

合成逆アーチ橋に関する基礎的研究

FUNDAMENTAL INVESTIGATION OF INVERTED COMPOSITE ARCH BRIDGE

阿部英彦^{*1}、中島章典^{*2}、モハメッド・アンザール^{*3}、宮本浩介^{*4}、遠藤英樹^{*5}

By Hidehiko ABE, Akinori NAKAJIMA, M. A. C. MOHAMED ANZAR, Kosuke MIYAMOTO and Hideki ENDO

This paper deals mainly with the behavior of the inverted composite arch bridge, which has been developed by the authors.

A series of model tests were conducted and their results were compared with the values calculated by a simplified analytical method shown in this paper. Then a series of parametric study in regard to the rigidity of shear connectors and the variety of their arrangement was conducted, assuming a bridge of an actual scale and using a large program to treat the structure as a whole.

Through this investigation, a new type of bridge superior asthetically and economically is expected to be realized.

1、はじめに

ここで、「合成逆アーチ橋」と称されるものは図1に示すように通常のアーチ橋と比較して、アーチ材の向きを上下逆さにして下弦材とし、上弦材部分はずれ止めを介してコンクリート床版と鋼弦材とを一体化した橋梁形式である。合成上弦材はアーチ下弦材から水平圧縮力を受けるとともに部分荷重などによる曲げモーメントを合成桁として受ける合理的な構造で、通常の合成桁橋より長いスパンに対して経済的であると考えられる。著者らは、既に小型の模型実験を行うとともに簡易解析法による検討を行った¹⁾。

そこで本研究では、まず、荷重を満載したときにコンクリート床版と鋼上弦材のずれが最も大きくなると考えられる両端部に配置した、剛度の高いずれ止めが伝達せん断力に及ぼす影響およびアーチ橋に斜材を加え、曲弦トラス構造とすることが構造の変形性状、荷重伝達機構に及ぼす影響などに着目して、模型試験体による静的載荷実験を行った。また、3段階に分けた簡易解析法による結果およびRC床版、鋼桁、ずれ止めをそれぞれ板、はり、継手ばね要素としてモデル化し、全体構造を一括して有限要素解析した結果とを比

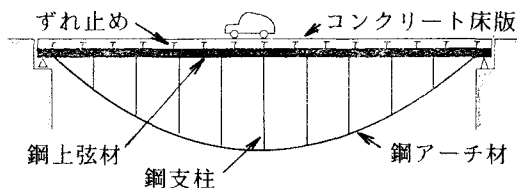


図1 合成逆アーチ橋の概念

*1 工博 宇都宮大学教授 工学部建設学科建設工学コース (321 宇都宮市石井町2753)

*2 工博 宇都宮大学助教授 工学部建設学科建設工学コース (321 宇都宮市石井町2753)

*3 工修 東北大学大学院 博士課程後期土木工学専攻、元宇都宮大学大学院生

(980 仙台市青葉区荒巻字青葉)

*4 鹿島建設 東北支店土木部設計課、元宇都宮大学生 (980 仙台市青葉区二日町1-27)

*5 よみうりランド 元宇都宮大学生 (206 東京都稲城市矢野口3294)

較考察した。さらに、実際的なプロポーシヨンの合成逆アーチ橋について、おもに効果的なずれ止めの配置方法を明らかにすることを目的として、パラメトリック解析を行った。

2、実験概要

実験に用いた試験体は、図2に示す逆アーチ型とこれに斜材を加えた曲弦トラス型である。いずれもスパンは240cm、4格間からなり、鋼骨組は一面だけの構造とし、各部材の図心が合成構造としての骨組線に一致するように、適宜ガセットプレート进行て、すみ肉溶接あるいは突き合わせ溶接により部材を接合した。曲弦トラス型では、φ16のスタッドを格点に集中配置したものと全長に分散配置したもの、アーチ型ではスタッドを分散配置し、コンクリート床版幅を変えた2体の合計4体である。また、アーチ型では両端部に剛度の高いずれ止めを設けた。スタッドの配置状況を図3に示す。以下アーチ型では、床版幅60cmおよび30cmの試験体をそれぞれ「アーチ60cm型」および「アーチ30cm型」と呼び、曲弦トラス型では、スタッドの配置により「トラス集中型」と「トラス分散型」と呼ぶ。

試験体の種類、荷荷試験時のコンクリートの圧縮強度 f_c' などを表1にまとめる。各試験体ともスパンの1/2、3/8および1/4点の3箇所集中荷重を移動させて荷荷し、アーチ型では1/4点で、また、トラス型では3/8点で試験体を破壊にいたらせた。

実験に際しては、たわみ、床版と鋼上弦材との橋軸方向のずれ、床版や鋼部材各部のひずみを計測し、また、荷重段階ごとにひびわれの発生状況などを観察した。床版のひずみは、床版厚さの中央高さに配置している鉄筋(D6)に貼付けたひずみゲージを用いて計測した。

図4には、一例として、アーチ60cm型試験体の配力鉄筋の配置状況、ひずみゲージおよびダイヤルゲージの設置状況を示す。また、配力鉄筋は、D6鉄筋を図4に示すように約12cm間隔で床版高さの中央に一段配置した。表2に引張試験によって得られた鋼材、鉄筋および押し抜き試験によって得られたスタッドおよびブロック型ずれ止めのずれ常数をまとめて示す。

