

斜角を有する角形鋼管を用いた床版橋の載荷試験

Loading test on the skewed slab bridge composed of steel square tubes

高木優任* 本間宏二** 後藤信弘***
Masahide TAKAGI Koji HOMMA Nobuhiro GOTO

*博士(工学) 新日本製鐵株 鋼構造研究開発センター 主任研究員 (〒293-8511 千葉県富津市新富 20-1)

**博士(工学) 新日本製鐵株 建材開発技術部 マネジャー (〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)

***工修 新日本製鐵株 建材開発技術部 グループリーダー (〒100-8071 東京都千代田区大手町 2-6-3)

Making the construction procedures of short span bridges more rational and economical, a new slab bridge system composed of steel square tubes was proposed. In the actual bridges, there are so many skewed bridges because of the site condition. So, applying the proposed bridge more widely, tests on skewed bridge were required. To clarify load transfer performance and ultimate strength of the skewed slab bridge composed of steel square tubes, loading test on the bridge structure with skew angles of 60° was conducted. Moreover, to make clear the difference between the skewed bridge and the straight bridge, FEM Analysis was also conducted. As the results of these investigations, it is confirmed that the skewed slab bridge composed of steel square tubes has sufficient strength and load transfer performance.

Key Words: Slab bridge, Steel square tube, Skew bridge

キーワード: 床版橋, 角形鋼管, 斜橋

1. はじめに

近年、わが国の橋梁分野では、社会経済活動を支える重要な社会資本の一つである橋梁ストックの増大とその経年の進行に伴い、将来的な維持管理の負担の増加が懸念されている。このため、これまでに蓄積され、またこれから建設していく橋梁をいかに効率的、かつ効果的に維持管理していくのかという、いわゆるアセットマネジメントへの関心が高まってきている。維持管理の手段としては、架け替えと言う選択肢もあると考えられるが、橋梁の効果的かつ効率的な維持管理のためには、社会経済活動へ与える影響を最小限に抑える必要がある。架け替えが選択肢の一つとなり得るためには、社会的損失を最小限とするため、橋梁構造にはこれまで以上に経済化、省力化、急速施工など多様な性能が求められることになる。

このような背景のもと、筆者らは、主として支間 15m 以下の小支間橋梁建設の経済化、合理化、工期短縮などを目的として、工場製品である角形鋼管を主部材とした床版橋(図-1)を開発し、実橋に適用している¹⁾。本床版橋は、幅員方向への荷重分散を図るため、角形鋼管の側面に開口部を設け、この開口部に鋼管を差し込み、こ

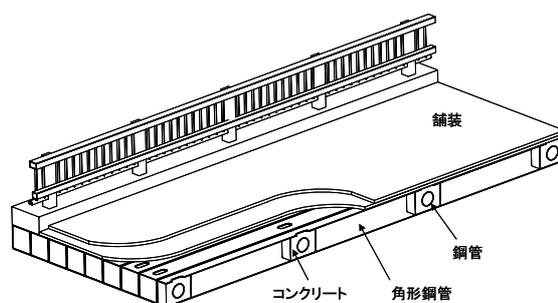


図-1 角形鋼管を用いた床版橋

の部分の角形鋼管の内部にコンクリートを充填することによって固定し、全体の一体化を図っている。本床版橋については、これまでに直橋を対象として荷重分配性能、耐力などの検討を実施してきている²⁾。しかしながら、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³⁾。また、提案する床版橋を斜橋に適用しようとした場合、その構造は、所定の本数を一体化した角形鋼管の端部を斜角なりに切断して対処することとなる。それに加え、本床版橋の設

計においては、角形鋼管 1 本あたりの荷重分担を考慮しているが、斜角を有する場合について、荷重分配性能が直橋の場合と異なるのかどうかを実験的に検証しておく必要があると考えられる。

本文は、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に実施した試験について述べ、FEM 解析により直橋と斜橋の違いを考察したので、その結果を報告するものである。

2. 試験体

試験体の形状、ならびに寸法を図-2に示す。本試験の狙いは、斜角を有する床版橋の荷重分配性能、ならびに強度を確認することである。一般に、斜角がきつく(角度が小さく)なるにしたがって、直橋との差異が大きくなることが指摘されている。そのため、試験体の斜角は現実的に適用する値の最小として 60° を想定した。

主部材である角形鋼管は $\square 300 \times 300 \times 9\text{mm}$ を用い、5本を敷き並べ、側面に $\phi 150\text{mm}$ の開口部を設け、 $\phi 114.3\text{mm}$ の鋼管を挿入し、格点部分にコンクリートを充填して全体を一体化し、幅 1500mm とした。試験体の支間は 6.0m とし、横つなぎ部材の間隔は 2m とした。

提案する床版橋では、架設現場での工期短縮を図るため、輸送可能な幅(道路輸送の場合一般に 2m 強程度)分の床版橋をパネルとして工場で作成して現地に輸送し、接合用角形鋼管を介してパネルを現場継手により接合することを標準としている。したがって、実際の橋梁ではほとんどの場合で現場継手が存在することになる。本試験では、実際の構造物での挙動に近くなるよう、また、現場継手部の影響を確認することを目的として、横つなぎ鋼管の現場継手を試験体の幅員方向中央に設置した。

現場継手の施工手順を図-3に示す。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。横つなぎ用鋼管の現場継手の構造は、図-4に示すよう

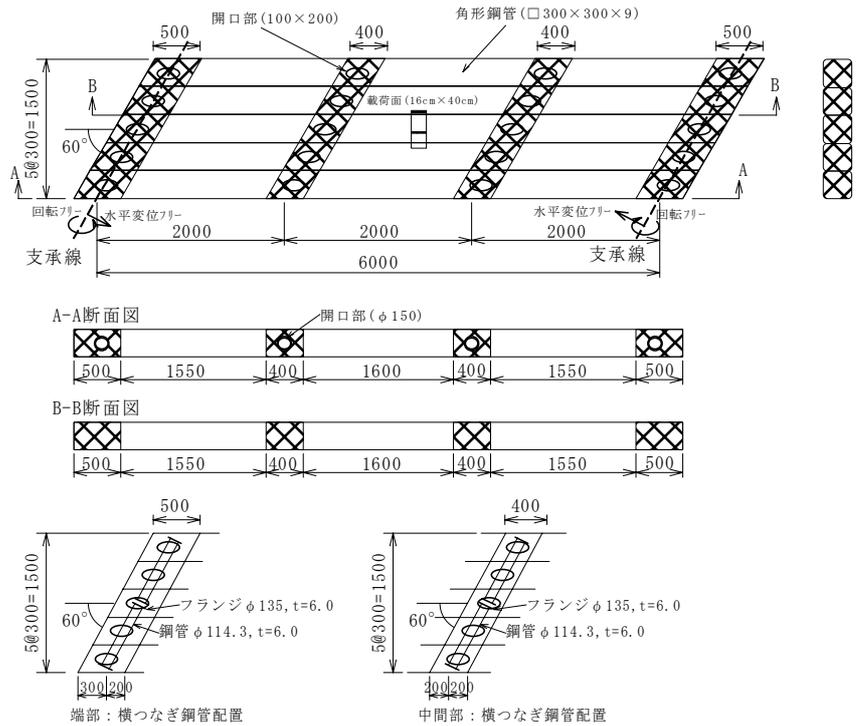


図-2 試験体(単位:mm)

