

角太橋®(角形鋼管を用いた床版橋)の開発

Development of “Kakutabashi”®, Steel Deck Slab Bridge Using Square Tube

本 間 宏 二^{*(1)}
Koji HOMMA

後 藤 信 弘^{*(2)}
Nobuhiro GOTO

高 木 優 任^{*(3)}
Masahide TAKAGI

抄 録

支間15m以下の小規模橋梁を対象として、角形鋼管を用いた床版橋を提案した。本床版橋は、ロール成形角形鋼管を主部材として、軽量、低桁高、省力化、短工期、狭隘地施工などの点で優れた特長を有する構造である。その開発コンセプトと構造仕様について解説するとともに、実大載荷試験による耐荷性能や疲労耐久性の検証と、実橋に適用した際の設計、施工の事例を述べた。

Abstract

Steel deck slab bridge using square tube is proposed for short span bridge market less than 15 m. The bridge consists of rolled steel square tubes as main members. The excellent features of the bridge are its lightweight, shallow depth, easy fabrication and short term erection. This paper describes the concept of the bridge and its structure. Load bearing capacity and fatigue resistance of the bridge are confirmed by actual size loading test. An example of design, fabrication and erection of the bridge is also described.

1. 緒 言

近年、橋梁分野では、戦後から高度成長期にかけて数多く建設されてきた橋梁構造物の経年の進行にともなって、維持管理の重要性が認識されるようになってきた。将来における道路橋資産の維持更新にかかる負担の平準化および低減を図る検討が始められている。このような背景から、今後更新、あるいは新設する橋梁については、低コスト、省力化、工期短縮など、従来以上に多様な性能が要求されるようになってきている。わが国の橋の現況調査¹⁾によると、数の上では支間15m以下の小規模橋梁が54万橋で全体の約80%と圧倒的な大部分を占めており、技術的には小規模橋梁の合理的な更新技術、低コスト化、長寿命化などの技術開発が強く求められることになる。

このようなニーズに応えるために、支間が15m程度以下の小支間に適用する新しい橋梁構造として、図1に示す角形鋼管を用いた床版橋を提案している。本床版橋は角形鋼管を敷き並べて横方向に一定の間隔で鋼管を差し込み、格点部にコンクリートを部分的に充填することで全体を一体化する構造となっている。すなわち、本体構造の組立に、耐久性の上で問題となり易い溶接、およびボルトを用いないことが最大の特徴となっており、角形鋼管に桁と床版の役割を兼用させることで桁高を低く抑え、なおかつ形鋼利用によるコスト削減、構造の簡素化による工期短縮などを狙ったものである。

2. 角太橋®(角形鋼管床版橋)の概要

角形鋼管床版橋の開発にあたっては、橋長16m(支間長15m)以内



図1 角形鋼管を用いた床版橋
Steel deck slab bridge using square tube

の短支間橋梁を対象に、迅速に架け替えに対応できるとともに、経済性に優れ、長寿命で耐久性の高い構造とすることを目標とした。その手段として、工場製品である冷間成型角形鋼管を使用し、主要部材の組み立てに溶接やボルト接合を使用しない構造形式とすること、そして工場製作や現場架設が容易で短時間で施工できることを開発コンセプトとした。角形鋼管は、その製造方法として、主にプレス成形とロール成形の2種類があり、製造コストの関係から、小型(概ね□550×550mm以下)のものはロール成形角形鋼管、大型のものはプレス成形角形鋼管と使い分けられている。