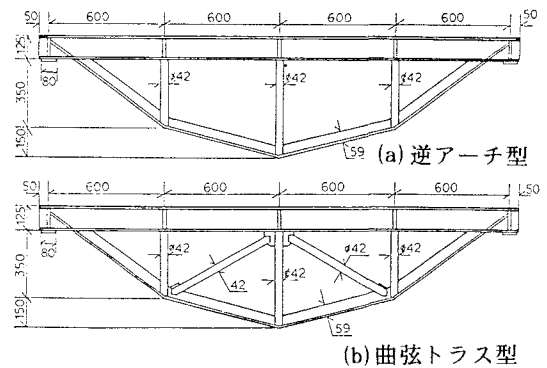


図2 試験体の基本形状(単位mm)

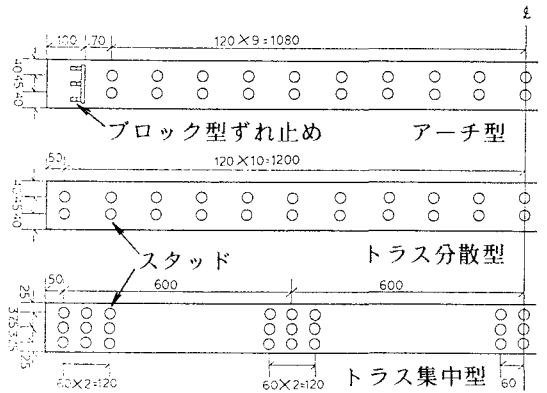


図3 ずれ止めの配置

表1 試験体の種類および荷荷時コンクリート圧縮強度

タイプ	試験体仕様、荷荷時コンクリート圧縮強度
アーチ60cm型	逆アーチ、端部ブロック型ずれ止め有り 床版幅60cm、 $f_c' = 219 \text{ kgf/cm}^2$
アーチ30cm型	逆アーチ、端部ブロック型ずれ止め有り 床版幅30cm、 $f_c' = 222 \text{ kgf/cm}^2$
トラス分散型	曲弦トラス、スタッド分散配置 床版幅60cm、 $f_c' = 237 \text{ kgf/cm}^2$
トラス集中型	曲弦トラス、スタッド集中配置 床版幅60cm、 $f_c' = 256 \text{ kgf/cm}^2$

表2 鋼材の材料特性

材料	弾性係数 (kgf/cm^2)	降伏応力度 (kgf/cm^2)
鋼材(SM41)	2.04×10^6	3298
鉄筋(SD30)	1.85×10^6	3250
ずれ止め剛度(tf/m)		
スタッド(JIS B 1198)	2.3×10^3	
ブロックずれ止め(SM41)	7.5×10^3	

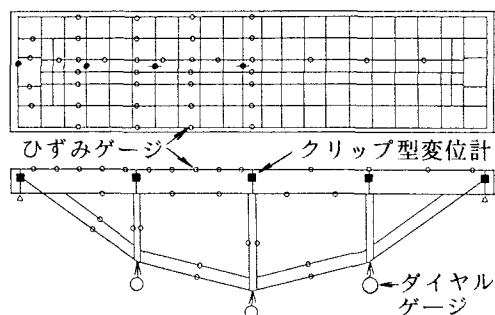


図4 試験体の配筋図および
ゲージ設置位置 (アーチ60cm型)

3、解析方法

(1) 簡易解析法の概要¹⁾

始めに上弦材の鋼部材とコンクリート床版とが完全に一体となっていると仮定し、コンクリート断面は鋼材に換算して、平面骨組構造のFEM解析により各部材力を算出した。次に、スタッドが伝達するせん断力を求めるために、鋼とコンクリートの合成断面である上弦材部分のみについて、はりとしての剛体ばねモデルによる解析を行った。つまり鋼はりおよび床版部分をそれぞれはり要素、スタッドは継手ばね要素としてモデル化し、全体系との整合性がとれるように前段階のFEM解析において求められた部材力および荷重を所定の位置に外力として作用させた(図5)。

最後に、平面応力状態を仮定した2次元弾性問題のFEM解析プログラムを用いて、コンクリート床版の応力分布を調べた。図3に示すように鋼上弦材には、複数、対になったスタッドが並んでいるが、これが上弦材の中央線上に集中し、FEM解析における節点に合致するように床版を三角形要素に分割して、前段階で求められたスタッドの伝達せん断力を所定の位置に作用させた。

