

平成 21 年 5 月 18 日現在

研究種目：基盤研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19360202

研究課題名（和文） アルミニウム床版による軽量橋の実現

研究課題名（英文） REALIZATION OF LIGHTWEIGHT BRIDGES BY ALUMINUM DECKS

研究代表者

大倉 一郎 (OKURA ICHIRO)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：10127194

研究成果の概要：アルミニウム床版による軽量橋を実現するために、アルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労特性の究明、アルミニウム床版の無収縮モルタル注入孔の疲労強度の究明、地覆のアルミニウム床版への取り付け構造の開発、トラックタイヤ載荷によってアルミニウム床版に生じる板曲げ応力の究明、アルミニウム床版と鋼主桁との合成作用の究明を行なった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	8,100,000	2,430,000	10,530,000
2008 年度	2,100,000	630,000	2,730,000
年度			
年度			
年度			
総計	10,200,000	3,060,000	13,260,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：アルミニウム床版 軽量橋 地覆 弾性合成 摩擦攪拌接合
鋼製高力ボルト摩擦接合継手 疲労強度 トラックタイヤ載荷

1. 研究開始当初の背景

我国では設計自動車荷重が 196 kN から 245 kN に変更され、橋のコンクリート床版や鋼桁の補強が求められる場合がある。また兵庫県南部地震後、新たに導入された地震力に対して橋脚補強が求められる場合がある。これらに対して、アルミニウム床版の導入により、床版そのものの重量を減らすことによって対処できないかとの要望が出されている。アルミニウム床版の単位面積当たりの重量はコンクリート床版の重量の約 5 分の 1 であり、アルミニウム床版を用いた鋼橋全体の重量は、コンクリート床版を用いた鋼橋全体の重量の約 2 分の 1 になる。

そこで、研究代表者は、2002 年、摩擦攪拌接合によってアルミニウム床版を製作し、その疲労特性を明らかにした。摩擦攪拌接合は、イギリスの溶接研究所で 1991 年に考案された固相接合法の一種であり、現在、アルミニウム製品を中心にロケット、航空機、自動車、鉄道車輛、船舶などの製造に用いられている。

2002 年に製作されたアルミニウム床版は、閉断面で構成されていたため、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。この問題を解決するために、2005 年、開閉断面のアルミニウム床版を新たに開発した。

アルミニウム床版は無塗装で使用される。

したがって、2006年、腐食がアルミニウム母材と摩擦攪拌接合部の機械的強度および疲労強度に及ぼす影響を明らかにした。

2. 研究の目的

本研究の目的は、これまでの研究成果に基づいて、アルミニウム床版による軽量橋を実現するために必要な諸課題を解決することである。

3. 研究の方法

本研究では、アルミニウム床版による軽量橋を実現するために、次の研究を実施した。

アルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労特性の究明

アルミニウム床版の無収縮モルタル注入孔の疲労強度の究明

地覆のアルミニウム床版への取り付け構造の開発

トラックタイヤ載荷によってアルミニウム床版に生じる板曲げ応力の究明

アルミニウム床版と鋼主桁との合成作用の究明

4. 研究成果

(1) アルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労特性の究明

アルミニウム床版を現場接合する場合、鋼製高力ボルトによる摩擦接合が必要になる。本研究では、1列の鋼製高力ボルトで締結されたアルミニウム合金板摩擦接合継手の疲労試験を実施し、添接板の板厚、初期導入軸力の大きさ、応力比が疲労強度に与える影響を明らかにした。

図1, 2, 3に示す3種類の疲労亀裂によって試験体が破断した。ボルト孔の縁には疲労亀裂が発生しなかった。

タイプ1の亀裂は、突合せ側の添接板の表面で、ボルトの座金との接触部の縁に発生する。接触部では、金属光沢が失われていた。タイプ2の亀裂は、突合せ側の添接板の裏面で、母材との接触部の縁に発生する。接触部では、プラスト処理によって表面に付けられた凹凸が滑らかにされていた。タイプ3の亀裂は、添接板の材端側の母材表面で、添接板との接触部の縁に発生する。接触部では、金属光沢が失われていた。

接触部の縁には、アルミニウム合金が擦れることにより生成された黒い粉 ($AlO(OH) \cdot H_2O$) が付着していたので、タイプ1, 2, 3の疲労亀裂は、いずれもフレッティング疲労によるものである。図1, 2, 3の各図には、疲労亀裂の発生起点が θ で示されている。タイプ1, 2, 3の亀裂の発生起点は、荷重方向 (x 軸方向) に対してそれぞれ約 30° , 40° , 60° であった。

