3 アルミニウム床版と鋼桁の連結構造

荷重位置と支点位置がアルミニウム床版の開断面部になるように、支間長を 3840mm とし、支間中央と支点位置に厚さ 22mm の垂直補剛材を設けた。さらに、支点位置の下フランジに厚さ 22mm のソールプレートを設けた。

アルミニウム床版と鋼桁の連結構造を図-3 に示す。初めに、鋼桁上フランジにスタッドを溶接し、その後型枠を設け、台座コンクリートを打設した。止水された型枠を利用し、台座コンクリートを 3 日間水中養生、4 日間湿布養生した。台座コンクリートの養生完了後、台座コンクリートから突出したスタッドを、アルミニウム床版の下フランジに設けられた 170mm×80mm の開孔に挿入した。アルミニウム床版の開断面部に 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設置し、モルタル充填空間を確保した。閉断面部に充填する無収縮モルタルは流動性が高いので、無収縮モルタルが隙間から流れ出ないように、アルミニウム床版と台座コンクリートおよびアルミニウム仕切り板との接触部に、シリコンにより止水を行なった。アルミニウム床版の上板に設けられた $\phi 50\text{mm}$ の開孔から無収縮モルタルを充填し、開孔部のモルタル表面を 1 日間湿布養生した。

試験体を構成するアルミニウム床版、鋼桁、台座コンクリートおよび無収縮モルタルの機械的特性を表-1 に

表-2 各試験体の断面二次モーメント($\times 10^8 \text{mm}^4$)

	鋼桁	試験体			
		I	II	III	IV
I_s	6.56	—	—	—	—
I_{sc}	—	9.10	—	—	—
I_{sa}	—	—	12.0	12.6	13.5
I_{sca}	—	—	12.3	13.4	14.8

示す。アルミニウム合金の機械的特性は JIS 14B 号試験片、鋼材の機械的特性は JIS 1A 号試験片による引張試験の結果である。コンクリートの機械的特性は直径 100mm×高さ 200mm の円柱試験片、無収縮モルタルの機械的特性は直径 50mm×高さ 100mm の円柱試験片に対する圧縮試験の結果である。各試験値は、それぞれ 3 体の材料試験の平均値である。

無収縮モルタルは、日本道路公団規格「無収縮モルタル品質管理試験法」に準じて、J14 ロートによるモルタル流下時間が 1 回目 6.5 秒、2 回目 6.7 秒であり、規格値の 8±2 秒の範囲にあることを確認した。スタッド溶接部は、JIS Z 3145「頭付きスタッド溶接部の曲げ試験方法」の規定を満たしていることを確認した。

2.3 試験体の特性値

(1) 断面二次モーメント

各試験体の鋼桁換算された断面二次モーメントを表-2に示す。鋼桁のみの断面二次モーメント I_s も表に示されている。アルミニウム合金材、鋼材およびコンクリートのヤング係数は表-1に示す値を用いた。試験体Iに関して、 I_{sc} は鋼桁と台座コンクリートを完全合成と仮定した場合の断面二次モーメントである。試験体II, III, IVに関して、 I_{sa} および I_{sca} は、それぞれ鋼桁とアルミニウム床版上板を完全合成と仮定した場合および鋼桁、台座コンクリートおよびアルミニウム床版を完全合成と仮定した場合の断面二次モーメントである。アルミニウム床版には、桁方向に開断面部と閉断面部が存在するため、桁方向に連続している上板のみ合成断面に考慮した。

表-3 荷重特性値
(a) 降伏荷重 P_Y (kN)

	鋼桁	試験体			
		I	II	III	IV
鋼	636.8	—	—	—	—
鋼+台座	—	729.0	—	—	—
鋼+AL床版	—	—	891.0	925.4	973.7
鋼+台座 +AL床版	—	—	891.3	926.4	975.6
試験値	697.6*	733.7	778.8	793.9	821.8
弾性合成理論	—	—	761.7	795.5	819.4

* : FEM 解析値

(b) 全塑性荷重 P_p (kN)

	鋼桁	試験体			
		I	II	III	IV
鋼	734.4	—	—	—	—
鋼+台座	—	904.0	—	—	—
鋼+AL床版	—	—	1507.3	1575.0	1665.2
鋼+台座 +AL床版	—	—	1510.7	1586.2	1693.8
P_u	764.3	974.4	1454.3	1544.5	1634.8

表-2 から、 I_s と I_{sc} を比較すると、台座コンクリートを合成に考慮する試験体 I の I_{sc} が台座コンクリートを合成に考慮しない鋼桁の I_s に比べて、4割大きな値となっている。試験体 II, III, IV の I_{sa} と I_{sca} を比較すると、最も大きな違いを示す試験体 IV で、 I_{sca} が I_{sa} に比べて、1割大きくなる程度である。台座コンクリートは、アルミニウム床版上板、鋼桁および台座コンクリートの合成断面の中立軸の近くに位置するため、相対的に試験体 I のそれが示すほど大きく断面二次モーメントに寄与しない。

一方、台座コンクリート厚が等しい試験体 I の I_{sc} と試験体 IV の I_{sca} を比較すると、 I_{sca} は I_{sc} の 1.63 倍となり、断面二次モーメントへのアルミニウム床版上板の寄与が大きいたことが分かる。