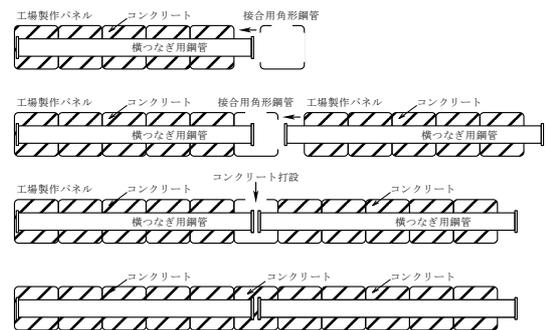


図-3 現場接合部の施工手順

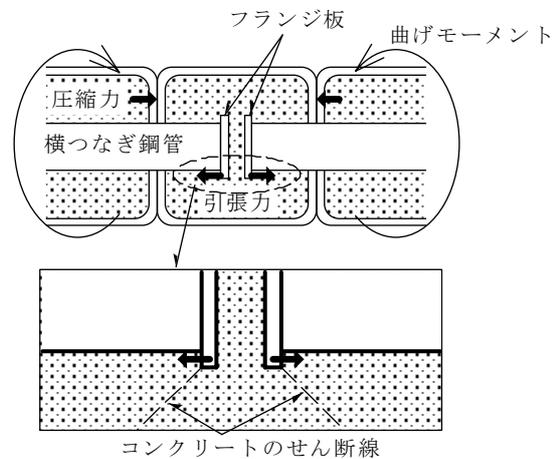


図-4 現場継手部の構造イメージ

に、横つなぎ用鋼管の端部にフランジ板を取り付け、これをコンクリート中に埋め込むことによって、フランジ板がコンクリート中で引き抜きに対するアンカーとなり、荷重を伝達するというものである⁴⁾。

また、斜橋における横つなぎ部材の配置方法としては、①橋軸方向に直角に配置する方法、②支承線に平行に配置する方法、の2通りが考えられる。これらは通常の橋梁では、橋種、斜角の程度などにより使い分けられている。しかし、提案する床版橋では、図-5に示すように、現場での施工の便を考え、横つなぎ部材の差込が容易になるよう、横つなぎ部材を斜角なりに斜めに配置する方法を採用することにした。

試験で使用した材料の概要を表-1に示す。材料試験、あるいはミルシートにより確認した材料の強度を表中に示したが、使用した材料はすべて所定の規格を満足するものであった。

3. 試験方法

斜角を有する橋の場合、支点反力の分布が幅員方向に不均等となり、幅方向端部で支点の浮き上がりが生じる可能性がある。したがって、設計上はこれに対処することが必要となるので、斜橋における支点反力の分布は設計上重要な情報である。

このため、本試験では、支点反力の分布を正確に計測することを目的として、以下の2つのステップに分けて試験を行うこととした。

Step1(弾性載荷試験)：片側の支点下に反力計(ロードセル)を組み込んで弾性範囲で載荷する

Step2(破壊試験)：Step1の反力計を撤去し、線支持のローラー支承に取り替えて破壊に至るまで載荷する

Step1は、支点反力、ならびに角形鋼管の荷重分配を詳細に調査することを目的として設定し、Step-2は終局時の挙動を確認するために設定したものである。

試験体は、図-2中に破線で示した支承線位置にて線支持し、支承線に直角な方向の水平変位、および支承線

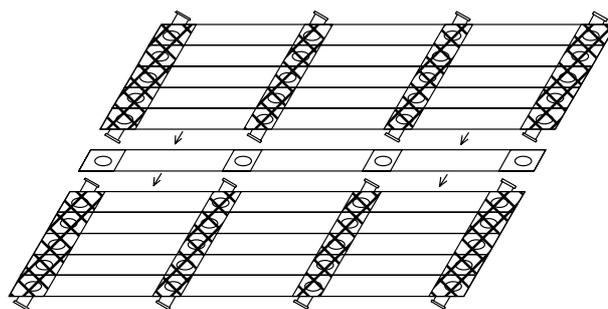


図-5 斜橋の施工

まわりの回転が自由となるようにした。

荷重は、図-2に示すように、道路橋示方書⁵⁾に示されている輪荷重に相当する面荷重を試験体の中央に載荷するものとした。しかしながら、試験体の角形鋼管のサイズが300mm角と比較的小さいため、規定の面積の輪荷重を載荷すると比較的広範囲に載荷されることになる。そこで、今回は安全側の試験となるように、道路橋示方書に示されている輪荷重のサイズ(20cm×50cm)から20%縮小し、荷重の載荷範囲を16cm×40cmとした。

また、試験体の支持部の不陸を吸収するため、支点部には厚さ10mmの硬質ゴム板(硬度65度)を挿入した。なお、斜角の小さい場合は死荷重反力の分布が均等にならないことが指摘³⁾されているが、不均等の程度が不明であるため、ここでは、死荷重による浮き上がりの抑制効果を確認することを目的として、弾性載荷試験については、死荷重による反力が各角形鋼管の支点でほぼ均等になるように、試験体と支承の間に0.3~1.2mm程度の薄板を各角形鋼管の支承面へ挿入することで支点の高さ調整を行った。なお、今回は試験であるため、支点反力の変化を詳細に確認するために反力の調整を行ったが、実際の構造では浮き上がりに対しては何らかの浮上り対策を施すことを考えるため、詳細な高さ調整は行わないことを付記しておく。

表-1 使用材料の概要

鋼材								
種類	材質	サイズ	降伏点 (N/mm ²)		引張強さ (N/mm ²)		伸び (%)	
			ミルシート	規格値	ミルシート	規格値	ミルシート	規格値
角形鋼管	BCR295	□300×300 ×9mm	386	295 ≤	488	400-500	40	23 ≤
横つなぎ用 鋼管	STK400	φ114.3 t=6.0mm	393	235 ≤	414	400 ≤	40	21 ≤
コンクリート								
種類	呼び強度	スランプ		Gmax	圧縮強度			
		指定	実測		7日強度	28日強度		
普通	21.0N/mm ²	12.0 ± 2.5cm	11.0cm	25mm	19.0 N/mm ²	25.6 N/mm ²		

4. 試験結果

4.1 弾性載荷試験

4.1.1 支点反力の測定結果

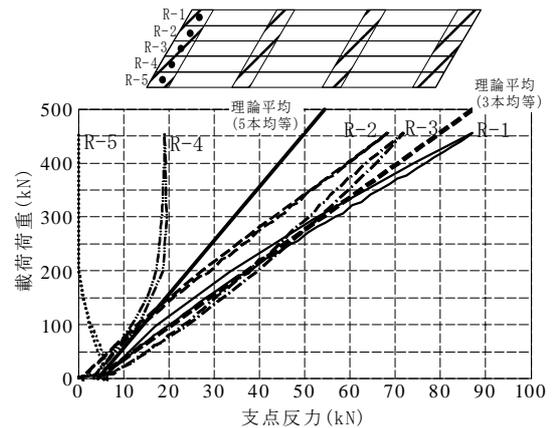
支点反力の測定結果を図-6に示す。図中には、各支点での荷重分担が均等であると仮定して計算した支点反力と、5本のうち3本だけが有効であるとした場合の反力の計算値を示した。図-6より、試験体の死荷重により、最初は4.3kN程度の反力が発生(製作精度に起因する試験体と支点との密着性の違いにより若干のバラツキが生じている)している。載荷により、鋭角側の角形鋼管の支点反力(R-5)は、荷重の増加と共に減少していき、載荷荷重200kN程度で0となり、浮き上がってしまったことがわかる。鋭角側の2本目の角形鋼管の支点反力(R-4)は、最初、荷重の増加と共に増加していくが、R-5の反力が0となる200kN以降はほぼ20kNから変化しなくなった。中央側の角形鋼管の支点反力(R-2, R-3)はほぼ同様の傾向を示し、角形鋼管3本を有効とした場合の反力よりも若干小さい値を示した。鈍角側の角形鋼管の反力(R-1)の増分はR-2, R-3よりも大きく、鈍角側の端部への反力の集中が見られる。