^{*(1)} 建材開発技術部 橋梁開発技術グループ マネジャー 工博
東京都千代田区大手町2-6-3 〒100-8071 TEL:(03)3275-7719

^{*(2)} 建材開発技術部 土木加工建材技術グループ グループリーダー 工修

^{*(3)} 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主任研究員 工博

表1 角形鋼管の規格
Specifications of steel square tube

種類 の 記号	化学成分(%)						機械的性質			
	C	Si	Mn	P	S	N	降伏点又は耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び	
									試験片	伸び(%)
BCR295	0.20以下	0.35以下	1.40以下	0.030以下	0.015以下	0.006以下	295以上	400以上 550以下	5号	23以上
STKR400	0.25以下	-	-	0.040以下	0.040以下	-	245以上	400以上	5号	23以上
STKR490	0.18以下	0.55以下	1.50以下	0.040以下	0.040以下	-	325以上	490以上	5号	23以上
BC-SMA400AW	0.18以下	0.15～0.65	1.25以下	0.035以下	0.035以下		245以上	400以上	5号	23以上

BC-SMA400AW はJIS G 3114 の溶接構造用耐候性鋼熱間圧延鋼材SMA400AW成分(上記の他にCu 0.30-0.50, Cr 0.45-0.75, Ni 0.05-0.30 を含む)を満たし、かつ、JIS G 3466 一般構造用角形鋼管STKR400 の機械的性質を満たす耐候性鋼角形鋼管の略号を示す。

提案する床版橋では、使用サイズと経済性からロール成形による角形鋼管を用いることになる。角形鋼管の材質は、表1に示すBCR295(国土交通大臣認定MSTL-9021)またはJIS G 3466に規定される一般構造用角形鋼管、または、角太橋用に新たに開発した耐候性鋼角形鋼管(BC-SMA400AW)の中から適宜用途や使用条件に応じて選定するものとした。提案する角形鋼管床版橋は、以下のような特長を有するものである。

1) 桁高が抑えられる

角形鋼管の剛性が大きく、かつ250～550mm程度の中空断面の角形鋼管を用いるので軽量であり、一般の鋼橋やPC橋と比べて桁高を低く抑えることができる。

2) 死荷重が軽減できる

主桁と床版を一体化した構造となっており、中空の角形鋼管を用いるため、死荷重が軽減できる。

3) 急速施工が可能

現場での溶接接合、ボルト接合がなく、プレハブ化した床版橋パネルを簡易な継手構造で接合するため、急速施工が可能になる。また、床版橋パネル自体が高い剛性を有しているため、床版橋パネルを架設した直後から建設重機の通行も可能となる。

4) 狭隘地施工が可能

現場での地組作業が不要であり、少ない作業スペースでの架設工事が可能である。さらに一パネルあたりの重量が軽量であり、小型のクレーンでの架設が可能であり、重機設置スペースを最小化可能である。また、分割施工も可能なため、架け替えの場合においても車両の全面通行止めをする必要がないといった特長がある。

3. 角形鋼管床版橋の性能確認試験

3.1 角形鋼管床版橋の耐荷性能

角形鋼管床版橋の耐荷性能を確認するため、実大載荷試験を行った。試験体図を図2に示す。支間を15m、幅方向は角形鋼管を5本連結した2mの試験体を用意した。横繋ぎ用の鋼管は3mピッチに配置した。試験体の材質は、角形鋼管がSTKR400(□400×400×12mm)、鋼管がSTK400(φ216.3mm径、5.8mm厚)、コンクリートは設計基準強度24MPaのものをを用いた。また、載荷面は、道路橋示方書の輪荷重を載荷することとしたが、最も厳しい条件となるように、中央の角形鋼管1個の上のみ荷重が載るように200mm×400mmの載荷板を用いた。なお、試験体の上面にはアスファルト舗装(下層:グースアスファルト40mm+上層:密粒度アスファルト40mm)を施した。

試験状況を図3に示す。また、試験の結果得られた、載荷荷重と

角形鋼管のたわみの関係を図4に示す。最初、たわみ、ならびに角形鋼管のひずみは線形に増加していく。公称の降伏荷重に相当する569kNまで弾性挙動を示し、その後、載荷荷重が600kNを超えたあたりから載荷点直下の角形鋼管下フランジ面のひずみに非線形性が現れ始めた。同時に、載荷点直下の角形鋼管以外の角形鋼管のひずみも増加する傾向を示した。これは、他の角形鋼管も横繋ぎ部分で