(2) 降伏荷重および全塑性荷重

アルミニウム合金材および鋼材のヤング係数の違いおよび台座コンクリートの厚さの違いにより、各試験体の中立軸の位置は異なる。しかし、アルミニウム床版上板と鋼桁を完全合成と仮定した場合、全ての試験体において、鋼桁下フランジが最も早く降伏する。鋼桁下フランジが降伏に達するときの荷重を降伏荷重 P_Y 、試験体の全断面が塑性状態に達するときの荷重を全塑性荷重 P_p で表す。

表-3 に、鋼桁の P_Y 、 P_p の値、試験体 I の鋼桁と台座コンクリートを完全合成と仮定して算出した場合の P_Y 、 P_p の値、試験体 II, III, IV の鋼桁およびアルミニウム床版上板を完全合成と仮定して算出した場合の P_Y 、 P_p の値および鋼桁、アルミニウム床版上板および台座



図-4 荷重状況

コンクリートを完全合成と仮定して算出した場合の P_Y 、 P_p の値を示す。表-3(a)の試験値および弾性合成理論による P_Y の値はそれぞれ3.2節および4.3節で与えられ、表-3(b)の P_u の値は3.2節で与えられる。この表から分かるように、台座コンクリートを断面に考慮する試験体 I の P_Y および P_p の値は、台座コンクリートを断面に考慮しない鋼桁のそれらの値に比べて、それぞれ 14% および 23% 大きい。アルミニウム床版を有する試験体では、台座コンクリートを断面に考慮する場合の P_Y および P_p の値は、台座コンクリートを断面に考慮しない場合のそれぞれの値に近い。これは、合成桁の弾性中立軸および塑性中立軸が鋼桁の上部に位置するため、台座コンクリートの重心と合成桁の弾性中立軸および塑性中立軸との間の距離が短く、弾性中立軸回りの台座コンクリートの断面二次モーメントおよび塑性中立軸回りの台座コンクリートの塑性モーメントが相対的に小さいためである。

3. 静的荷重試験

3.1 試験概要

荷重状況を図-4 に示す。図-2 に示される、桁の両支点をローラーで支持し、図-4 に示されている荷重治具を用いて支間中央に桁軸方向 200mm、桁幅方向 440mm の領域に荷重を載荷した。

桁の両支点と支間中央の下フランジの鉛直変位を変位計で計測し、両支点位置における鋼桁上フランジ上面と台座コンクリート下面とのずれをクリップゲージで計測した。図-2(b)に示す、鋼桁上下フランジおよびウェブ、台座コンクリート、アルミニウム床版上板の桁軸方向のひずみを一方向ひずみゲージで計測した。

試験は、98kN 増ごとに除荷、載荷を繰返す漸増繰返し載荷とし、荷重が上がらなくなった時点で載荷試験を終了した。

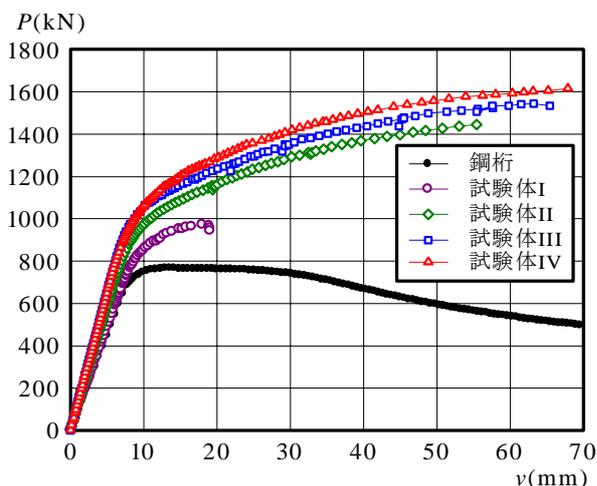


図-5 P と v の関係

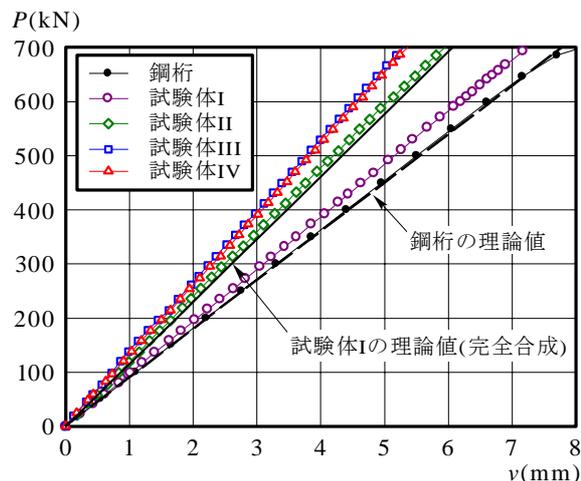


図-6 弾性域の P と v の関係

3.2 荷重とたわみの関係

鋼桁のみの載荷試験を行っていないので、鋼桁のみの挙動を FEM 解析によって推定した。FEM 解析には汎用有限要素解析プログラム DIANA[®]を用い、弾塑性有限変位解析を行った。使用した有限要素は 8 節点四辺形アイソパラメトリック曲面シェル要素(DIANA の要素タイプ CQ40S)である。鋼材の材料定数および板厚は、表-1 (b) に示す値を用いた。