この解析法は、比較的小容量のコンピュータでも処理可能であり、また、力の流れを確認しながら3次元の挙動を追跡することができる。

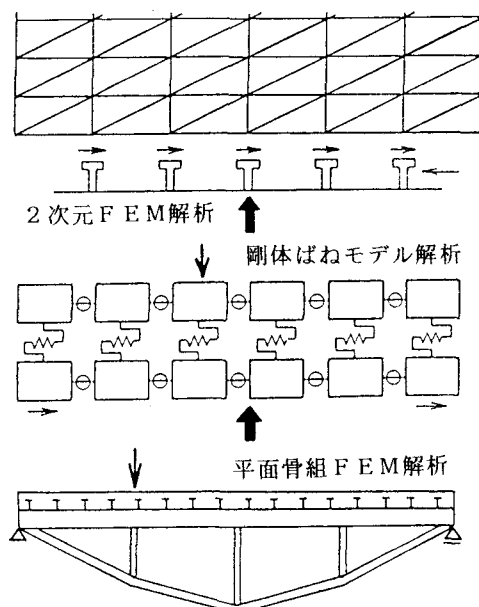


図5 簡易解析法の手順

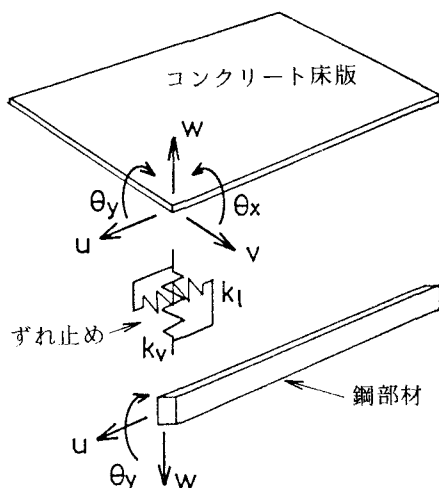


図6 全体一括解析法のFEM要素モデル

(2) 有限要素法による全体一括解析の概要

合成アーチ橋の全体解析をより精度よく行うためには、より大型のコンピュータを利用して、コンクリート床版部分は面外曲げを考慮した板要素、鋼骨組部分ははり要素およびずれ止めは継手ばね要素としてモデル化した3次元の全体一括解析を行うことが望ましい。合成桁橋についてこのような解析は種々行われているが^{2)~5)}、本研究では、合成アーチ橋におけるずれ止めの橋軸方向せん断力分布を明らかにすることが主な目的であるので、このために必要な最小限の自由度で解析することを試みた。

つまり、コンクリート床版については、面内変形と板曲げを考慮した1節点5自由度の長方形要素、鋼骨組部分は鉛直および橋軸方向変位と骨組面内だけの曲げを考えたはり要素、ずれ止めは鉛直および橋軸方向

力だけに抵抗するばね（ばね定数 k_v および k_t ）から成る継手ばね要素とした（図6）。荷重は鋼骨組面内に作用する場合だけを考慮しているので、コンクリート床版の橋軸方向中央線の橋軸直角方向変位およびこの橋軸方向中央線まわりの回転は起こらない。したがって、ずれ止めおよび鋼骨組にその面外力は作用せず、また、鋼骨組にねじりは生じないものとした。

この解析モデルによって、床版の板としての影響を考慮した合成逆アーチ橋におけるずれ止めの橋軸方向せん断力分布の弾性解析をより正確に行うことができ、また、上述の簡易解析法の精度を調べることができると考えられる。

4、実験結果および解析結果との比較

アーチ60cm型とアーチ30cm型およびトラス集中型とトラス分散型の実験結果はそれぞれ比較的類似しているので、以下ではおもにアーチ60cm型とトラス分散型についての実験結果を示す。