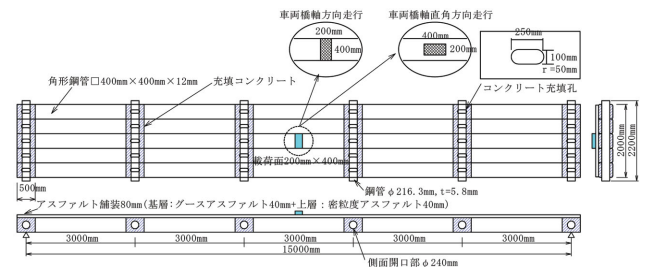


図2 実大載荷試験の供試体
Actual size specimen for loading test



図3 実大載荷試験の状況
Loading test condition

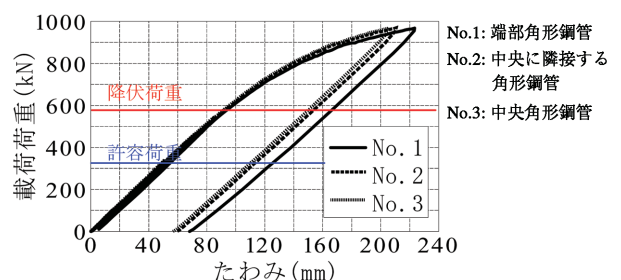


図4 実大載荷試験の荷重変位関係
Load displacement relationship

横分配荷重が載荷され、曲げモーメントが増加していているためであると考えられる。したがって、載荷点直下の角形鋼管が降伏した後も、一部の角形鋼管だけの塑性化が進行していくのではなく、全体として高い耐力力を発揮していることがわかる。また、実験で確認された角形鋼管床版橋の最大耐力は、設計荷重を3倍近く上回り、公称の降伏荷重をも1.63倍上回っており、十分な強度を有していることを確認した。

また、荷重分担率のまとめを表2の試験結果欄に示す。ここで、荷重分担率とは、各角形鋼管が分担している荷重の割合を示すものであり、(着目する角形鋼管のひずみ)/(すべての角形鋼管のひずみを足し合わせた値)で求められる。本試験の結果、支間長に関係なく、荷重分担率の最大はほぼ0.25程度と一定であった。以前に実施した載荷試験(300mm角の角形鋼管5本連結、支間3.6m、横つなぎ間隔1.2m)においても、幅方向中央載荷の場合における荷重分担率の最大は0.25という数字が得られている²⁻⁴⁾。横つなぎ間隔を3mとしても各角形鋼管の荷重分担率は従前の試験から特に大きな変化を示さず、横つなぎ間隔を3mとしても十分な荷重分配性能が確保できることを確認した。

さらに、載荷試験における試験体の荷重分配性能、ならびに耐荷機構の確認を行うため、試験結果をシミュレートする線形弾性FEM解析を行った。使用した解析コードは汎用構造解析プログラム(MARC20038)である。解析モデルは、試験体の構造の対称性を考慮して1/4モデルで解析を行った。境界条件は、支間15.0mとして支承位置で線支持し、橋軸方向、ならびに橋軸直角方向の境界面は幾何学的対称条件を満足するように境界条件を与えた。荷重は、試験体中央部に幅400mm×長さ200mmの範囲に均等に面載荷が行えるよう、変位制御により載荷することとした。構造要素は、角形鋼管と横つなぎ用の鋼管はシェル要素で、コンクリートはソリッド要素でモデル化し、鋼材とコンクリートの界面は節点を共有し、完全合成とした。

荷重分配に影響する角形鋼管同士の接触面のモデル化として、角形鋼管同士の接触を考慮しないモデル、角形鋼管同士の接触面の摩擦を考慮したモデル、角形鋼管同士の接触面を固着したモデル、の3種類のモデルで解析を行い、表2に示すように試験結果との比較を行った。角形鋼管同士の接触面を固着したType-モデルが最も近い結果を与えており、さらに条件を種々変えて解析を行っ