図-2 の各試験体に用いられた鋼桁から、スタッドとソールプレートを取り除いた桁を解析モデルとした。鋼桁の支間中央に関する対称性を考慮して 1/2 モデルとした。残留応力は考慮せず、ウェブの初期面外たわみを半波長の正弦波として次式で与えた。ウェブ中央における最大初期面外たわみ $w_{0\max}$ を 2mm とした。

$$w_0 = w_{0\max} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{b}\right) \quad (1)$$

ここに、

- a : 支間長の 1/2 (=1920mm),
 - b : 鋼桁上下フランジの中心間距離(=612mm).
- 式(1)の x と y の原点は図-2(a)に示されている。

鋼桁および各試験体の荷重 P と支間中央のたわみ v の関係を図-5 に示す。図-6 には、 P が 700kN 以下の範囲の $P-v$ 関係が拡大されている。図-6 に示される鋼桁の理論たわみおよび試験体 I の鋼桁と台座コンクリートを完全合成と仮定した理論たわみは、せん断変形に対してウェブのみが抵抗し、曲げ変形に対して断面全体が抵抗すると仮定して、次式で算出されている。

$$v = \frac{PL^3}{48E_s I_v} + \frac{PL}{4A_{sw} G_s} \quad (2)$$

ここに、

$$G_s = \frac{E_s}{2(1+\mu_s)} \quad (3)$$

I_v : 鋼換算された断面全体の断面二次モーメント

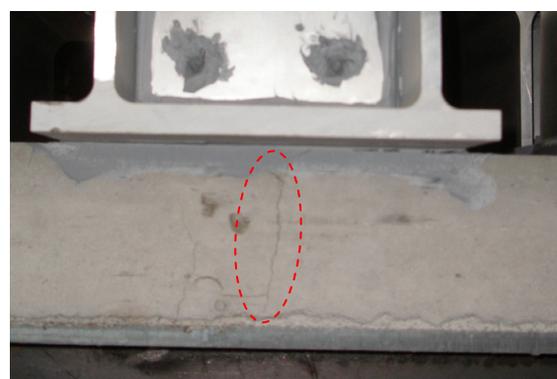


図-7 台座コンクリートのひび割れ [試験体 IV]

表-4 弾性域の傾き

	鋼桁	試験体			
		I	II	III	IV
v (mm)	5.43	5.07	4.10	3.70	3.77
P/v (kN/mm)	90.3	96.7	119.4	132.6	130.2

トであり、鋼桁に対しては I_s 、試験体 I に対しては I_{sc} を用いる。

- A_{sw} : 鋼桁ウェブの断面積,
- G_s : 鋼材のせん断弾性係数,
- μ_s : 鋼材のポアソン比.

図-6 から、試験体 I のたわみは、鋼桁と台座コンクリートを完全合成とした場合より、鋼桁のそれに近いことが分かる。これは図-7 に示されるようにスタッドが溶着されている位置の台座コンクリートの乾燥収縮によるひび割れにより、台座コンクリートが受け持つ圧縮応力が小さかったためと考えられる。同様なひび割れがすべての試験体の台座コンクリートに生じていた。一方、図-5 から、荷重が 700kN を超えると、試験体 I のたわみは、鋼桁のそれから離れていく。これは台座コンクリートの乾燥収縮によるひび割れが、試験体の曲げ変形に

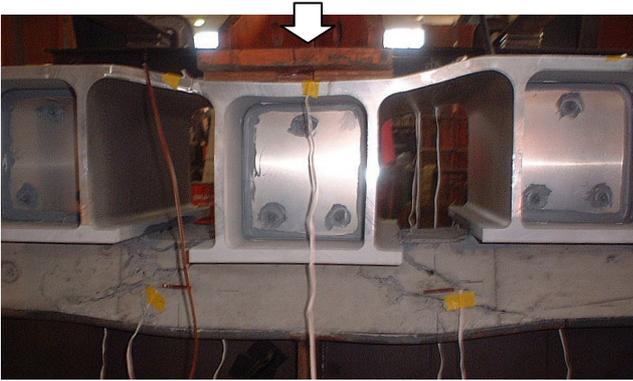


図-8 台座コンクリートの破壊状況 [試験体 IV]

よって閉じることにより、台座コンクリートが圧縮応力を受け持つためである。

各試験体の $P-v$ 関係において、原点から線形性を示す範囲内の荷重490kN時のたわみから求めた弾性域の傾きを表-4に示す。鋼桁に対する試験体 I, II, III, IV の弾性域の傾きはそれぞれ 1.07 倍, 1.32 倍, 1.47 倍および 1.44 倍であり、台座コンクリート厚の増加に伴い、増加傾向にある。しかし、台座コンクリート厚がそれぞれ 60mm, 100mm である試験体 III, IV の傾きはほぼ等しい。