4.1.2 荷重分配性能

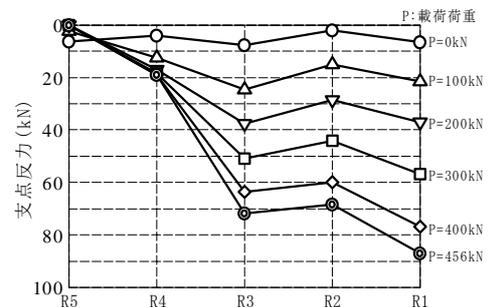
支間中央付近の断面における角形鋼管の下フランジ部の幅方向中央での軸方向ひずみの測定結果を図-7に、ひずみ分布から計算した荷重分配のまとめを表-2に示す。表-2では、角形鋼管のひずみは、計測したデータのうち、載荷点付近の断面を対象とし、載荷面から支承線に平行な方向に断面を取った断面1と、載荷面から直角な方向に断面を取った断面2の2つの断面について示している。

図-7より、支間中央部よりも載荷点から角形鋼管の軸に直角な方向に取った断面(断面2)で角形鋼管のひずみが大きく現れていることがわかる。仮に、角形鋼管の側面での横方向への荷重分散がなされないで横つなぎ部だけで荷重分配がなされるとすれば、荷重が載っていない端部の角形鋼管は、格点部にだけ荷重が載荷されるため断面1と断面2が含まれる区間では等曲げとなり、軸方向のひずみの値は同じになるはずである。しかし、このデータによれば断面1と断面2でひずみが異なるから、角形鋼管同士の突合せ面で横方向への荷重分配がなされていると見ることができる。

表-2より、角形鋼管の軸に直角な方向の断面(断面2)で荷重分担率を計算すると、幅方向中央部の角形鋼管1本の荷重分担率(着目する部分のひずみ/断面全体のひずみの総和で計算)は



(a) 各反力の挙動



(b) 各反力の分布

図-6 支点反力

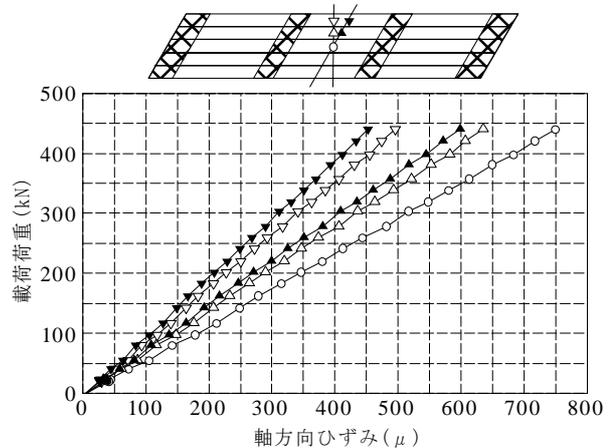


図-7 角形鋼管の下フランジ部ひずみ挙動

表-2 下フランジ部ひずみ分布(440kN 載荷時)

角形鋼管	a	b	c	d	e
断面1	453 μ (0.159)	598 μ (0.210)	750 μ (0.263)	592 μ (0.208)	459 μ (0.161)
断面2	496 μ (0.165)	636 μ (0.211)	750 μ (0.249)	—	—

* ()内は荷重分担率を表す





写真-1 載荷状況

約0.25となり、直橋の場合の試験結果²⁾とほぼ同じ結果となった。このことから、斜角を有する場合でも、荷重分散が十分に行われていることがわかる。

なお、本試験結果には、角形鋼管同士の接触面の状態が大きく影響するものと考えられる。試験体の製作にあたっては、角形鋼管の側面は黒皮のままとし、軽く表面の汚れや錆を落とした状態で組み立てを行った。また、幅の寸法精度を確保するため、鋼製のH形鋼を用いた枠(写真-4参照)を製作し、橋軸方向2箇所幅員方向に枠を組み立て、寸法出しを行った。枠による締め付けで、角形鋼管同士は隙間がなく、密着した状態であった。実際の施工においても、幅員方向の寸法精度を確保するため、このような製造方法を取ることになるので、今回の試験結果は実際の構造物とほぼ同じ条件であると言える。

4.2 破壊試験

4.2.1 全体挙動

載荷の様子を写真-1に、試験の結果得られた荷重-支間中央部断面でのたわみ関係を図-8に示す。

図-8より、載荷初期においては線形にたわみは増加していき、許容荷重(角形鋼管が許容応力となる荷重: 442kN)、ならびに材料強度の規格降伏応力度で評価した降伏荷重(752kN)で除荷した際も、いずれの荷重においてもほぼ線形の挙動を示した。載荷荷重が800kNを超えたあたりから荷重-たわみ関係に非線形性が生じ始めるが、塑性化の程度は小さく、材料強度のミルシート値で評価した降伏荷重である984kNを超えた約1100kNでも除荷してみたが、たわみは線形に減少した。その後、荷重を増していくとともに塑性化が進行し、荷重の増加に対してたわみが大きく増加していったが、荷重が1380kNとなったところで、載荷面近傍の角形鋼管の圧縮側に局部座屈が生じ、以降、荷重は徐々に低下し始めた。しかしながら、たわみの進行に対し荷重の低下は緩やかであり、全体としてじん性のある変形状を示した。試験の終了後、試験体を観察したが、載荷面下での角形鋼管のへこみ、

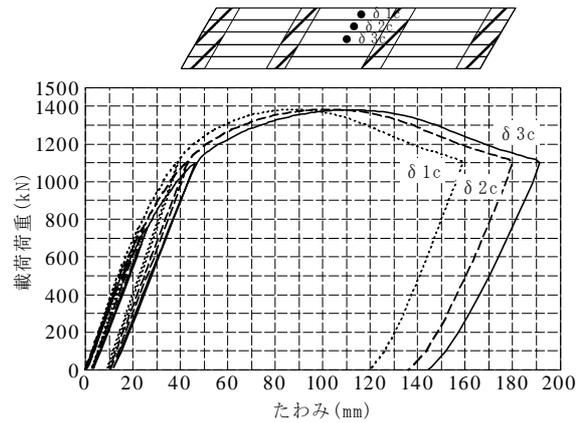


図-8 荷重-たわみ関係



写真-2 試験終了後(載荷点近傍)



写真-3 試験終了後の試験体

ならびにその横の角形鋼管の圧縮面の局部変形が目立った(写真-2)。

試験終了後の試験体の変形状態を写真-3に、試験終了後に載荷面で角形鋼管の軸に直角な方向の断面を切断した様子を写真-4に示す。写真-3より、破壊に至っても試験体はバラバラにはならず、全体が一体となり、構造物としての形状を保持していることがわかる。また、