表2 荷重分担率のまとめ(試験結果と解析結果)
Load distribution factor of experiment or analysis

	荷重 (kN)	橋軸方向ひずみ(μ)		
		No. 1	No. 2	No. 3
試験結果	340	630 (0.241)	526 (0.201)	466 (0.179)
Type-1	340	732 (0.277)	486 (0.184)	470 (0.178)
Type-2	340	692 (0.275)	455 (0.181)	455 (0.181)
Type-3	340	573 (0.226)	530 (0.209)	453 (0.178)

() 内の数値はひずみから計算した荷重分担率を表す

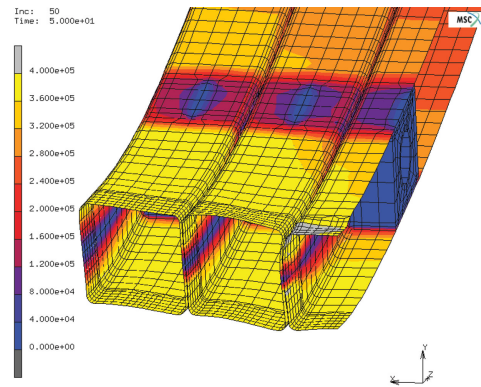


図5 最大荷重時の支間中央断面の変形状態と相当応力のコンター図
Counter map of stresses at the mid span at a maximum loading

た結果⁵⁾、弾性範囲内において角形鋼管の接触面を固着するモデル化が妥当であり、荷重分配性能を精度よく評価できることが確認できた。

図5に、支間中央断面の角形鋼管の変形状態と相当応力のコンター図を示す。本解析結果では、荷重が載荷された中央の角形鋼管が大きく変形し、それにつられて隣接する角形鋼管にもねじれ変形が起きており、この変形状態からも荷重分配の様子がわかる。試験体の変形状態も、中央の角形鋼管が大きく変形し、それに伴って隣接する角形鋼管も変形しており、Type- の変形状態に近いことが確認された。

3.2 現場接合部載荷試験

図6に示すように、角形鋼管を複数本接合したパネルを工場にて製作し、架設現場にて接合用の角形鋼管を介してパネル同士を接合する方法を提案している。まず、角形鋼管を複数本連結したパネルを工場製作して現地に輸送する。最初のパネルを所定の位置に架設し、パネルから突出している横つなぎ用鋼管に、側面に開口部を設けた接合用角形鋼管を差し込む。さらに、接合用角形鋼管の側面の開口部に、隣接するパネルから突出する横つなぎ用鋼管を差しこみ、設置する。この手順を所定の幅員になるまで繰り返す。パネルの設置が終了した後、接合用角形鋼管の格点部にコンクリートを充填して全体を一体化する。

図7に示す角形鋼管床版橋の現場接合部の強度を明らかにすることを目的として、橋軸直角方向に切断した形態の現場接合部のみを取り出し、載荷試験を実施した。試験の結果、以下の知見が得られた⁶⁾。

- (1) 継手部を切り出して曲げせん断載荷を行った結果、提案した構造は継手構造として有効であり、この構造を適用することで、接合部に十分な耐力が確保できることを確認した。
- (2) 鋼管端部にフランジ板を取り付けることにより、アンカー効果