支間中央の鋼桁下フランジのひずみが降伏ひずみに達する荷重を降伏荷重 P_Y とする。鋼桁のみに対する FEM 解析結果および各試験体の載荷試験から得られた P_Y の値を表-3(a)に示す。試験値の P_Y の値は、図-2(b)に示す、鋼桁下フランジに貼付されたひずみゲージによって測定されたひずみの直線外挿によって計算された支間中央のひずみが、降伏ひずみに達したときの荷重である。表-3(a)から、鋼桁のみの FEM 解析の P_Y の値は鋼桁の P_Y の理論値より若干大きい。試験体 I の試験結果の P_Y の値は、鋼桁と台座コンクリートを完全合成と仮定して計算した P_Y の値に近い。しかし、アルミニウム床版を有する試験体 II~IV の P_Y の値は、鋼桁とアルミニウム床版が完全合成されたと仮定して算出した P_Y の値と比べて、13~16%小さい。これは、鋼桁とアルミニウム床版が完全合成されていないためであり、このことについては、4.3 節で説明する。

FEM 解析で求められた鋼桁の最大荷重 P_u および載荷試験から得られた各試験体の P_u を表-3(b)に示す。この表から、鋼桁のみの P_u は、全塑性荷重 P_p よりわずかに大きな値となっている。これは P_p が、支間中央の断面のみが全塑性状態になるときの荷重であるのに対し、FEM 解析では、最大荷重に達するまで、支間中央の前後の広い範囲が塑性するためである。

表-3(b)から、試験体 I の最大荷重 P_u も、全塑性荷重 P_p より大きな値となっている。これについても、前述の鋼桁の場合と同様で、 P_p が支間中央の断面のみが全塑性状態になったときの荷重であるのに対し、載荷試験

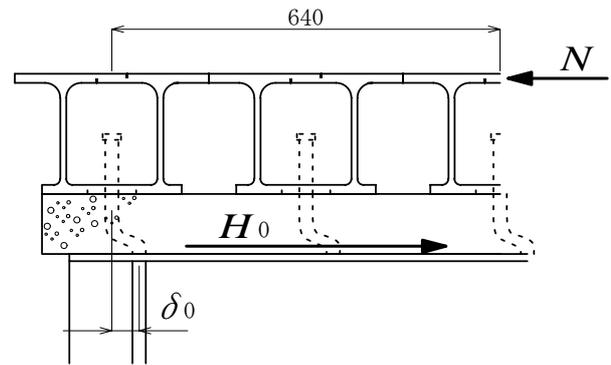


図-9 桁端近傍の水平せん断力

では、最大荷重に達するまで、支間中央の前後の広い範囲が塑性するためである。

アルミニウム床版を有する試験体 II, III および IV では、台座コンクリート厚が大きくなるに従って最大荷重 P_u が大きくなっており、全塑性荷重 P_p と同様な傾向を示している。しかし、試験体 II, III, IV の P_u は P_p を超えていない。これは、試験体が終局を迎えてもアルミニウム床版は弾性であったため、全塑性荷重を算出する際に仮定した、全断面が塑性状態になるという条件を満たす前に崩壊を迎えたためである。試験体 IV の台座コンクリートの破壊状況を図-8に示す。試験体 II~IV では、載荷点直下のアルミニウム床版の下フランジ下面の縁が台座コンクリートに接する位置から台座コンクリートに斜めにひび割れが生じた。この台座コンクリートの斜めのひび割れが鋼桁の上フランジに達する区間の上フランジに大きな変形が残された。

3.3 アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジのずれ

アルミニウム床版と鋼桁は、スタッドによって結合されているため、鉛直荷重の作用によって、スタッドに水平せん断力 H が作用し、アルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間に、結合の強さと作用するせん断力に応じたずれ δ が生じる。

図-9に示される、支点から 640mm の区間に生じる軸力 N と単位長さ当たりの水平せん断力 H_0 の水平方向の力のつり合いから、 H_0 を次式で推定する。

$$H_0 = -\frac{N}{640} = -\frac{\sigma_a(\varepsilon_a)A_a}{640} \quad (4)$$

ここに、

- N : 支点から 640mm 離れた位置の、アルミニウム床版に生じる軸力、
- ε_a : 支点から 640mm 離れた位置の、アルミニウム床版のひずみ、
- $\sigma_a(\varepsilon_a)$: アルミニウム合金の応力-ひずみ曲線におけるひずみ ε_a に対応する応力。