添接板の総板厚が母材の板厚と等しい場合は、タイプ1 または 2 の亀裂で添接板が破断した。添接板の総板厚が母材の板厚より厚くなるに従って、添接板の応力が低下するため、タイプ1 の亀裂で母材が破断した。

タイプ1 または 2 の亀裂で添接板が破断した。添接板の総板厚が母材の板厚より厚くなるに従って、添接板の応力が低下するため、タイプ1 の亀裂で母材が破断した。

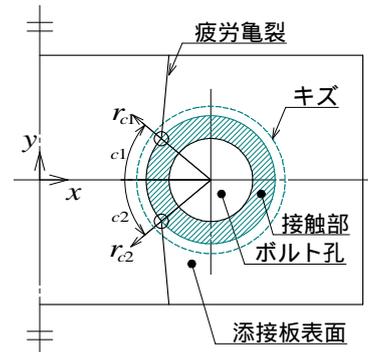


図1 タイプ1の疲労亀裂

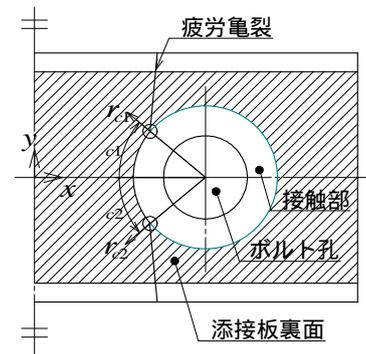


図2 タイプ2の疲労亀裂

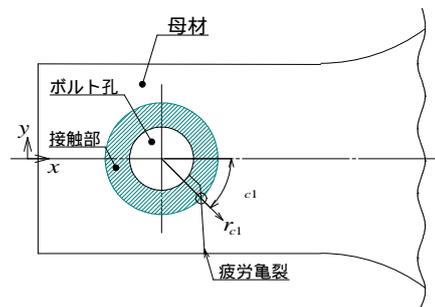


図3 タイプ3の疲労亀裂

タイプ1 と 2 の亀裂に対する S-N 曲線、およびタイプ3 の亀裂に対する S-N 曲線をそれぞれ図4, 5に示す。図4の σ_2 は添接板に生じる応力範囲であり、図5の σ_1 は母材に生じる応力範囲である。応力比が高くなるに従って、疲労強度は低下する。-1 から 0.5 の応力比に対して、S-N 曲線の傾きは 3 から 4 の間である。高力ボルトへの F8T と F10T の初期導入軸力の違いによって疲労強度は変わらなかった。

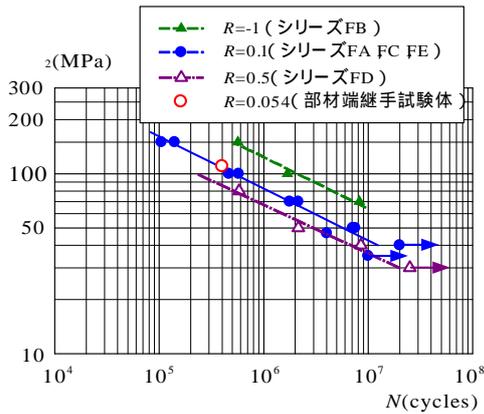


図4 タイプ と の亀裂に対する S-N 曲線

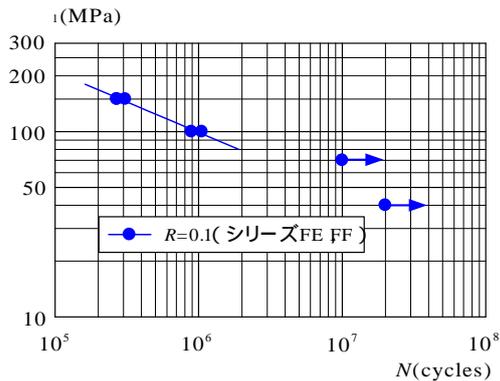


図5 タイプ の亀裂に対する S-N 曲線

(2) アルミニウム床版の無収縮モルタル注入孔の疲労強度の究明

図6に示すように、アルミニウム床版と鋼桁は、スタッドとモルタルによって連結されており、モルタルを充填するために必要な開口が床版の上板に設けられている。この開口は、当初直径50mmの円形であったが、円形の応力集中係数は3と大きいので、開口部の面積を小さくし、さらに両端を丸めたみぞ形状にすることにより応力集中係数を2.07に抑える、図7に示す形状を考えた。