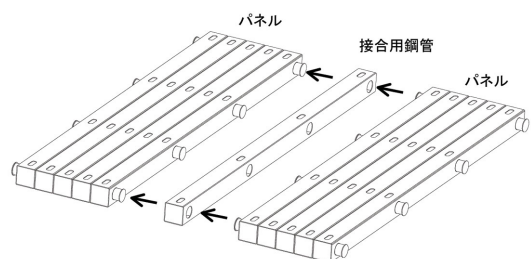


図6 現場接合部の施工概念図
Field joint procedure on site

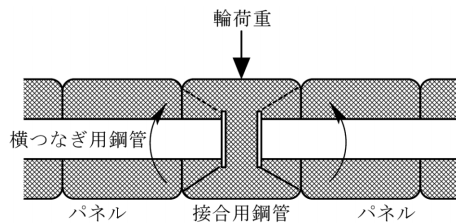


図7 現場接合部の構造
Structural detail of field joint part

が発揮され、コンクリートの不連続面となる角形鋼管同士の界面に圧縮力が作用し、接合部は曲げに対し、(鋼管+圧縮側コンクリート)で評価した断面に近い挙動を示すことが確認された。

- (3) 横つなぎ用鋼管に作用するせん断力を計測した結果、せん断力の集中心となる角形鋼管同士の界面位置で横つなぎ用鋼管に発生するせん断ひずみは、横つなぎ用鋼管のみを有効として計算されるひずみの値に弾性範囲でよく一致した。このことから、せん断力に対しては、横つなぎ用鋼管のみで負担するという設計がほぼ妥当であることが確認できた。

以上の検討の結果、提案する現場接合構造は十分な強度を有し、パネル間の接合構造として十分実用的であり、せん断力に対して設計計算を行うことが可能であることを確認した。

3.3 斜角付き角形鋼管床版橋の検討

実際の橋梁においては、道路線形と交差物との制約から斜角を有する物件が多い。斜角を有する橋の場合、支点反力が不均一になることや、荷重分配の傾向が直橋の場合と異なることが従来から知られている。提案する床版橋が斜角を有する場合の荷重分配性能、ならびに耐力を実験的に検証するため、図8に示す60°の斜角を有する試験体を製作し、載荷試験を実施した⁷⁾。

(1) 支点反力

支点反力の分布は幅員方向に不均等になるが、使用性や耐力上の問題となるようなレベルではなく実用的に可能である。

- (2) 荷重分配作用については、角形鋼管の軸に直角な方向への荷重分散が確認され、角形鋼管1本あたりの荷重分担率は25%と幅員方向にほぼ均等化されており、直橋の場合とほぼ同じ値を示した。斜橋の場合でも十分な荷重分配性能を有することを確認した。

(3) 耐力および変形性能

載荷試験の結果得られた最大荷重は、材料強度のミルシート値で評価した降伏荷重の1.4倍を記録し、実用上最小と考えられる60°の斜角を有する場合でも試験体は十分な耐力を有することを確認した。

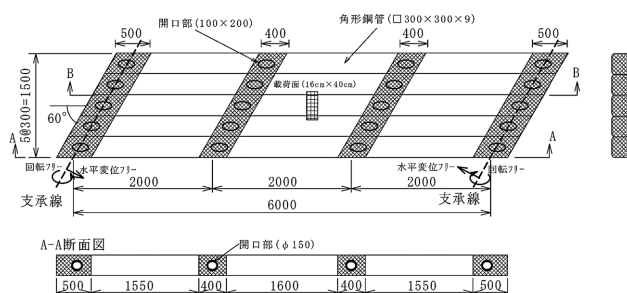


図8 斜角を有する試験体
Skewed specimen

3.4 角形鋼管床版橋の疲労試験

提案する床版橋は、応力集中や疲労破壊の原因となる溶接接合やボルト継手を使うことなしに主要構造を構成するため、基本的には疲労に対して強い構造であると考えられる。しかしながら、スパンの短い床版橋では、死荷重成分が相対的に小さくなり、その分、変動応力となる活荷重による応力振幅が大きくなるため、提案する角形鋼管を用いた床版橋の疲労耐久性を確認するため、実大の試験体を用いた定点載荷の疲労試験を行った。図9に示すように、試験体は、角形鋼管 $\square 400 \times 400 \times 12\text{mm}$ を5本並べ、3mピッチで鋼管 $\phi 216.3\text{mm}$ 径 $\times 5.8\text{mm}$ 厚を挿入し、格点部にコンクリートを充填して横つなぎしたものを用い、支間6mで単純支持した。なお、実際の橋梁では架設のために吊ビースを取り付ける必要があるため、試験体でも吊ビースが疲労強度に与える影響を確認するため、吊ビースを支間中央部の外側の角形鋼管の側面に溶接で取り付けた後、これを撤去し、グラインダで平滑に仕上げた。