支点から 640mm の区間には、2つの開断面と2つの閉断面が存在するため、式(4)から開断面と開断面の影響

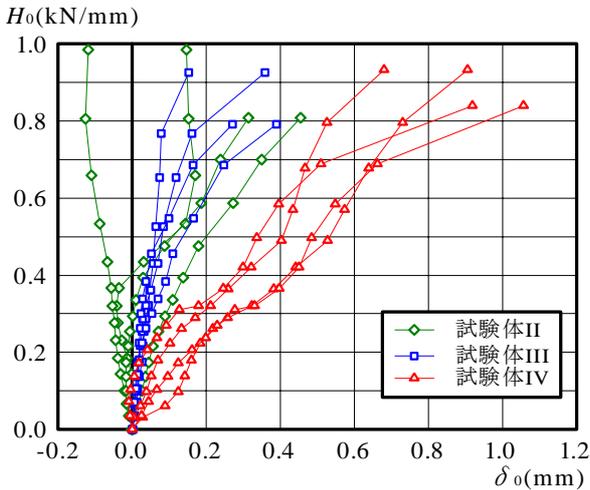


図-10 H_0 と δ_0 の関係

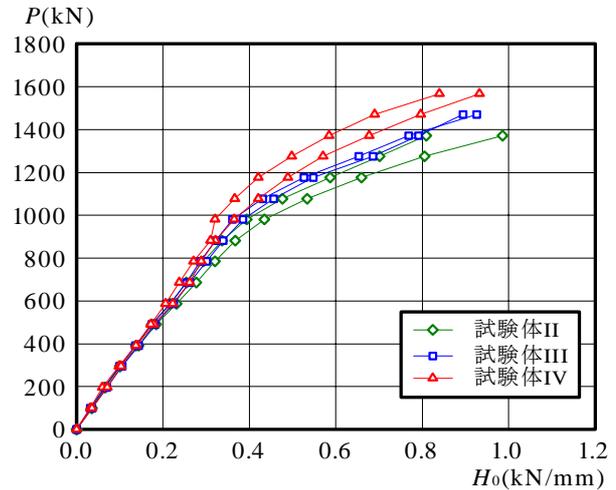


図-11 P と H_0 の関係

が平均化された H_0 が推定できる。

H_0 とクリップゲージによって計測された桁端の鋼桁上フランジ上面と台座コンクリート下面とのずれ δ_0 との関係を図-10に示す。図には各試験体の両桁端の表裏の関係が示されている。この図において、試験体IIの δ_0 が負の値を示している範囲がある。これは、台座コンクリートの乾燥収縮によるひび割れが、荷重載荷による試験体の変形によって閉じる方向に変位したためである。

載荷荷重 P と単位長さ当たりの水平せん断力 H_0 の関係を図-11に示す。図には各試験体の両桁端における P と H_0 の関係が示されている。終局を迎えるまで、 P の増加とともに H_0 も増加し続けているので、スタッドは破壊していない。伝達される H_0 の増加率が $P = 1000\text{kN}$ 付近から上昇しているのは、鋼桁下フランジが降伏したことにより、アルミニウム床版の受け持つ軸力が増加するためである。

4. 弾性合成理論の適用

4.1 基礎微分方程式の誘導

アルミニウム床版を有する鋼桁においては、アルミニウム床版と鋼桁の間に水平ずれが生じるため、両者の関係は不完全合成になる。不完全合成は弾性合成理論によって説明される^{7), 8)}。そこで、アルミニウム床版と鋼桁の合成作用に弾性合成理論を適用して載荷試験を評価する。

表-2の試験体II~IVの I_{sa} と I_{sca} の値の比較から、各試験体において、鋼桁、台座コンクリートおよびアルミニウム床版上板を完全剛性と仮定した場合の断面二次モーメントに台座コンクリートの剛性が占める割合は非常に小さい。したがって基礎微分方程式の誘導に台座コンクリートは考慮しない。

アルミニウム床版上板および鋼桁に生じる断面力を図-12に示す。アルミニウム床版上板と鋼桁との結合を、

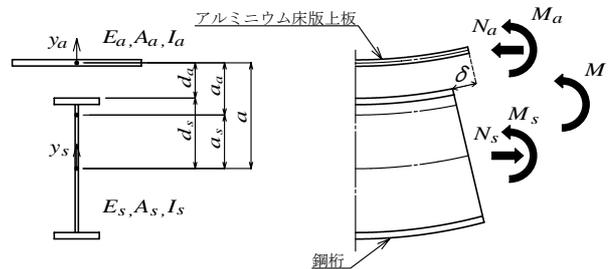


図-12 アルミニウム床版上板および鋼桁に生じる分担断面力

同じ強さの連続した弾性ばねに置き換えて考える。この弾性ばねのばね定数を k とし、図-12に示されるように、鋼桁上フランジの位置におけるアルミニウム床版上板と鋼桁上フランジとの間の水平ずれ δ と水平せん断力 H に対し、次式に示す比例関係を仮定する。

$$H = k\delta \quad (5)$$

微小区間 dx に対する、鋼桁上フランジ上面でのアルミニウム床版上板と鋼桁の微小ずれ量 $d\delta$ は、次式で与えられる。

$$\frac{d\delta}{dx} = \frac{1}{k} \cdot \frac{dH}{dx} = \varepsilon_{ss} - \varepsilon_{as} + \Delta_T \quad (6)$$