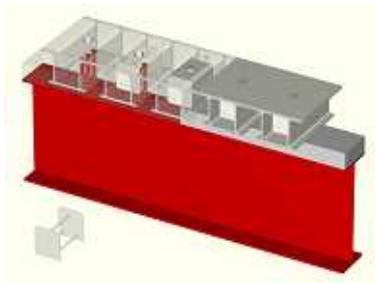


図6 アルミニウム床版と鋼桁の連結構造

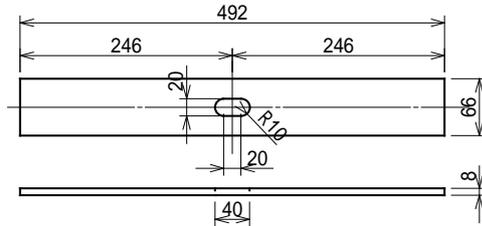


図7 モルタル充填開口を有する疲労試験片

図7の試験片に対する疲労試験の結果を図8に示す。応力範囲 $\Delta\sigma$ には、開口部の応力集中係数が考慮されている。さらに同図には母材の設計S-N曲線も記載されている。試験結果が設計S-N曲線より上にあるので、モルタル充填開口の疲労強度は、母材の設計S-N曲線で評価される。

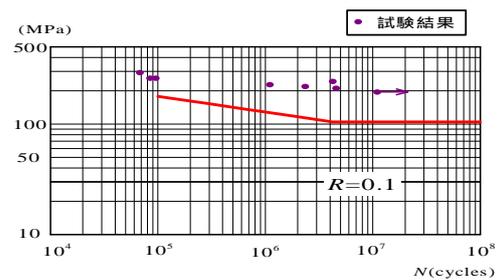


図8 疲労試験の結果と設計 S - N 曲線

(3) 地覆のアルミニウム床版への取り付け構造の開発

開断面のアルミニウム床版を実用に供するためには、地覆のアルミニウム床版への取付け構造を考えなければならない。鉄筋コンクリート製地覆のアルミニウム床版への取付け構造を図9に示す。地覆は、U字型鉄筋とナットによってアルミニウム床版に固定される。U字型鉄筋は、アルミニウム床版の開断面部または開断面部に取付けられる。U字型鉄筋をアルミニウム床版の裏面で、ナットで締結するためには、開断面部では上板と下フランジに、開断面部では上板に孔を開けなければならない。開断面部の上板には、摩擦攪拌接合部に孔が開けられる。

図10に示すように、防護柵に車両が衝突し、防護柵の支柱に水平力が作用すると、地覆の右端を支点として回転モーメントが生じ、U字型鉄筋の左側の鉄筋に引抜力が発生する。防護柵の支柱1本に作用する水平力が、支柱の両側の、支柱に直近の2本のU字型鉄筋によって抵抗されると仮定すると、U字型鉄筋の左側の鉄筋には70kNの引抜力が生じる。この引抜力に対して、アルミニウム床版の開断面部と開断面部は十分な引抜強度を保持しなければならない。そこで、アルミニウム床版の開断面部と開断面部の引抜強度を、それぞれ図11と12に示すような引抜試