輪荷重は、ダブルタイヤのタンデム軸を有する大型車を想定し、設計荷重における1輪相当、すなわちタイヤ位置に相当する4面で載荷することを想定し、荷重の中心が試験体の中心にくるように配置した。

提案する床版橋では、主要構造部材の接合に溶接を用いないため、疲労に対して強いと考えられるが、これらは実証されている訳ではないので、試験的な検証が必要である。提案する床版橋では、疲労強度上の課題として、角形鋼管の素材、ならびにコンクリートを用いた接合構造などを含め、以下のような疲労試験の着目点を設けた。

角形鋼管の冷間成形コーナー部

冷間整形角形鋼管製造時の縦シーム溶接部

格点部付近の角形鋼管開口部

格点部コンクリートの耐久性

吊りビース撤去部

載荷荷重は、道路橋示方書のB活荷重で試算すると、活荷重載荷により角形鋼管に発生する応力は最大で 100N/mm^2 程度である。したがって、本試験では支間中央部下フランジ面での応力振幅が 100N/mm^2 程度となるように1000kNを200万回繰返し載荷するものとした。試験の結果、得られた知見を以下にまとめる⁸⁾。

- (1) 200万回の繰返し載荷中、試験体に異常は見られず、 100N/mm^2 程度の応力振幅では提案する床版橋は疲労破壊しないことを確



図9 疲労試験の実施状況
Fatigue test set up

認した。この応力振幅と繰返し回数は、JSSC疲労設計曲線のD等級をクリアするレベルである。

(2)また、先に述べた疲労試験の着目部(～)のいずれにおいても疲労損傷は見られず、疲労強度上の弱点となることはなかった。

4. 角太橋の設計と施工

本床版橋の製作にあたっては、複数本の角形鋼管を接合した床版橋パネル、ならびに所定の位置に孔あけ加工を施した接合用角形鋼管を工場で作成する。図10に示すように、床版橋本体を工場であらかじめプレハブパネルとすることで、架設現場での省力化、工期短縮が可能となる。これらの床版パネル、接合用角形鋼管を現地に輸送して、床版橋パネルをクレーンで所定の位置に架設する。その後、床版パネルの側面から突出している横つなぎ用鋼管に接合用角形鋼管を嵌め合わせる。以降、所定の幅員になるまで床版橋パネル架設と接合用鋼管架設を繰り返す。床版橋の架設が終了したら、接合用角形鋼管の格点部にコンクリートを充填する。その後、地覆、高欄を設置し、最後に橋面舗装を行えば完了である。

一例として小沢田橋⁹⁾の設計条件を表3に示す。設計は、基本的に道路橋示方書に従うこととし、許容応力度法により行った。しかしながら、新形式の橋梁であるため、一部道路橋示方書に規定のない項目がある。このような部分については、試験結果などを参考に仕様を決定した。



図10 角形鋼管を接合した床版橋パネル
Panel members composed of steel square tubes

表3 小沢田橋の設計条件
Design specification of Kosawada bridge

橋種	道路橋
橋長(桁長)	8.55m(8.5m)
支間長	8.0m
全幅員 (有効幅員)	6.2m (5.0m)
斜角	左 85° 0° 0°
活荷重	A 活荷重
雪荷重	1kN/m ²
舗装	アスファルト舗装 7cm
横断勾配	2%直線振分け
縦断勾配	1%放物線
平面線形	R = ∞
適用基準	道路橋示方書(2002.3)