ここに、

$$\varepsilon_{ss} = \frac{N_s}{E_s A_s} - \frac{M_s}{E_s I_s} d_s \quad (7)$$

$$\varepsilon_{as} = -\frac{N_a}{E_a A_a} - \frac{M_a}{E_a I_a} d_a \quad (8)$$

$$\Delta_T = (\alpha_s - \alpha_a) \Delta T \quad (9)$$

ε_{ss} , ε_{as} : 鋼桁上フランジ上面の位置での、それぞれ鋼桁およびアルミニウム床版上板に生じる、外力によるひずみ、

E_s , E_a : それぞれ鋼およびアルミニウムの弾性係数、

A_s , A_a : それぞれ鋼桁およびアルミニウム床版上

I_s, I_a : それぞれ鋼桁およびアルミニウム床版上板の断面二次モーメント,
 N_s, N_a : それぞれ鋼桁およびアルミニウム床版上板に生じる軸力,
 M_s, M_a : それぞれ鋼桁およびアルミニウム床版上板に生じる曲げモーメント,
 d_s, d_a : 鋼桁上フランジ上面から, それぞれ鋼桁の重心およびアルミニウム床版上板の重心までの距離,
 α_s, α_a : それぞれ鋼およびアルミニウム合金の線膨張係数,
 Δ_T : 鋼桁とアルミニウム床版上板の温度ひずみ差,
 ΔT : 温度の変化量(温度上昇が正, 温度低下が負).

水平方向の力の釣り合いから, 次式が得られる.

$$N_s = N_a = N \quad (10)$$

アルミニウム床版上板と鋼桁のたわみに関する曲率が同じであるので, 次式が成立する.

$$\frac{M_s}{E_s I_s} = \frac{M_a}{E_a I_a} \quad (11)$$

全モーメント M は次式で与えられる.

$$M = M_s + M_a + Na \quad (12)$$

ここに,

a : アルミニウム床版上板の重心と鋼桁の重心の間の距離.

式(11)と(12)からアルミニウム床版上板および鋼桁に生じる曲げモーメントがそれぞれ次式で与えられる.

$$M_a = \frac{E_a I_a}{E_s I_s + E_a I_a} (M - Na) \quad (13)$$

$$M_s = \frac{E_s I_s}{E_s I_s + E_a I_a} (M - Na) \quad (14)$$

式(10), (13), (14)を式(7)と(8)に代入して, 次式を得る.

$$\varepsilon_{ss} = \frac{N}{E_s A_s} - \frac{M - Na}{E_s I_s + E_a I_a} d_s \quad (15)$$

$$\varepsilon_{as} = -\frac{N}{E_a A_a} - \frac{M - Na}{E_s I_s + E_a I_a} d_a \quad (16)$$

アルミニウム床版上板の微小区間 dx に生じる水平方向の力の釣り合いから, 次式が与えられる.

$$H = dN/dx \quad (17)$$

式(15), (16), (17)を式(6)に代入して, 軸力に関する2階の微分方程式が次のように導出される.

$$\frac{d^2 N}{dx^2} - \lambda^2 N = -rM + k\Delta_T \quad (18)$$

ここに,

$$\lambda = \sqrt{\frac{kaI_v}{a_s E_s A_s (I_s + I_a/n_a)}} \quad (19)$$

$$r = \frac{ka}{E_s (I_s + I_a/n_a)} \quad (20)$$

$$n_a = E_s/E_a \quad (21)$$

$$a = \frac{n_a A_v}{A_a} a_s = \frac{A_v}{A_s} a_a \quad (22)$$

$$A_v = \frac{A_a}{n_a} + A_s \quad (23)$$

$$I_v = I_s + \frac{I_a}{n_a} + A_v a_s a_a \quad (24)$$

a_a, a_s : アルミニウム床版上板と鋼桁を完全合成とした場合の断面の中立軸から, それぞれアルミニウム床版上板の重心および鋼桁の重心までの距離.

4.2 集中荷重に対する解

支間長 L のアルミニウム床版を有する鋼桁に対して, 支間中央に集中荷重 P が載荷された場合, $0 \leq x \leq L/2$ の曲げモーメントは次式で与えられる.

$$M = \frac{P}{2} x \quad (25)$$

ここに,

x : 支点からの距離.

式(25)を式(18)へ代入し, $\Delta_T = 0$ のとき, 式(17)は次式になる.

$$\frac{d^2 N}{dx^2} - \lambda^2 N = -r \frac{P}{2} x \quad (26)$$

$x=0$ で $N=0$ および $x=L/2$ で $dN/dx=0$ の境界条件に対して, 式(26)の解は次式で与えられる.

$$N = \frac{A_s a_s}{I_v} \cdot \frac{P}{2} \left\{ x - \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda \cosh(\lambda L/2)} \right\} \quad (27)$$

アルミニウム床版上板および鋼桁に生じるひずみは次式で表される.

$$\varepsilon_{as} = \left(\frac{a y_a}{E_s I_s + E_a I_a} - \frac{1}{E_a A_a} \right) N - \frac{y_a}{E_s I_s + E_a I_a} M \quad (28)$$

$$\varepsilon_{ss} = \left(\frac{a y_s}{E_s I_s + E_a I_a} + \frac{1}{E_s A_s} \right) N - \frac{y_s}{E_s I_s + E_a I_a} M \quad (29)$$

ここに,

y_a, y_s : それぞれアルミニウム床版上板および鋼桁の中立軸からの距離

式(28), (29)に式(25), (27)を代入して, 集中荷重によるアルミニウム床版上板および鋼桁に生じるひずみが次式で表される.