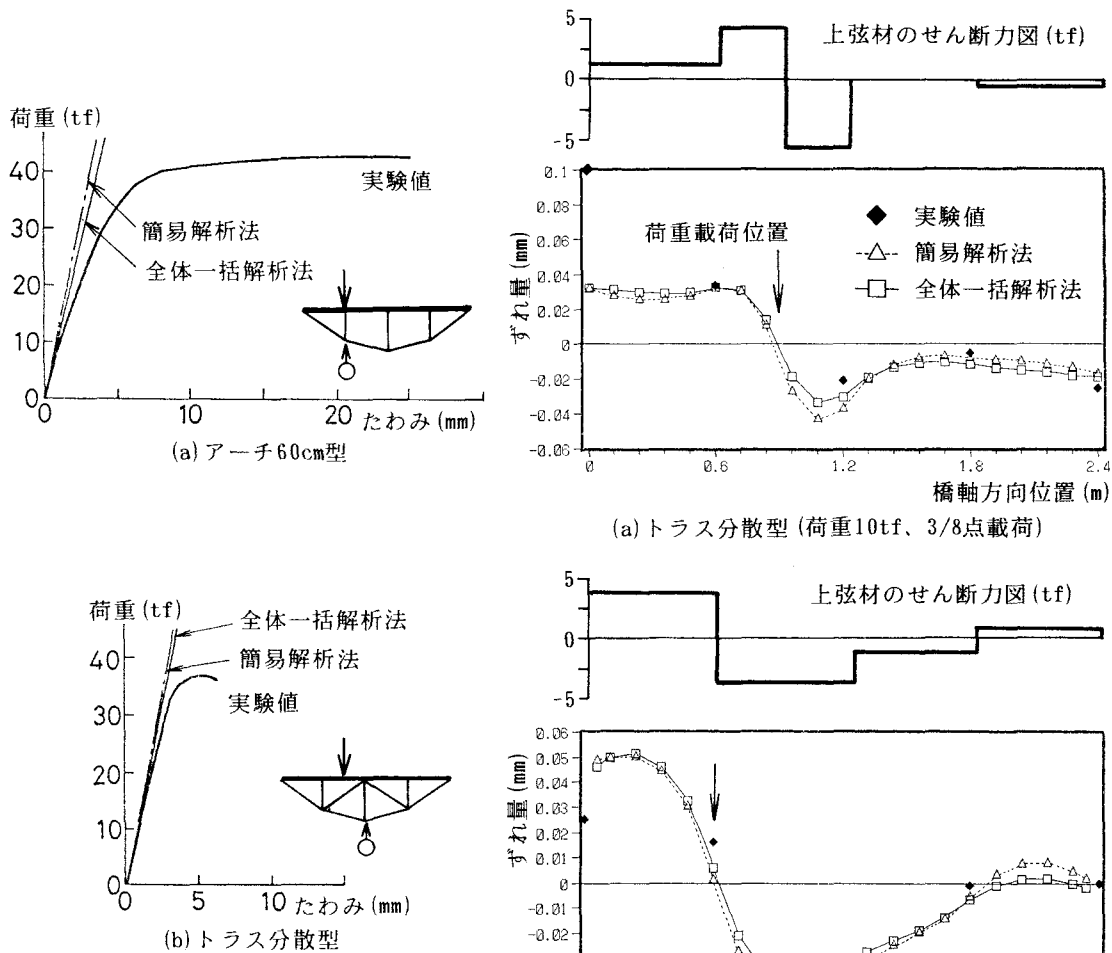


図7 荷重－たわみ曲線

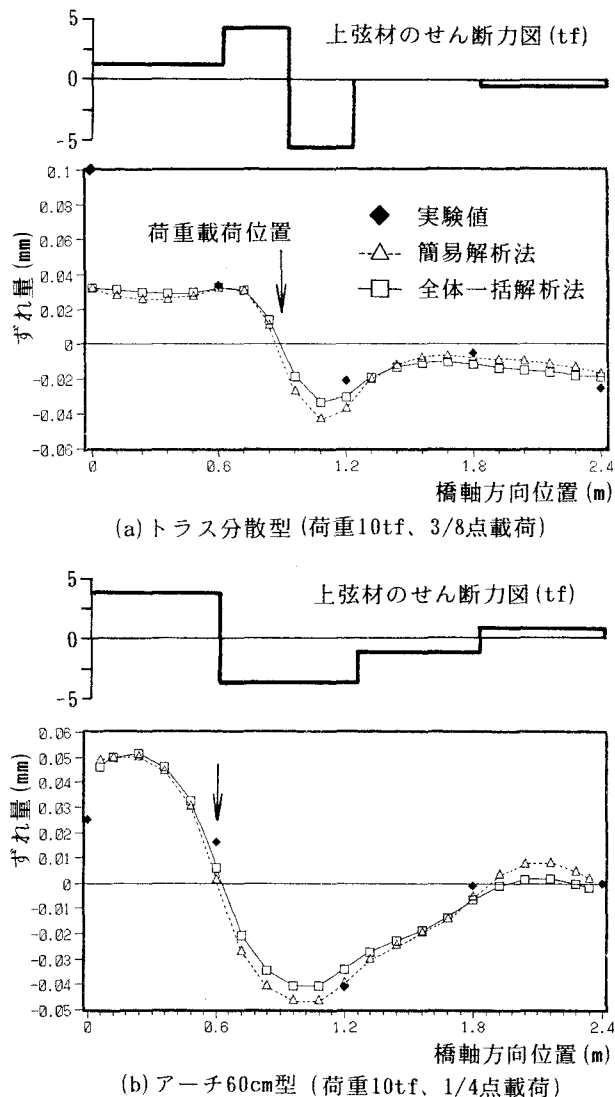


図8 橋軸方向ずれ分布

(1) たわみ

実験で得られたアーチ60cm型とトラス分散型の破壊時までの荷重－たわみ曲線を図7 (a)および(b)に示す。アーチ型では1/4点荷重時の1/4点のたわみ、トラス型では3/8点荷重時の1/2点のたわみと荷重の関係である。アーチ型では、最大荷重付近でたわみが急激に大きくなっているが、トラス型では、最大荷重に達した後の延性があまり見られない。これは、アーチ型の破壊は格点荷重による合成上弦材の曲げ破壊が主であるのに対して、トラス型の破壊は格点間局部荷重によるコンクリート床版のせん断破壊によって生じたためである。図中には、簡易解析法における平面骨組FEM解析の結果と全体一括解析の結果も示している。同じ荷重に対して簡易解析によるたわみの値が小さいのは、上弦材部分を完全合成として取り扱っているためであると考えられる。

(2) コンクリート床版と鋼上弦材のずれ

トラス分散型 3/8点荷重時およびアーチ60cm型1/4点荷重時の橋軸方向のずれ分布の例を図8 (a)および(b)に示す。縦軸はずれ量を、また、横軸は左端からの位置を示している。◆は実験値、実線は全体解析による結果、点線は簡易解析による結果である。また同図には、平面骨組FEM解析によって得られたそれぞれの荷重荷重に対する上弦材部分のせん断力図を示す。どちらの図もせん断力図と類似したずれ分布形状を示しており、トラス型の左端を除いて実験値と両解析値は比較的良く一致していることがわかる。

(3) コンクリート床版のひずみ分布

トラス分散型およびアーチ60cm型の 1/4点10tf荷重時のコンクリート床版内のひずみ分布の実測値と両解析値の比較を図9 (a)および(b)に示す。図では、床版の1/2部分について、ひずみの大きさを線分の長さで表している。トラス型では、床版内のひずみの大きさが比較的一様であるのに対して、アーチ型では荷重点付近のひずみが最も大きく、スパン中央部ではそれが小さくなっている。実測値と解析値はいずれの場合にも比較的良く一致していることがわかる。

アーチ30cm型では、アーチ60cm型に比較して、床版幅が小さいために、床版各部のひずみの値が大きくなった。

また図10 (a)および(b)には、図9と同じ場合について、コンクリート床版の中心線に沿った橋軸方向のひずみ分布状況の比較を示す。トラス型の右半分のひずみ分布において、簡易解析による結果が全体解析に