写真-4 中央部断面の切断面
(載荷面の角形鋼管に直角な方向)

写真-4より、中央部3本の角形鋼管には荷重載荷による鉛直下方へのへこみ、側面への膨出変形が見られるが、最外縁の角形鋼管では、隣接する角形鋼管に側面から押されてへこみ、上面が上方へ飛び出す変形状態が確認できる。このように、終局状態においても床版橋全体が一体となって変形している様子がわかる。

表-3に試験時の最大荷重と各種計算荷重との比較を示す。各種荷重の計算では、1本の角形鋼管の荷重分担率を、過去の直橋の試験結果²⁾、ならびに先に述べた弾性載荷試験の結果から25%と仮定した。本試験での最大荷重は許容荷重の3.1倍、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、斜角を有していても十分な耐力を有することを確認した。

4.2.2 支点部の挙動

支点部の鉛直方向変位の測定結果を図-9に示す。ここで、測定のための変位計は支承線位置の角形鋼管上面に設置したもので、この変位には支承位置に敷いたゴム板の変形も含んでいることに注意が必要である。

鋭角側の $\delta 1s$ は、200kN程度までは変化せず、弾性載荷試験のところで観察されたように、死荷重により浮き上がりが抑えられている。しかし、載荷荷重が200kNを超えると、死荷重反力よりも大きな負の反力が生じ、浮き上がりが生じはじめていくことがわかる。 $\delta 2s$ も、弾性範囲での載荷と同様、載荷荷重が200kNとなったあたりで変位の進行はほぼ無くなるが、載荷荷重が1000kNを超え、支間中央部の角形鋼管が降伏し、最大荷重に近づくと上方への変位が生じはじめる、最大荷重時では浮き上がりに転じた。 $\delta 3s$ 、 $\delta 4s$ 、 $\delta 5s$ では、載荷荷重100kN以下での初期の支点上のゴムの沈み込みに伴う変位を除いて、最大荷重に至るまではほぼ線形の変位挙動を示した。また、 $\delta 3s$ 、 $\delta 4s$ 、 $\delta 5s$ では変位の絶対値は鈍角側へ行くほど大きくなっており、床版橋にねじれ変形が生じていると推定される。

表-3 各種計算荷重との比較

試験値	最大荷重		1380.4 kN	①
計算値	許容荷重*	規格値	442.4 kN	②
	降伏荷重**	規格値	752.1 kN	③
		ミルシート値	984.1 kN	④
①/②			3.12	
①/③			1.84	
①/④			1.40	

*許容荷重は、角形鋼管1本あたりの荷重分担率を0.25とし、角形鋼管の支間中央部における上下フランジの応力度が $\sigma_y/1.7$ で求めた許容応力度($\sigma_a=175\text{N/mm}^2$)となる時の荷重として求めた。

**降伏荷重は、角形鋼管1本あたりの荷重分担率を0.25とし、角形鋼管の支間中央部における上下フランジの応力度が降伏応力度(σ_y)となる時の荷重として求めた。

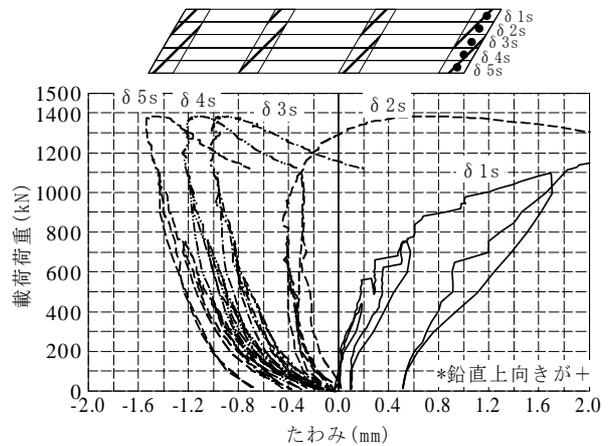


図-9 支点部のたわみ挙動

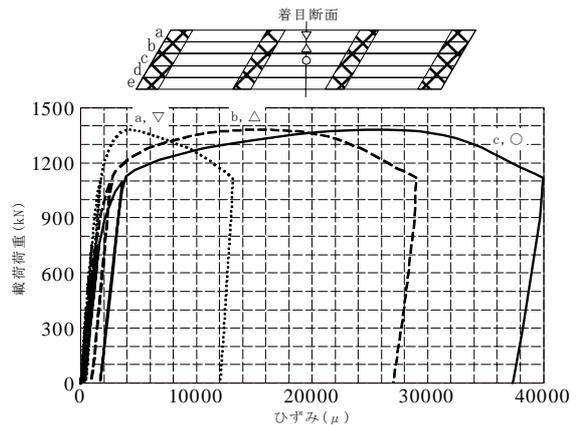


図-10 角形鋼管の荷重-軸ひずみ関係

4.2.3 角形鋼管の挙動

載荷荷重と支間中央付近の断面における角形鋼管下フランジ面の橋軸方向ひずみの関係を図-10に示す。幅方向中央部の角形鋼管がまず降伏してひずみが増大し始めるが、その隣の角形鋼管も少し遅れて塑性化し始める。

外側の角形鋼管も他の2本の角形鋼管に若干遅れて降伏するが、ひずみの変化は他の2本に比べて小さい。しかしながら、最大荷重後もひずみが増大しており、他の角形鋼管の塑性化に引きずられて塑性化が進行していることが確認できる。このことから、床版橋全体が一体となって挙動していることがわかる。

4.2.4 横つなぎ用鋼管の挙動

(1) 曲げ

横つなぎ用鋼管の上下縁に貼付したひずみゲージにより計測した、管軸方向ひずみの分布を図-11に示す。

幅員方向の中央部では上縁が圧縮、下縁が引張となっており、鋼管に正曲げが作用しているが、端部側は上下縁とも引張となっており、なおかつ上縁側の方が引張りひずみは大きく現れており、引抜きと負曲げが作用していると推定される。しかしながら、そのひずみレベルは角形鋼管の降伏荷重を超える載荷 1000kN でも 1000 μ 程度であり、降伏に至っておらず、今回の試験では継手部は健全であることがわかる。

また、最大ひずみの発生位置は、中央部の角形鋼管とそれに隣接する角形鋼管の界面であり、そのひずみ発生傾向は、弾性範囲内では引張側の方が圧縮側よりも絶対値が大きく（例えば載荷荷重 398kN では引張側 412 μ 、圧縮側-220 μ ）なっており、圧縮側コンクリート+鋼管で評価した挙動に近い。それに対し最大荷重(1380kN)時では圧縮側、引張側との絶対値はほぼ同じ(引張側 1848 μ 、圧縮側-1882 μ)になっており、降伏荷重を超えて終局に近づくにつれて横つなぎ用鋼管のみで横方向の荷重を伝達するようになっていいると考えられる。

(2) せん断力

横つなぎ用鋼管の側面に貼付した3軸ひずみゲージの測定値から計算したせん断ひずみ挙動を図-12に示す。図中のひずみは、鋼管の左右のせん断ひずみの平均を表示したものである。

この図より、弾性範囲におけるせん断ひずみは幅方向にほぼ均等であり、せん断力は横つなぎ用鋼管にほぼ均等に作用していることがわかる。

材料強度の規格降伏点で評価した角形鋼管降伏荷重時(752kN)のせん断ひずみ γ は約 400 μ であり、この数値から逆算すると、鋼管に作用しているせん断力Sは、

$$S = \tau \cdot A / k = (G \cdot \gamma) \cdot A / k$$

ここで、k:せん断ひずみ分布の補正係数(=2.0)