験によって明らかにした。

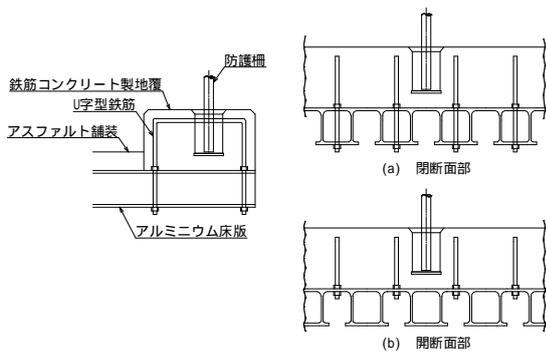


図 9 鉄筋コンクリート製地覆のアルミニウム床版への取付け構造

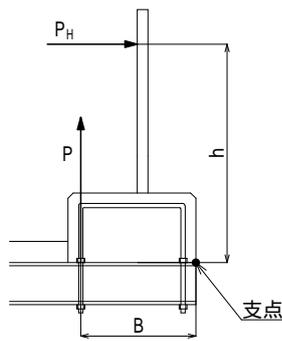


図 10 衝突荷重と U 字型鉄筋に生じる引抜力

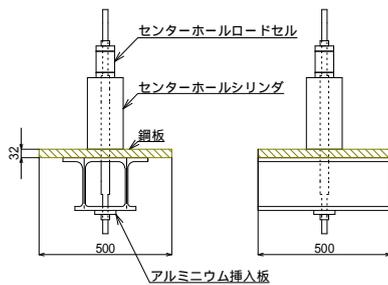


図 11 開断面部の引抜試験

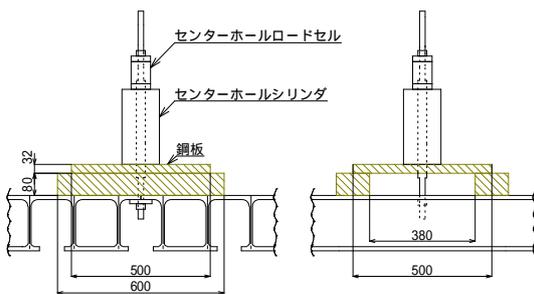


図 12 開断面部の引抜試験

鋼製座金の下にアルミニウム挿入板を用

いない場合、0.2%引抜強度は開断面部で 115kN、開断面部で 151kN であった。これらの値は、車両の衝突荷重による引抜力 70kN を十分上回る。アルミニウム挿入板が用いられない場合、アルミニウム床版に残留変形が残った。鋼製座金とアルミニウム床版の開断面部の下フランジまたは開断面部の上板との間にアルミニウム挿入板を設けることにより、アルミニウム床版の残留変形を防止することができた。A6061P-T6 材で、大きさが 80×80×20mm のアルミニウム挿入板を用いることにより、0.2%引抜強度は、開断面部で 193kN、開断面部で 244kN になった。

(4) トラックタイヤ荷重によってアルミニウム床版に生じる板曲げ応力の究明

研究代表者は、これまでに、単輪のトラックタイヤ荷重装置を製作し、これを用いて、アルミニウム床版の上板に生じる板曲げ応力の特性を明らかにした。本研究では、図 13 に示す複輪トラックタイヤ荷重、道路橋示方書で規定される 500mm×200mm の長方形領域荷重、さらに図 14 に示す 500mm×Lmm の変動長方形領域荷重に対して、アルミニウム床版に生じる板曲げ応力を FEM 解析によって調べた。アルミニウム床版の要素分割の一例を図 15 に示す。

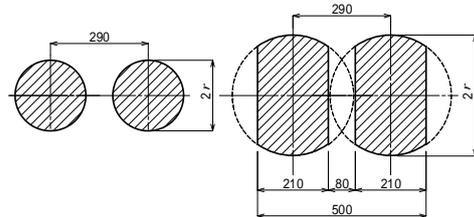


図 13 複輪トラックタイヤ荷重

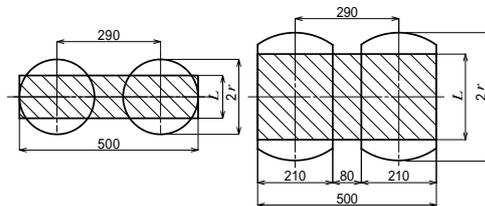


図 14 変動長方形領域荷重

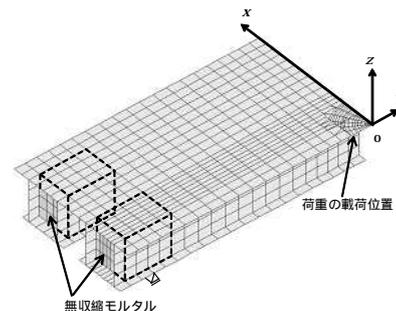


図 15 アルミニウム床版の要素分割の一例

FEM 解析の結果、次のことが明らかになった。

複輪トラックタイヤ載荷の場合、アルミニウム床版の上板の橋軸断面に生じる応力は板曲げ応力であり、この応力は荷重に対して非線形になる。アルミニウム床版の上板の橋軸直角断面に生じる応力の板曲げ応力成分は荷重に対して非線形になる。しかし、アルミニウム床版全体の橋軸直角方向の曲げモーメントによって起こされる圧縮の膜応力成分は、タイヤの接地形状の影響を受けない。