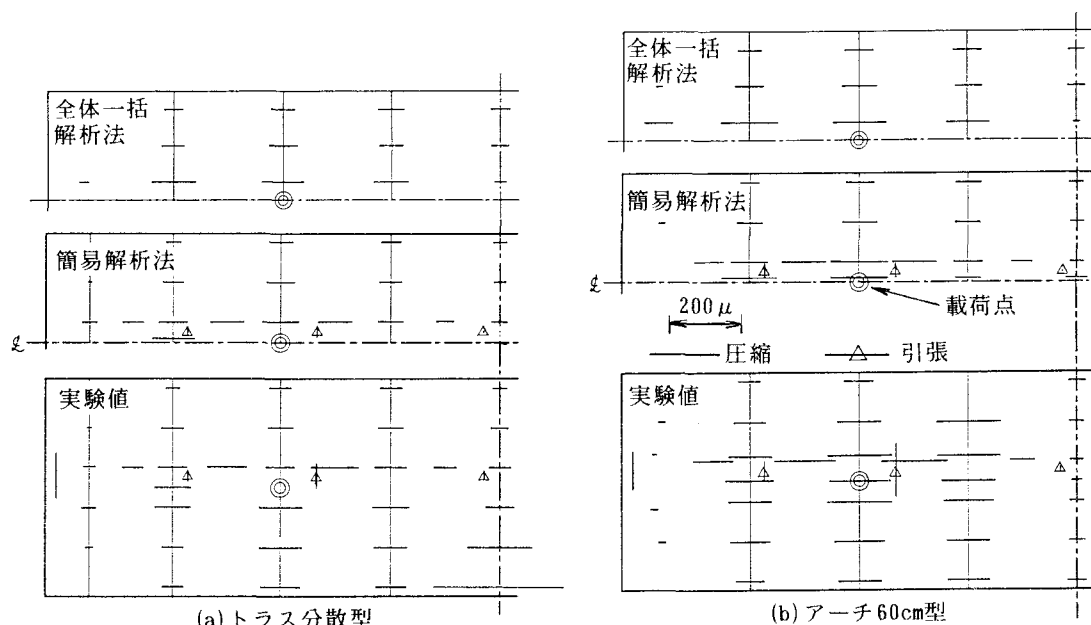


図9 コンクリート床版のひずみ分布 (荷重10tf、1/4点荷重)

よる結果よりも値が小さくなっているが、この場合も実験値と両解析値とは比較的良く一致している。どちらの解析法によるひずみ分布も分布形状が脈動しているが、これはずれ止め近傍の応力集中のためである。

(4) コンクリート床版のひびわれと破壊状況

トラス分散型およびアーチ60cm型の破壊時ひびわれ状況の例を図11(a)および(b)に示す。アーチ60cm型の床版上面には、支点から載荷点の間に、ずれ止めが床版を押し裂くようなスプリット効果による縦ひびわれが多数発生している。しかし、支点部にある剛度の高いずれ止めの効果によってスプリット破壊は防止され、載荷点付近において床版上面のコンクリートが圧壊し、終局状態にいたった。アーチ30cm型では、縦ひびわれの発生などはアーチ60cm型と同様であるが、床版幅が狭いことから床版のせん断抵抗力が十分ではなく、破壊は載荷点下コンクリート床版のせん断破壊によって終局状態にいたった。

トラス分散型では、載荷点下床版の上面、

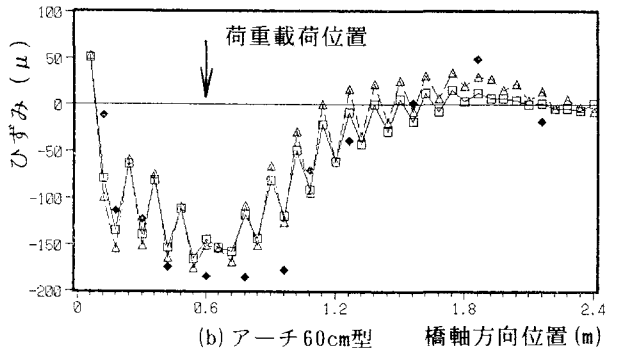
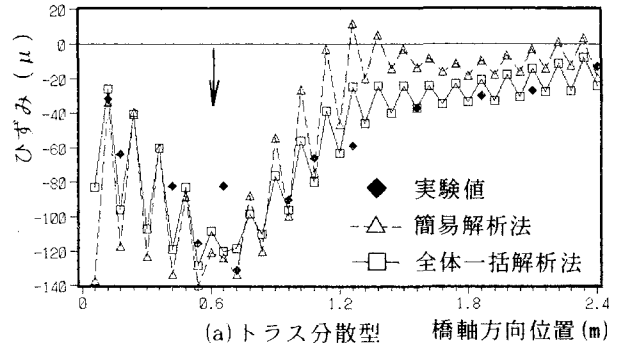


図10 コンクリート床版の橋軸方向ひずみ分布
(荷重10tf、1/4点載荷)

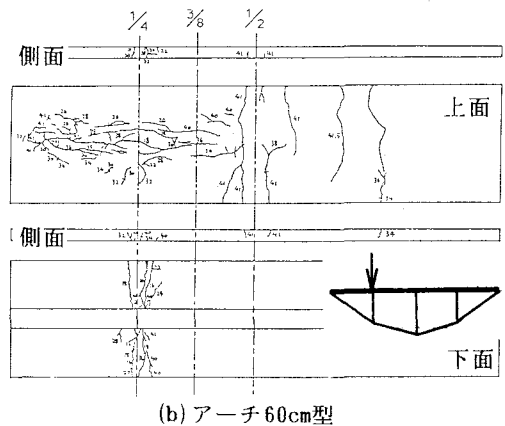
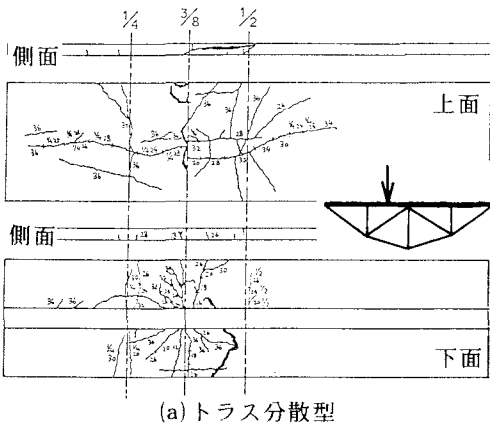
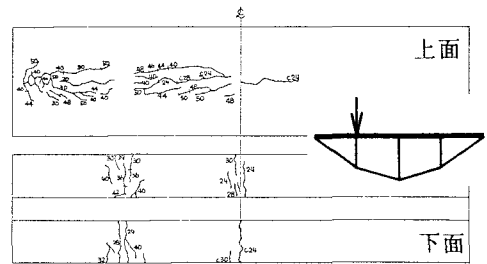