G:せん断弾性係数(=0.788 $\times 10^5$ N/mm²)

γ :せん断ひずみ(=400 $\times 10^{-6}$)

A:鋼管の断面積(=2041/cos30° =2357mm²)

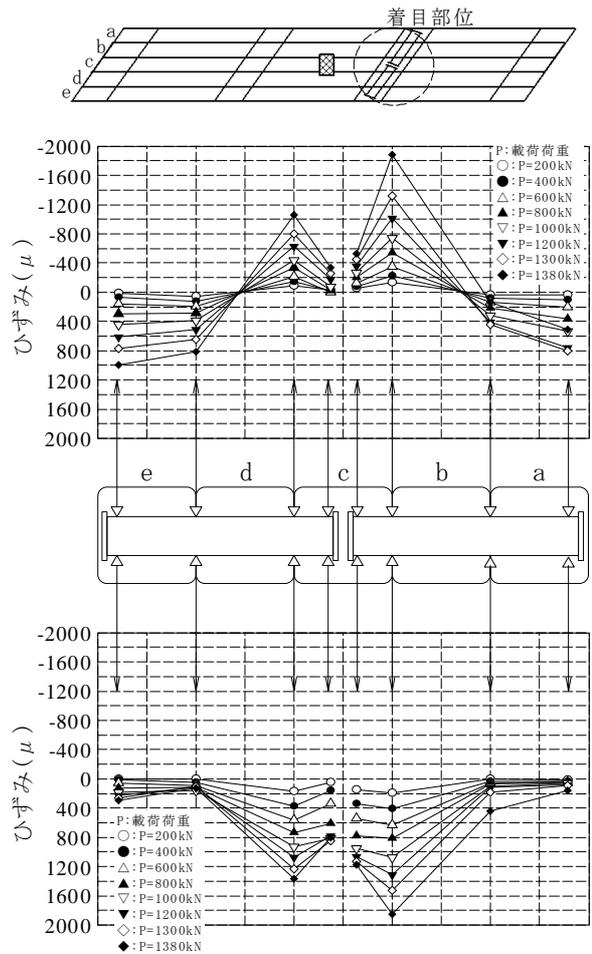


図-11 横つなぎ用鋼管上下縁の管軸方向ひずみ分布

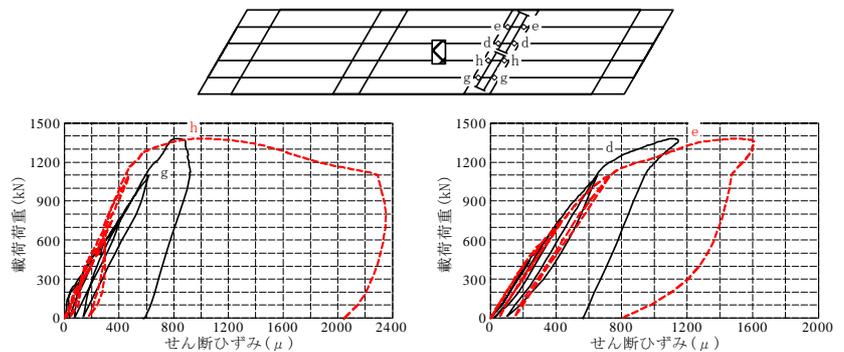
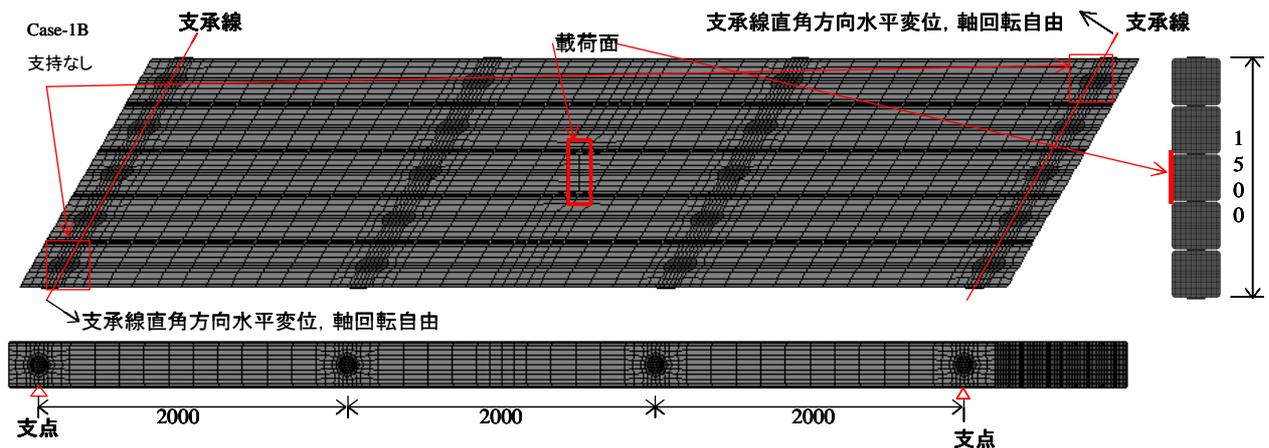


図-12 横つなぎ用鋼管のせん断ひずみ

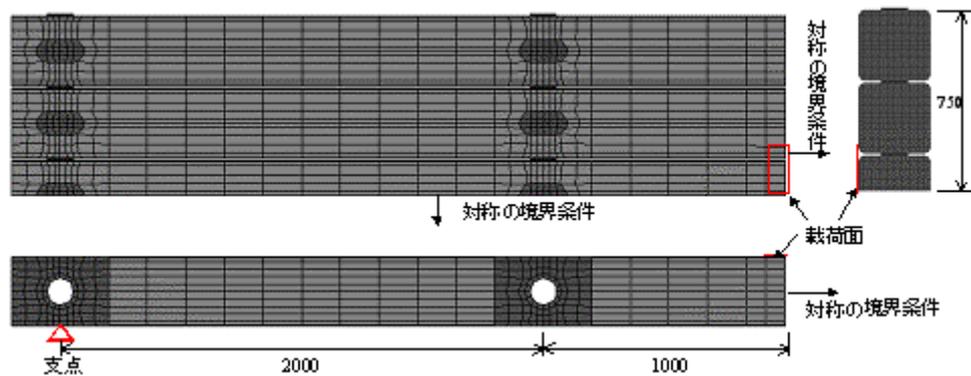
と表われ、数値を代入して計算すると、

$$S = 37.1 \text{ kN}$$

となる。この値は、載荷荷重に比して1/20と非常に小さい。仮に、荷重が横つなぎ鋼管でのみ各角形鋼管に均等に伝達されると仮定するならば、図-12中のd、h部に作用するせん断力は載荷荷重のおよそ1/5(=1/2 \times 2/5)程度、e、g部に作用するせん断力は載荷荷重のおよそ1/10(=1/2 \times 1/5)程度となるはずであるが、実測値はどちらも1/20と相当小さい。明確な理由は定かではないが、