500mm×200mm の長方形領域載荷によってアルミニウム床版に生じる板曲げ応力は、複輪トラックタイヤ載荷による板曲げ応力と大きく異なる。

500mm×Lmm の変動長方形領域載荷によってアルミニウム床版に生じる板曲げ応力は、500mm×200mm による長方形領域載荷の場合よりも、複輪トラックタイヤ載荷による板曲げ応力に近い。

(5) アルミニウム床版と鋼主桁との合成作用の究明

アルミニウム床版はスタッドによって鋼桁に連結されるため、アルミニウム床版と鋼桁との間に合成作用が生じる。さらに、アルミニウム合金と鋼の線膨張係数は2倍異なるため、温度変化を受けるアルミニウム床版 - 鋼桁橋には温度変化応力および鋼桁に反りが発生する。本研究は、これらの問題を明らかにした。

アルミニウム床版と鋼桁の合成作用の程度を評価する指標 α を与えた。図 16 に示すように、指標 α が 0 に近いとき、アルミニウム床版と鋼桁の関係は非合成に近く、 α が 1 に近いとき、両者の関係は完全合成に近い。 L が 10 以上のとき、 α は 0.9 より大きく、アルミニウム床版と鋼桁の関係は完全合成に近い。ここでは、図 6 に示すアルミニウム床版と鋼桁の連結構造が有する結合度とアルミニウム床版および鋼桁の断面二次モーメントから成るパラメータ、 L は鋼桁の支間長である。

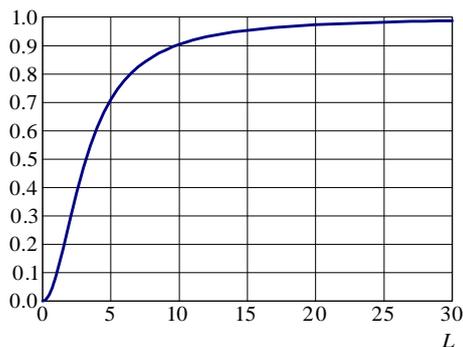


図 16 α と L の関係

アルミニウム床版と鋼主桁との合成作用が弾性合成であっても、道路橋示方書で規定される、完全合成に対する有効幅がアルミニウム床版の有効幅に使用できる。

図 6 に示す連結構造を有するアルミニウム床版 - 鋼桁橋の合成作用の程度は完全合成に近い。

図 6 に示す連結構造を有するアルミニウム床版 - 鋼桁橋の温度変化応力は、両者の関係を完全合成とした場合の温度変化応力に近い。

支間長が長くなると温度変化応力は、アルミニウム床版で増加し、鋼桁で減少する。

30 の温度変化による、アルミニウム床版の温度変化応力はアルミニウム合金 A6061S-T6 材の許容応力 120MPa の 5% ~ 10% であり、鋼桁上フランジの温度変化応力は、鋼種 SM490Y 材の許容応力 210MPa の 16% ~ 20% である。30 の温度変化による、支間長に対する反りの比 v/L は、支間長に関わらず約 1/2500 である。

図 6 に示すアルミニウム床版と鋼桁の連結構造にはスタッドが 3 本用いられている。スタッドの本数と、アルミニウム床版と鋼桁の結合度の関係を明らかにするために、図 17 に示す試験体のせん断試験を行った。アルミニウム押出材は A6061S-T6 材である。アルミニウム押出材の閉断面部に 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、内部にモルタルを充填させた。アルミニウム床版と T 型鋼をスタッドによって連結させ、T 型鋼のウェブを、添接板を用いて、M20×75mm (F10T) の高力ボルトで締結して試験体を作製した。スタッド 1 本の試験体は、アングルで両端の水平移動を拘束した場合と、拘束しない場合に対してせん断試験を実施し、スタッド 2 本、3 本、4 本の試験体は、その両端をアングルで拘束しないでせん断試験を実施した。試験体の前後左右の 8 箇所、変位を計測した。H 型鋼の左右のフランジの上に載荷板を設置し、漸増繰返し載荷し、荷重が上がらなくなった時点で載荷試験を終了した。

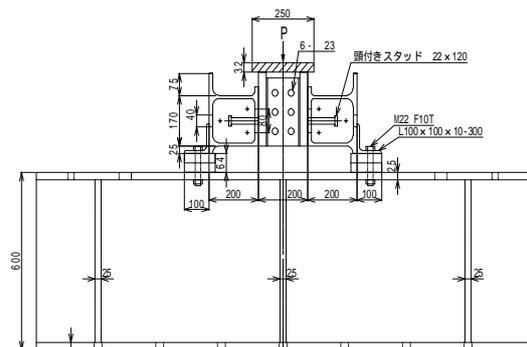


図 17 せん断試験

スタッド1本の場合,水平移動に対して拘束のある試験体の終局強度は,ない試験体より約2倍大きく,水平移動の拘束がないスタッド4本の試験体の終局強度より大きかった.水平移動の拘束が試験体の終局強度に及ぼす影響が大きいことが明らかになった.