図11 コンクリート床版の
ひびわれ状況



(c) 参考文献(1)のアーチ試験体A-3

下面に局部載荷によるひびわれが多数見られたが、結果的には床版のせん断破壊により終局状態にいたった。トラス集中型もほぼ同様の傾向を示した。参考文献(1)に示している合成逆アーチ橋の破壊時のひびわれ状況を図11(c)に示すが、支点部に剛なずれ止めを配置しない場合には、床版上面の曲げひびわれが発達する以前に終局状態にいたっていることがわかる。

5、合成逆アーチ橋のずれ止めの配置に関するパラメトリック解析

(1) 解析モデルとパラメーター

前節に示したように、合成逆アーチ橋の実験結果との比較により、ここで用いた合成逆アーチ橋の簡易解析法あるいは全体一括解析法によってある程度、この種の構造の挙動を明らかにすることができることがわかった。そこで、さらに合成逆アーチ橋のずれ止めの合理的な配置を研究するために、ここでは、実橋に近いプロポーションの合成逆アーチ構造について、全体一括解析法により種々のパラメトリック解析を行った。

この目的のために図12(a)に示すようなスパン60m、ライズ8.5m、床版幅7m、8パネル2主構の合成逆アーチ橋モデルを選んだ。鋼アーチ面は1面だけを考え、それに影響するコンクリートの床版幅は3.5mとし、その厚さは20cmとしている。これらを基に、死荷重および活荷重を概略的に試算し鋼部材の断面を図12(b)のように選んだ。

解析に際しては、コンクリート床版を橋軸方向に32分割、幅方向には4分割したが、橋軸方向中心線についての対称性を利用して、床版幅の半分だけを解析対象とした。鋼上弦材も橋軸方向に32分割し、その他の鋼部材は結合点間を1要素とした。鋼のヤング率を $2.1 \times 10^7 \text{ tf/m}^2$ 、鋼とコンクリートとのヤング率の比を7とした。

以上のような解析法に基づいて、おもにずれ止め剛度およびその配置、荷重載荷状態の差異が合成逆アーチ橋の挙動に及ぼす影響に着目した。

(2) ずれ止め剛度の影響

始めにずれ止め剛度が合成逆アーチ橋の挙動に及ぼす影響を明らかにするために、スパン中央部に集中荷重を載荷した場合のスパン中央部における鋼上弦材の上フランジおよび下フランジ、同位置のコンクリート床版のひずみとずれ止め剛度の関係を図13に示す。コンクリート床版のひずみはその厚さの中央高さについての値である。横軸はスパン全長のずれ止め剛度の合計をスパンで除した単位長さ当たりのずれ止め剛度Cを用いて、 $C = 10^{-1} \sim 10^8 \text{ tf/m/m}$ の範囲について示している。縦軸はひずみの値を、コンクリート床版のひずみは完全合成の場合を100%とし、鋼上弦材

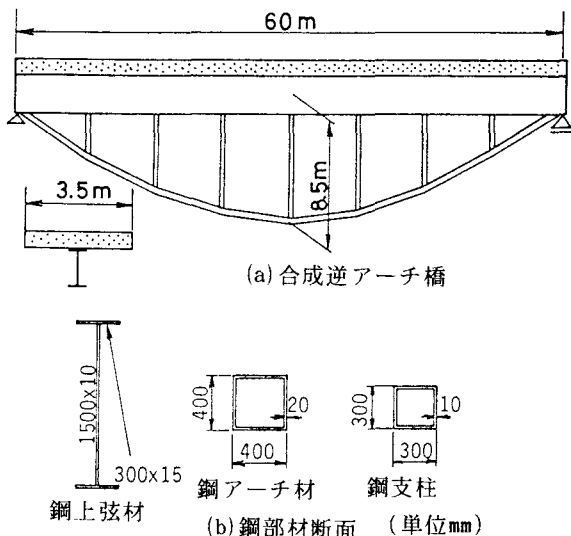


図12 合成逆アーチ橋解析モデル

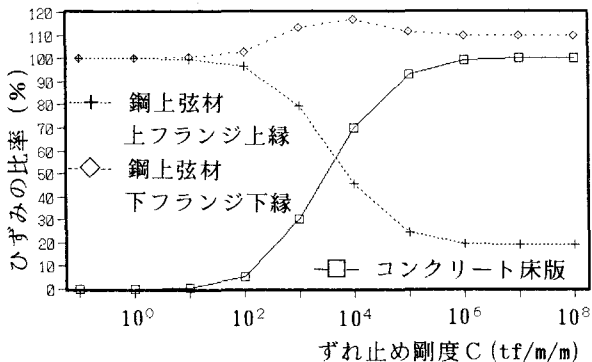


図13 ずれ止め剛度とひずみの関係
(集中荷重12tf、1/2点載荷)