(a) Case-1A, Case-1B



(b) Case-2

図-13 解析モデル

載荷面が3本の角形鋼管に渡っていることや、角形鋼管同士の突合せ面でも荷重伝達が行われていることがその原因であると考えられる。

いずれにしても、終局時に発生する横つなぎ用鋼管のせん断ひずみは小さく、十分な性能を発揮していることがわかる。

4.2.5 横つなぎ用鋼管の現場継手部の挙動

前項の計測結果より、横つなぎ部材における曲げ、せん断に対し、長さ方向中央部に配置した現場継手部がクリティカルとはなっていないことが確認された。したがって、継手部は全体構造の破壊に至るまで健全であったと考えられる。

5. FEM 解析による試験結果の検証と斜角の影響調査

載荷試験結果の検証、ならびに斜角を有することによる支点反力、ならびに断面力分布への影響を観察するため、FEM 解析を実施した。使用した解析コードは汎用構造解析プログラム MARC2005⁹⁾である。

5.1 解析モデル

解析モデルは以下の3種類を考えた。

Case-1A: 斜橋, 鋭角部角形鋼管の支点無支持

Case-1B: 斜橋, 支点全点単純支持

Case-2: 直橋, 支点全点単純支持

解析モデルの概要を図-13に示す。Case-1は今回の試験で対象とした斜角を有するモデルであり、試験結果を踏まえ、Case-1Aは鋭角側における最外縁の角形鋼管の支点部(図-6のR-1)を鉛直方向に支持しないモデル、Case-1Bは支点部がアンカーされている状態を想定し、角形鋼管の支持点全部を鉛直方向に支持したモデルである。Case-2は、Case-1と寸法は同じで斜角を90°にして直橋としたモデルで、斜角モデルとの比較を行うために設定したモデルである。図-13からわかるように、Case-1は全体モデルで解析したが、Case-2は構造の対称性を考慮し、1/4モデルで解析を行った。荷重は、載荷面に位置する節点に強制変位を与えることにより載荷した。

また、角形鋼管同士の突合せ面のモデル化は、荷重分配に影響するため解析においては重要であるが、過去の実験、ならびに解析の結果²⁾より、弾性範囲に関しては節点同士を剛結しても荷重分配をよく再現できることが確かめられており、また、先の実験結果からも破壊時において角形鋼管は一体となって変形していることが確かめられているので、角形鋼管同士の側面の対向する節点同士の鉛直方向変位、ならびに水平方向の面外方向変位

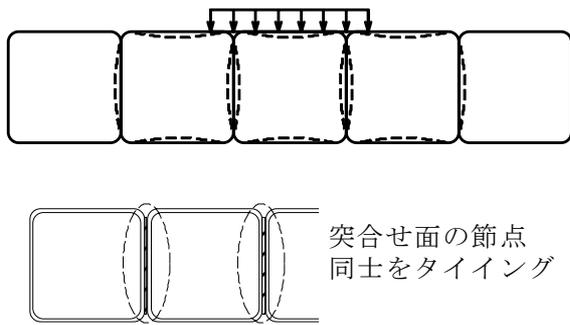


図-14 角形鋼管側面のモデル化

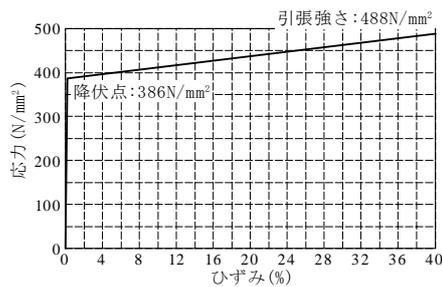


図-15 解析で設定した角形鋼管の
応力-ひずみ関係

をタイニングした(図-14)。タイニング(拘束)とは、節点の自由度間に線形の拘束条件を与えるもので、ここでは結合を指定した節点の該当する自由度の成分を剛結合している。

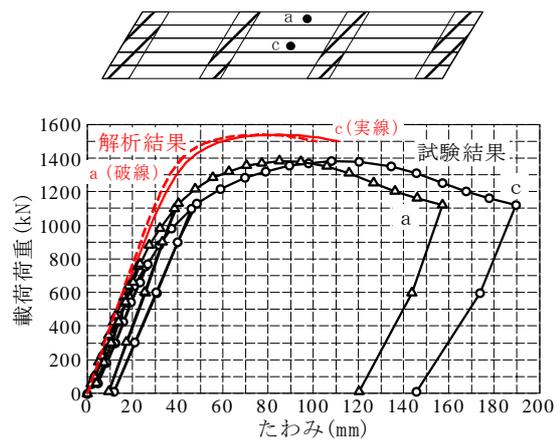
なお、試験の結果、横つなぎ用鋼管の現場継手部は終局耐力に影響しなかったため、今回の解析では継手部は考慮していない。

材料特性は、試験の結果、コンクリート、ならびに横つなぎ用鋼管に外観上の損傷はなく、計測したひずみレベルも小さかったため、コンクリートならびに横つなぎ用鋼管は線形弾性とし、角形鋼管のみ材料非線形性を考慮した。角形鋼管の材料非線形性は、表-1に示すミルシート値を採用し、図-15に示すように、降伏点を折れ曲がり点とするバイリニアモデルとした。弾性係数、ならびにポアソン比は鋼材が $E_s=2.05 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ 、 $\nu_s=0.3$ 、コンクリートが $E_c=2.5 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 、 $\nu_c=0.2$ である。また、角形鋼管の初期たわみ、残留応力などの初期不整は考慮していない。

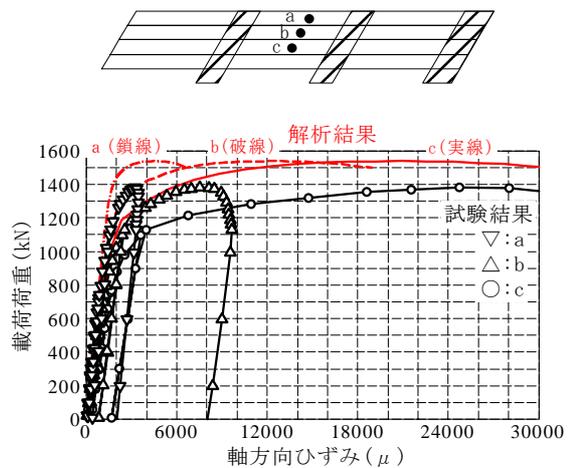
5.2 解析結果

5.2.1 荷重試験結果との比較

解析の結果得られた、Case-1Aの支間中央部のたわみ、ならびに軸方向ひずみの挙動を試験結果と比較して図-16に示す。また、Case-1Aの最大荷重を記録した時点での変形状況、ならびに相当応力の分布を示したコンター図を図-17に示す。



(a) 支間中央断面のたわみ



(b) 支間中央断面の橋軸方向ひずみ

図-16 試験結果と解析結果の比較

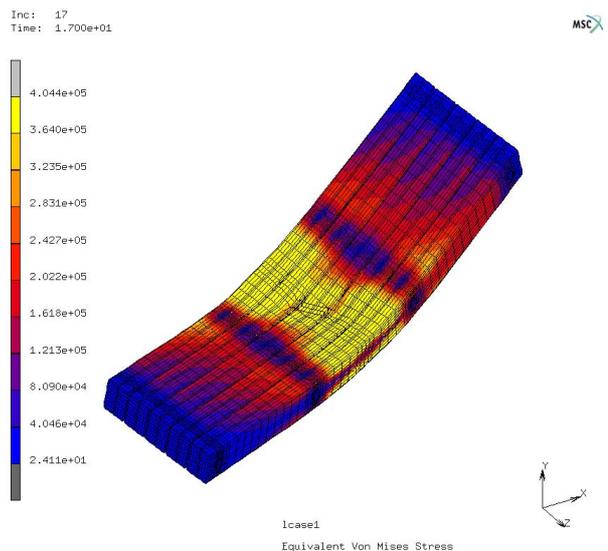


図-17 最大荷重時の相当応力コンター図
(Case-1A: 変形倍率5倍, 単位 kN/m²)