$$\varepsilon_{as} = \frac{P}{2} \left[S_a x - T_a \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda \cosh(\lambda L/2)} \right] \quad (30)$$

$$\varepsilon_{ss} = \frac{P}{2} \left[S_s x - T_s \frac{\sinh(\lambda x)}{\lambda \cosh(\lambda L/2)} \right] \quad (31)$$

ここに,

$$S_a = -\frac{A_s a_s + A_a y_a / n_a}{I_v E_a A_a} \quad (32)$$

$$T_a = \frac{A_s a_s}{I_v} \left(\frac{a y_a}{E_s I_s + E_a I_a} - \frac{1}{E_a A_a} \right) \quad (33)$$

$$S_s = -\frac{y_s - a_s}{E_s I_v} \quad (34)$$

$$T_s = \frac{A_s a_s}{I_v} \left(\frac{a y_s}{E_s I_s + E_a I_a} + \frac{1}{E_s A_s} \right) \quad (35)$$

4.3 連結構造のばね定数

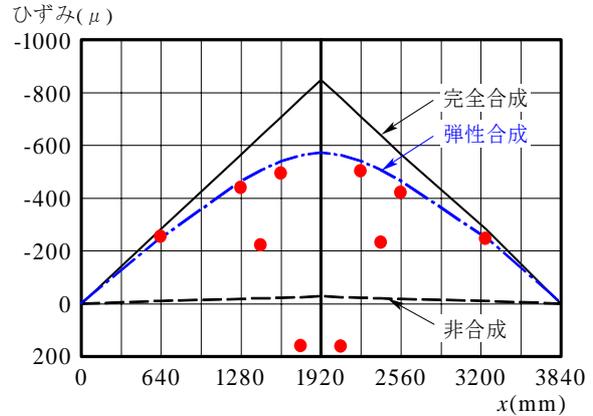
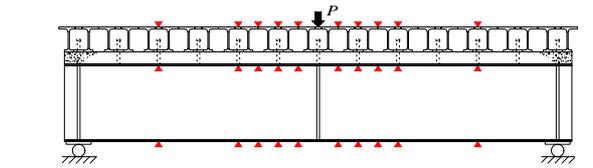
$P-v$ 関係で線形性を示す範囲内の荷重 490kN 時の試験体 IV における, アルミニウム床版上板, 鋼桁上フランジおよび鋼桁下フランジのひずみ分布を図-13 に示す. アルミニウム床版上板のひずみの値は, 図-2(b) に示されるアルミニウム床版上板の幅方向に3点あるいは4点で計測されたひずみの平均値である. 図には, アルミニウム床版上板と鋼桁を完全合成とした場合のひずみの理論値と, 合成されていない場合のひずみの理論値とが示されている. 図-13 (a)および(b)から, アルミニウム床版上板および鋼桁上フランジのひずみ分布は変動している. これは, 中空になっているアルミニウム床版開断面部の上板が板曲げ変形したことに起因する. したがって, ばね定数 k の算出には, 支間中央から320mmの位置の板曲げ変形が生じていない閉断面部の鋼桁下フランジ下面のひずみの値を用いる. 鋼桁下フランジ下面のひずみの値から, 式(31)を用いて λ の値を得る. 式(19)を k について解いて得られる次式に, λ の値を代入してばね定数 k が求められる.

$$k = \frac{a_s E_s A_s (I_s + I_a / n_a)}{a I_v} \lambda^2 \quad (36)$$

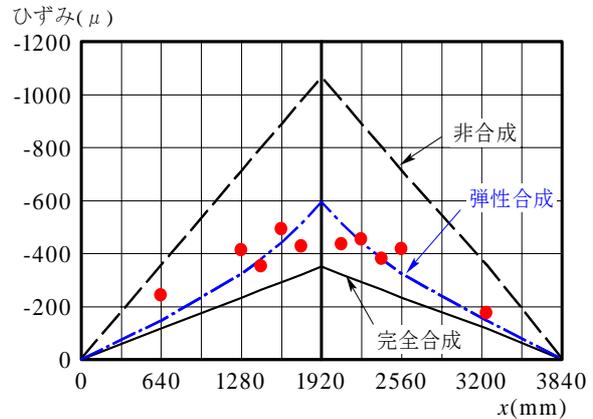
ばね定数 k は, 載荷荷重が294kNから, 試験体の下フランジが降伏に達しない荷重686kNまでを98kN増ごとに計算された値の平均値である. 算出された試験体 II~IV の k の値を表-5 に示す. 表-3(b)に示したように, 最大荷重 P_u は試験体 II, III, IV の順で大きくなる. しかし, ばね定数 k は試験体 III が最も大きくなる. これは, アルミニウム床版と鋼桁の結合に用いられたスタッドの作用が, 合成桁の弾性領域と塑性領域で異なるためと考えられるが, 詳細は不明である.

表-5 のばね定数を用いて求められた弾性合成のひずみ分布を図-13 に示している. アルミニウム床版上板上面の開断面部のひずみ分布, 鋼桁上フランジ下面のひずみ分布および鋼桁下フランジ下面のひずみ分布は, すべて弾性合成のひずみ分布とほぼ一致している.