図11 小沢田橋の完成写真(下面より)
Completed Kosawada bridge

小沢田橋の施工においては、輸送制限の関係から、橋梁全体を3つのパネルとこれらをつなぐ2本の接続用角形鋼管に分割して施工した。架設地点は民家の密集している地域であるため、架設のためのヤードが取れない状況であった。また、架設地点付近は電線が錯綜しており、作業高さの制限も厳しい中での施工となった。このため、製作工場より床版橋パネルをトラックにより1枚ずつピストン輸送し、ラフタークレーン(吊能力25トン)にて現地でトラックから架設位置へ直接架設する方法を取った。パネル1枚の重量は、最大で約8.5トンであった。

施工の結果、架設作業に大きな支障は無く、狭隘値、空頭制限などの制約下でも問題なく架設できることを確認した。1パネルあたりの架設時間は15～20分程度であり、パネルの設置工事は1日で完了することが出来た。また、施工精度については道路橋示方書の部材の製作精度を基に寸法許容差を設定したが、架設後の寸法検査では施工精度についても問題はないことを確認した。

小沢田橋の完成写真を図11に示す。本橋の桁高と支間との比は約1/23であり、支間8m程度のA活荷重橋で一般的なPC橋の桁高比1/20、H形鋼橋梁の桁高比約1/13に比べて非常にスレンダーである。また、平方メートルあたりの桁本体の重量も、PC橋の約0.9t/m²に比べて約0.56t/m²と、6割程度にまで削減できた。

5. 結 言

本稿に示したように、角鋼管床版橋の開発、適用に向けては各種の検討を行って、設計、施工を実施した。その結果、架け替え橋梁として求められる、軽量化、低桁高化、省力化、短工期、狭隘地施工などの所期の目的を達したと評価できる。また、実施工への適用により、適用上の貴重なデータを蓄積することができた。角形鋼管床版橋の有する特徴は、架け替え橋梁のみならず、新設橋梁においても効果的なものであると考えられる。今後、本構造を広めていくために、施工実績を積み重ねて、各種条件に適合した改良を加えていくことにより、本構造の信頼性を高め、短支間橋梁の分野で社会資本の維持、更新に寄与していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 全国道路利用者会議:道路統計年報 2004年版 2004.12
- 2) 高木 後藤 木村 佐藤 山田:角形鋼管を用いた床版橋の載荷試験(その1角形鋼管の荷重分担に関する試験)土木学会第58回年次学術講演会講演概要集 J-146, 2003.9 p.291-292
- 3) 後藤 高木 木村 佐藤 山田:角形鋼管を用いた床版橋の載荷試験(その2 舗装

付き角鋼管床版橋の挙動に関する試験) 土木学会第58回年次学術講演会講演概要集 J-147 2003.9 p.293-294

- 4) 高木 後藤 木村:角形鋼管を用いた床版橋の実大載荷試験 土木学会第59 回年次学術講演会講演概要集 J-477 2004.9 p.951-952
- 5) 高木優任 本間宏二 後藤信弘:角形鋼管を用いた床版橋の耐荷性能に関する実験的研究 鋼構造論文集 12(47) 11-22(2005.9)
- 6) 高木優任 本間宏二 後藤信弘:角形鋼管を用いた床版橋の現場接合構造に関する

る実験的検討 鋼構造年次論文報告集 14 (2006.11)

- 7) 高木優任 本間宏二 後藤信弘:斜角を有する角形鋼管を用いた床版橋の載荷試験 構造工学論文集 53A (2007.3)
- 8) 高木優任 本間宏二:角形鋼管を用いた床版橋の定点載荷疲労試験 鋼構造年次論文報告集 13 119-126(2005.11)
- 9) 高木優任 上醉尾義明 篠原義則 古木善直 川村修 荻野謙一:小沢田橋の設計・施工 - 角形鋼管を用いた新形式床版橋 - 橋梁と基礎 39(9) 14-21(2005.9)