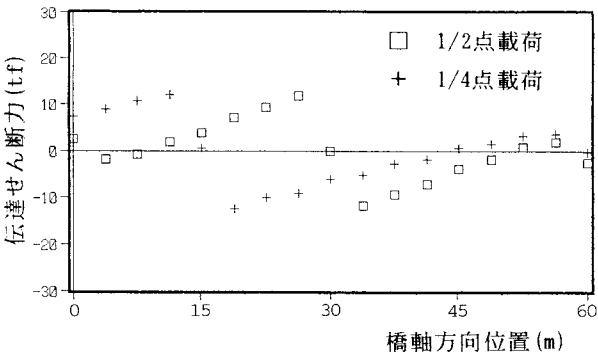
のひずみは非合成の場合を100%とした比率で示している。図から、 10^4tf/m/m 以下のずれ止め剛度では事実上非合成の挙動を、 10^6tf/m/m 以上ではほぼ完全合成の挙動を示すことがわかる。なおこの図は、以下に示す図15のずれ止めの配置タイプ1に対するものである。他のタイプの場合はここには示さないが、ずれ止めの配置タイプによらず同様の傾向が認められた。

ところで、前述の実験のアーチ型のずれ止めの配置では、単位長さ当たりのずれ止め剛度 $C = 4.5 \times 10^4 \text{tf/m/m}$ 程度である。

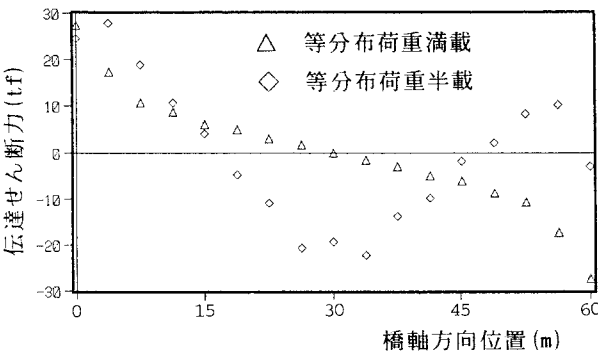
(3) 載荷荷重のタイプの影響

1点集中荷重が載荷される場合には、スパン中央載荷によってアーチからの水平反力は最も大きくなり、1/4点載荷によって上弦材の1/4点の曲げモーメントは最大になる。また、等分布荷重が載荷される場合には、荷重満載時にアーチからの水平反力は最も大きく、端から中央までの半載の時、上弦材の最も大きな曲げモーメントは1/4点近辺に発生することが知られている。そこで、ここではこれらの条件下での合成上弦材のコンクリート床版と鋼部材との間の伝達せん断力の分布を検討した。

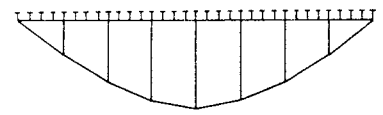
図14(a)および(b)は、ずれ止め剛度 $C = 10^6 \text{tf/m/m}$ 、ずれ止めの配置タイプ3の場合についてそれぞれ集中荷重が載荷された場合および分布荷重が載荷された場合をしめす。縦軸は伝達せん断力を、また、横軸はその位置を示す。なお、集中荷重強度は 12tf 、分布荷重強度は 1.6tf/m とした。集中荷重載荷の場合、載荷点近傍のずれ止めにより大きなせん断力が伝わるのに対して、等分布荷重満載の場合には、アーチ部材からの水平反力が端部のずれ止めから急速にコンクリート床版に伝達されることがわかる。また、半載の場合にも伝達せん断力の分布形状は異なるが、載荷点寄りの端部では、かなり大きなせん断力が伝達されることがわかる。



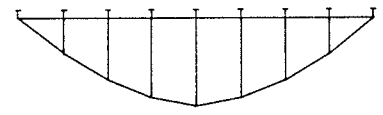
(a) 1点集中荷重 (集中荷重強度: 12tf)



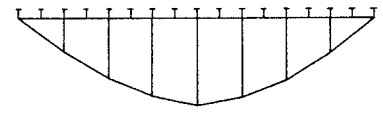
(b) 等分布荷重 (分布荷重強度: 1.6tf/m)