スタッドの本数が増加すると,荷重-変位関係の傾きが増加した.しかし,スタッド3本と4本では終局強度はほぼ同じであった.スタッドの本数が増えると,荷重が小さい範囲では,荷重-変位関係の傾きは増加するが,モルタルにひび割れが生じると荷重が上がりなくなる.アルミニウム床版と鋼桁上フランジとの連結構造の崩壊パターンとして,スタッドの破壊で崩壊する場合とモルタルに生じたひび割れで崩壊する場合の2つのパターンが明らかになった.

さらに,アルミニウム床版と鋼主桁との合成作用に対して修正弾性合成理論を構築した.この理論では,鋼主桁の断面変形に対して平面保持の仮定を設けるが,アルミニウム床版の上板と鋼主桁の上フランジとの間に対しては平面保持の仮定を設けない.この理論により,アルミニウム床版と鋼主桁との合成作用を精度良く表すことができるようになった.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計5件)

石川敏之, 筒井将仁, 大倉一郎: 複輪トラックタイヤ載荷によってアルミニウム床版に生じる板曲げ応力, 第六回道路橋床版シンポジウム論文報告集, 土木学会, pp.87-92, 2008, 査読有.

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, 査読有.

石川敏之, 高木真広, 大倉一郎, 武野正和: アルミニウム床版-鋼桁橋の合成挙動および温度変化応力, 第7回複合構造の活用に関するシンポジウム, 土木学会, CD 論文番号 63, pp.1-6, 2007, 査読無.

I. Okura, M. Tsutsui and T. Ishikawa: Influence of contact shape of track tires on plate-bending stresses in aluminum decks, The 7th German-Japanese Bridge Symposium, Osaka, Japan, pp.102-103 on Book, Full paper on CD, 2007, 査読無.

I. Okura, M. Takagi, M. Takeno and T. Ishikawa: Composite behavior of aluminum deck-steel girder bridges,

The 7th German-Japanese Bridge Symposium, Osaka, Japan, pp.170-171 on Book, Full paper on CD, 2007, 査読無.

[学会発表](計6件)

高木真広, 大倉一郎: アルミニウム床版の有効幅, 第63回土木学会年次学術講演会, 論文番号 - 303, 2008. 東北大学.

筒井将仁, 大倉一郎, 石川敏之: 複輪トラックタイヤ載荷と長方形領域載荷によってアルミニウム床版に生じる板曲げ応力, 第63回土木学会年次学術講演会, 論文番号 - 360, 2008. 東北大学.

大倉一郎, 筒井将仁: 地覆定着のためのアルミニウム床版の引抜強度, 第63回土木学会年次学術講演会, 論文番号 - 407, 2008. 東北大学.

武野正和, 高木真広, 大倉一郎: アルミニウム床版-鋼桁橋の合成度および温度変化応力, 第62回土木学会年次学術講演会, 論文番号 - 134, 2007. 広島大学.

高木真広, 石川敏之, 大倉一郎: アルミニウム床版-鋼桁橋とRC床版-鋼桁橋の桁高, 質量および建設コストの比較, 第62回土木学会年次学術講演会, 論文番号 - 135, 2007. 広島大学.

筒井将仁, 石川敏之, 大倉一郎: トラックタイヤ載荷によって生じるアルミニウム床版の板曲げ応力, 第62回土木学会年次学術講演会, 論文番号 - 226, 2007. 広島大学.

[その他]

ホームページ

http://alst.jp/pdf/ALST_report3.pdf

http://alst.jp/pdf/ALST_report4.pdf

http://alst.jp/pdf/ALST_report5.pdf

http://alst.jp/pdf/ALST_report8.pdf

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大倉 一郎 (OKURA ICHIRO)

大阪大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号: 10127194

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

石川 敏之 (ISHIKAWA TOSHIYUKI)

名古屋大学・大学院環境学研究科・助教

研究者番号: 00423202