図-16より、試験結果よりも解析結果の方が10%ほど大きな最大荷重を示した。荷重に対するたわみ、ならび

にひずみの発生傾向は、初期不整を考慮していないため、非線形性の現れはじめる部分の勾配、ならびに角形鋼管の側面同士をタイピングしているために最大荷重付近での各角形鋼管でのひずみの発生傾向に若干の違いが見られるが、それ以外は比較的よく一致していると考えられる。解析の最大荷重が試験結果よりも大きくなった理由としては、上記のような角形鋼管の側面をタイピングしていることによる最大荷重付近での荷重分配性能の違いや支点部のモデル化、材料特性のモデル化の違い、載荷面付近の塑性化の影響がうまく考慮されていないこと等々が考えられるが、明確な理由は不明である。

しかしながら、解析結果はたわみ、ひずみの傾向をよく表現できており、斜角を有する床版橋の挙動はFEM解析で十分評価できると判断される。

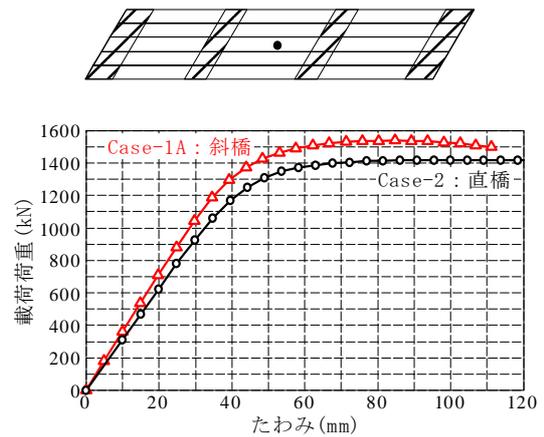
5.2.2 解析結果における斜橋と直橋との比較

解析の結果得られた、Case-1AとCase-2の支間中央部のたわみ、ならびに軸方向ひずみの挙動を図-18に示す。また、Case-2の最大荷重を記録した時点での変形状況、ならびに相当応力の分布を示したコンター図を図-19に示す。たわみ、ひずみ、ならびに変形状態はCase-1AとCase-1Bでほぼ同じであったため、図の煩雑化を避けるため、Case-1Bの解析結果はここでは図示を省略した。

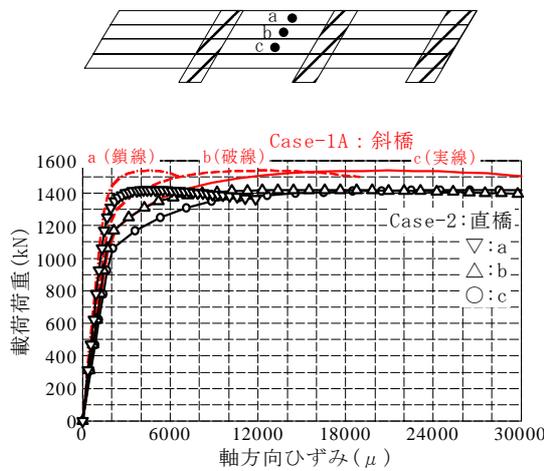
図-18より、斜角を有する方が、直橋よりも剛性ならびに最大荷重は若干大きくなった。これは、斜橋の場合支承線が斜めに配置されることにより、水平変位、回転の拘束が直橋の場合から変化し、見かけの支間が減少することによると考えられる。

各解析ケースの支点反力分布を図-20に示す。Case-1とCase-2で反力の分布は大きく異なることがこの図からわかる。直橋のCase-2では、反力分布は中央部が若干大きくなる傾向は示したものの、各角形鋼管でほぼ等しくなったのに対し、斜角を有するCase-1では反力の不均一化が見られた。斜角を有するCase-1A、1Bの場合、鋭角部(R-5)で反力が小さく、鈍角部(R-1)に大きな反力が発生している。また変形状態からも、斜角を有する場合は角形鋼管にねじれ変形が生じていることがわかる。またCase-1Aと1Bの比較により、鋭角部の支持状態の違いにより、鋭角側の2本目の反力(R-4)に大きな違いが見られる。すなわち、鋭角部支点(R-5)の鉛直方向を無支持としたCase-1Aでは、R-4にも反力があまり発生せず、鋭角部支点(R-5)の鉛直方向変位を固定したCase-1Bでは、R-4にR-2、R-3とほぼ同じレベルの反力が生じ、R-5に負の反力が生じている。

解析結果では、斜角を有する場合、鋭角部の支点(R-5)に最大で平均の約3倍程度の大きな反力の集中が見られる。これは、試験の結果得られたもの(最大で約2倍程度)よりも大きい。これは、支承の弾性変形によって支点反力の集中は緩和されると考えられるので、試験時に支



(a) 支間中央断面のたわみ



(b) 支間中央断面の橋軸方向ひずみ

図-18 直橋と斜橋の比較

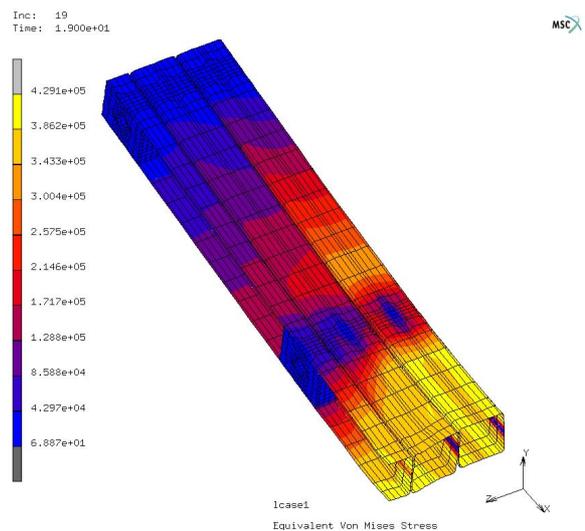


図-19 最大荷重時の相当応力コンター図
(Case-2: 変形倍率5倍, 単位 kN/m²)

承と試験体の間に敷いたゴム板の変形が影響していると考えられる。解析では支持点の変位はゼロであるので、

この影響が現れたものと思われる。実際の構造物では、支承にゴムを用いるので、弾性変形により、このような支点反力の集中は緩和されると考えられる。

また、解析の結果得られた Case-1A の許容荷重 (440kN) 時の支間中央部横断面での角形鋼管下面での橋軸方向ひずみの分布を図-21 に、許容荷重 (440kN) 時の各角形鋼管に発生した軸方向ひずみと荷重分担率の計算結果を表-4 にそれぞれ示す。図-21 より、角形鋼管の幅員方向では、全幅に載荷されている中央部 (角鋼管 c) を除き、ねじりにより幅方向のひずみ分布に偏りが見られるが、平均的には中央部のひずみで代表できることがわかる。図中には示していないが、Case-1B、Case-2 も同じ傾向を示した。この結果を踏まえ、表-4 より、斜角を有することで、先にも述べた通り、ひずみは直橋の場合よりも 10% 程小さくなるが、荷重の分担率としては直橋の場合と変わらないことがわかる。さらに、支点部の支持条件が異なる Case-1A と Case-1B とを比較しても、支間中央断面におけるひずみの発生状況、ならびに荷重分担率にはほとんど差がないことがわかる。なお、実際には表-2 で示したように、荷重は軸直角方向に分散されるため、断面 1 で評価した荷重分担率は安全側であり、斜角を有する場合でも荷重分散は十分に行われていることが確認できる。