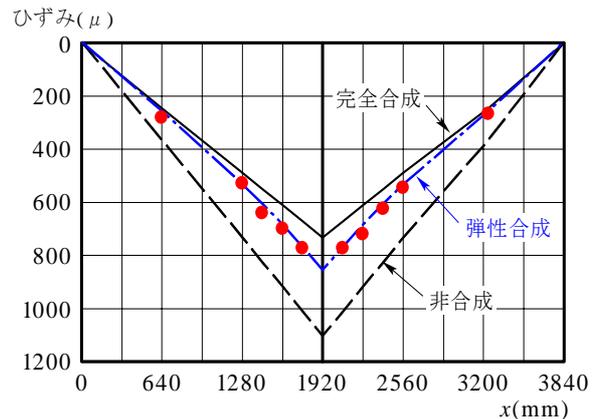
載荷荷重 490kN のとき, 試験体 IV の支間中央から左



(a) アルミニウム床版上板上面



(b) 鋼桁上フランジ下面



(c) 鋼桁下フランジ下面

図-13 ひずみ分布 [試験体 IV]

表-5 連結構造のばね定数の値

試験体	k (kN/mm ²)
II	0.301
III	0.427
IV	0.381

右320mmの位置の断面のひずみ分布と表-5のばね定数 k の値を用いた弾性合成理論によるひずみ分布の比較を図-14に示す。鋼桁ウェブのひずみの値は、ウェブの表裏の平均値である。この図には、鋼桁とアルミニウム床版上板が完全合成された場合および非合成の場合のひずみ分布も示されている。図-14から、断面のひずみ分布は、弾性合成理論を用いて算出されたひずみとほぼ一致することが分かる。

試験体Ⅱ～Ⅳに対して、弾性合成理論から算出される支間中央の鋼桁下フランジ下面のひずみが降伏ひずみに達したときの降伏荷重 P_Y の値を表-3(a)に示す。この表から、弾性合成理論の P_Y が、試験結果の P_Y とほぼ等しいことが分かる。

5. 結論

本研究では、アルミニウム床版を有する鋼桁の静的載荷試験を行い、アルミニウム床版と鋼桁の合成作用を明らかにした。主な結果を以下に示す。

- 1) 降伏荷重および最大荷重は、台座コンクリートを含めずにアルミニウム床版上板と鋼桁とを完全合成と仮定して算出される鋼桁下フランジが降伏するときの荷重 P_Y および全断面が塑性状態になるときの荷重 P_p にそれぞれ近い値を示す。
- 2) 台座コンクリート厚の増加にともなって、アルミニウム床版を有する鋼桁の最大荷重は上昇する。
- 3) アルミニウム床版を有する鋼桁の合成作用に対して、弾性合成理論による基礎微分方程式を導出し、集中荷重に対する解を与えた。
- 4) 閉断面にスタッドを3本挿入した場合のアルミニウム床版と鋼桁の連結構造のばね定数を表-5に与えた。
- 5) 試験結果のひずみ分布は、ばね定数を用いて弾性合成理論から算出されたひずみ分布にほぼ一致する。
- 6) 弾性合成理論により、アルミニウム床版を有する鋼桁の降伏荷重を推定することができる。

謝辞：本研究は、文部科学省科学技術振興調整費戦略的

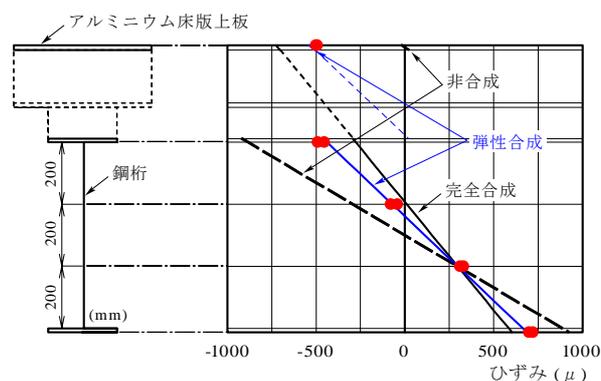


図-14 断面のひずみ分布 [試験体Ⅳ]

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，2003～2005）の下で行なわれた。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅰ共通編 Ⅱ鋼橋編，2002。
- 2) 大倉一郎：アルミニウム合金の橋への適用，軽金属溶接構造協会誌，Vol.41，No.10，pp.1-6，2003。
- 3) 大倉一郎，岡田理，萩澤亘保，大澤章吾：開閉断面のアルミニウム床版の開発，構造工学論文集，Vol.51A，pp.1219-1227，2005。
- 4) 大倉一郎，石川敏之，筒井将仁，大澤章吾：トラックタイヤの接地形状がアルミニウム床版の板曲げ応力に与える影響，土木学会論文集 A，Vol.63，No.4，pp.655-666，2007。
- 5) 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。
- 6) TNO Building and Construction Research：DIANA Release 8.1.2，Delft，Netherland，2003。
- 7) O.シュタインハルト，A.ハウラネック（訳）橋善雄，小松定夫：鋼橋の理論と計算，山海堂，pp.470-477，1965。
- 8) 山本 稔：不完全合成桁の曲げ理論，土木学会論文集，第67号，pp.1-10，1960。

(2008年9月18日受付)