6. まとめ

斜角を有する角形鋼管を用いた床版橋の耐力、ならびに荷重分配性能を確認するため、60° の斜角を有する試験体を製作し、載荷試験を実施した。また、FEM 解析により、斜角の影響、ならびに支点の支持条件をパラメータとした解析を実施し、これらの影響を確認した。検討の結果、得られた知見を以下にまとめる。

(1) 支点反力

載荷試験の結果、斜角を有する場合、支点反力の分布は幅員方向に不均等になり、鋭角側の支点は浮き上がり、その反対側の鈍角側の支点には平均よりも大きな反力が発生することが確認された。これは床版のねじれ変形によるものである。

(2) 荷重分配

角形鋼管 5 本を連結して載荷試験を行った結果、角形鋼管の軸に直角な方向への荷重分配が確認され、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。このことから、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。

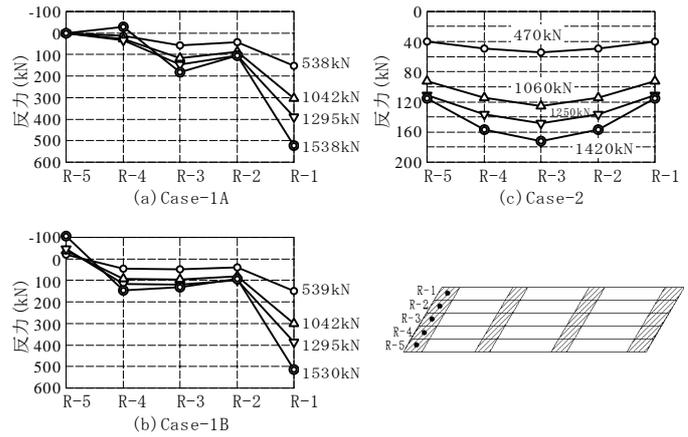


図-20 支点反力の分布

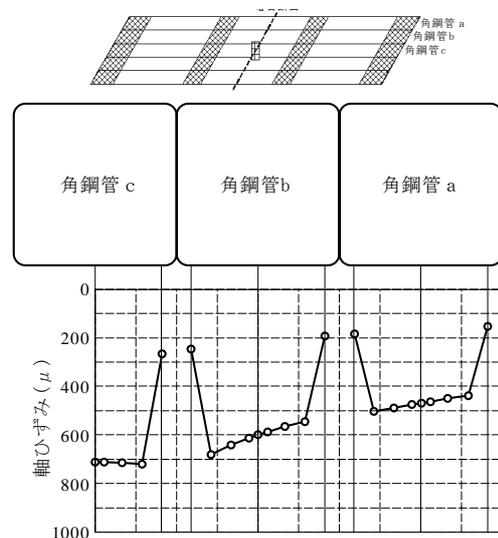


図-21 角形鋼管横断方向の橋軸方向ひずみ分布 (Case-1A : 載荷荷重 440kN 時)

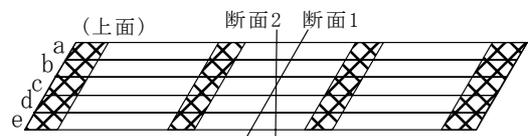
表-4 下フランジ部ひずみの分布 (440kN 載荷時)

	角形鋼管 a	角形鋼管 b	角形鋼管 c
Case-1A	466 μ (0.165)	597 μ (0.211)	708 μ (0.250)
Case-1B	466 μ (0.165)	596 μ (0.211)	707 μ (0.250)
Case-2	529 μ (0.165)	678 μ (0.212)	791 μ (0.247)

*本表は断面 1 で算出

**ひずみは角形鋼管の幅方向中央の値を用いた

*** () 内は荷重の分担率を表す。荷重分担率は (着目点のひずみ / 各角形鋼管の断面におけるひずみの総和) で算出した



(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。また、試験体は試験終了時においても一体性を保持しており、十分な変形性能を有することも確認した。

(4) 横つなぎ用鋼管とその現場継手

横つなぎ部材に発生する曲げおよびせん断力は、角形鋼管が塑性化するまでは弾性範囲にあり、十分な機能を有することを確認した。また、現場継手部を幅員方向中央に設けて載荷試験を行ったが、載荷試験の結果、横つなぎ鋼管の継手部がクリティカルとなることはなく、継手部が十分な性能を有していることを確認した。

(5) 試験結果と解析結果の比較

FEM解析を実施し、試験結果との比較を行った。解析結果の最大荷重は試験結果よりも10%程度大きな値を示したが、両者のたわみ、ひずみの発生傾向は比較的よく一致し、終局に至るまでの挙動の評価にFEM解析が適用可能であることを確認した。

(6) 斜橋と直橋の違い

斜角以外は同一の寸法を有する直橋と斜橋のそれぞれについてFEM解析を行い、相互の比較を行った。

解析の結果、床版橋の中央部に載荷した場合、全体剛性、ならびに強度は60°の斜角を有する場合の方が大きかった。これは、斜橋の場合、見かけの支間が直橋よりも減少するためであると考えられる。

また、斜角を付けることで床版橋がねじれ変形するのに伴い、支点反力の不均等化が生じ、鋭角側端部の浮き上がりと鈍角側支点への反力の集中が観察された。

さらに、斜角を有する場合、直橋に比べて許容荷重にて発生する最大応力は10%程低下するが、1本の角形鋼管が分担する荷重を表す荷重分担率は直橋とほぼ同じとなり、十分な荷重分配性能を有していることを確認した。

本試験の結果、斜角を有する角形鋼管を用いた床版橋については、最終的な破壊形態は、載荷面（路面）での局部的な陥没により生じること、さらにその終局強度は鋼管の降伏荷重を超えるものであることを確認した。本床版橋の設計手法については、文献2)において、格子計算による設計を提案しているが、終局荷重状態の検討も、格子計算である程度は評価可能であると考えられる。

上記の検討の結果、提案する角形鋼管を用いた床版橋について、斜角を有する場合の基本的な挙動、ならびに耐力については確認できたと考える。しかしながら、斜角を有する床版橋の挙動に関しては、幅員と支間長の比、

ならびに載荷位置などによって変化することが知られている。これらの影響については今回の検討では未検討であるが、本文における検討結果からもこれらは解析で追跡可能と考えられる。これらの検討については今後の課題としたい。

参考文献

- 1) 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, Vol. 39, No. 9, pp. 14-21, 2005. 9.
- 2) 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, Vol. 12, No. 47, pp. 11-22, 2005. 9.
- 3) 日本道路協会: コンクリート道路橋設計便覧, 12.4 斜め床版橋, pp. 231-233, 平成6年2月
- 4) 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実験的検討, 鋼構造年次論文報告集, 第14巻, pp. 9-16, 2006. 11.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説, I. 共通編, 2. 2. 2 活荷重, pp. 11-20, 平成14年3月.
- 6) MSC Software Corp.: MARC2005 ユーザーズマニュアル, 2005.