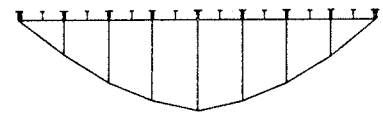
(a) タイプ 1



(b) タイプ 2



(c) タイプ 3



(d) タイプ 4

図15 ずれ止めの配置タイプ

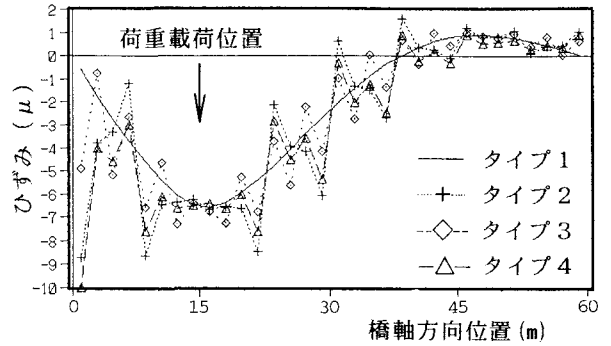
図14 載荷荷重のタイプとずれ止めの伝達せん断力の関係

(4) ずれ止めの配置の影響

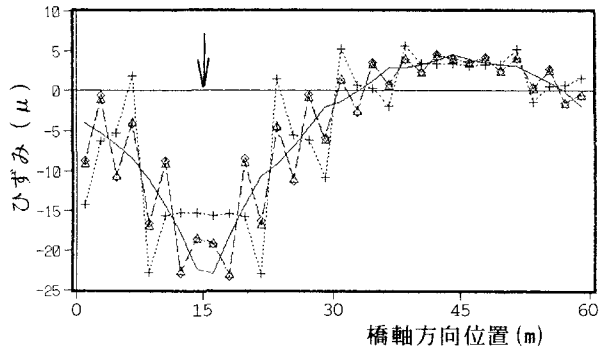
ずれ止めの配置の変化の影響を調べるために図15に示すように4種類のずれ止めの配置を選んだ。タイプ1は全長にわたって均等に配置、タイプ2は格点に集中的に配置、タイプ3は格点と格点間の中央に集中配置、タイプ4はずれ止めの配置形式はタイプ3と同じであるが、格点間のずれ止め剛度に対して両端部のずれ止め剛度を10倍、他の格点のずれ止め剛度を5倍としたものである。つまり、タイプ1はずれ止めを図3のトラス分散型のように配置し、タイプ2はトラス集中型のように配置することに対応している。なお、各タイプの全長のずれ止め剛度の合計は等しくなるようにした。実際の場合、集中配置と言ってもある狭い範囲に複数のずれ止めにを密に配置するか、種類の異なる大きなずれ止めにを配置することになる。

4種類のずれ止めの配置に対して、図16(a)および(b)には、それぞれの単位長さ当たりのずれ止め剛度 $C = 10^3$ および 10^6 tf/m/m の場合のコンクリート床版の橋軸中心線に沿った橋軸方向ひずみ分布を示す。両図とも集中荷重を1/4点に載荷した場合である。ずれ止め剛度 C が大きいほど一般にひずみの値が大きい。また、ずれ止め剛度 C が小さい場合には、端部のずれ止め剛度が大きいほど、載荷点に近い端部のひずみが大きくなっている。しかし、ずれ止め剛度 C によらず、ずれ止めにを離散的に配置した方がひずみ分布の脈動が大きく、逆に分散配置した方がなめらかな分布形状を示すことがわかる。

また、図17(a)および(b)には図16と同じパラメータの場合のずれ止めの伝達せん断力の分布を示す。ずれ止め剛度 C の差異によって、載荷点に近い端部付近のせん断力分布に傾向の差異が認められるが、両者とも概略の分布形状は似ている。しかし、この場合もずれ止め剛度 C が大きい方が伝達せん断力の値は大きい。また、タイプ4のずれ止めの配置における伝達せん断力の分布形状は、ずれ止め剛度 C によって変化することがわかる。

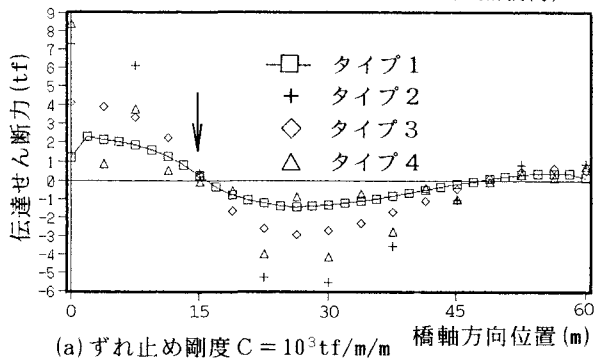


(a) ずれ止め剛度 $C = 10^3 \text{ tf/m/m}$

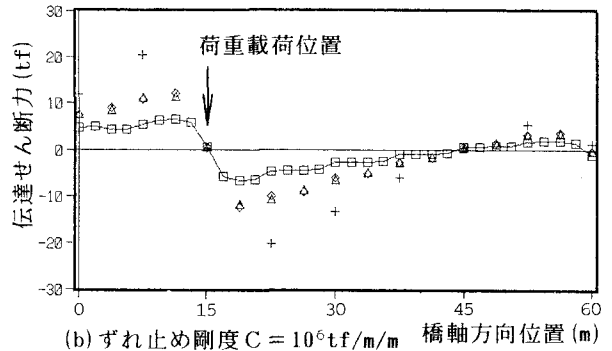


(b) ずれ止め剛度 $C = 10^6 \text{ tf/m/m}$

図16 ずれ止めの配置タイプとひずみ分布の関係
(集中荷重12tf、1/4点載荷)



(a) ずれ止め剛度 $C = 10^3 \text{ tf/m/m}$



(b) ずれ止め剛度 $C = 10^6 \text{ tf/m/m}$

図17 ずれ止めの配置タイプと伝達せん断力の関係
(集中荷重12tf、1/4点載荷)

以上のようにずれ止め剛度あるいはその配置の差異によって、コンクリート床版のひずみ分布あるいはずれ止めの伝達せん断力の分布形状などが種々異なることが明らかにされたが、一般にずれ止めを分散配置した方が、伝達せん断力の分布およびコンクリート床版の応力分布が滑らかであり好ましいと考えられる。

6、まとめ

- 今回の合成逆アーチ橋の実験およびパラメトリック解析の結果から以下のような事項が明らかにされた。
- ①格点間局部載荷によってコンクリート床版がせん断破壊したので、十分なせん断補強が必要である。
 - ②橋端に設けた剛強なずれ止めはコンクリート床版のスプリット破壊を防ぎ有効である。
 - ③アーチ腹部に斜材を入れることにより橋の剛性は増すがアーチ構造のままでも十分対処できるので、美観上などからアーチの方が総合的に優れていると考えられる。
 - ④本研究で用いた解析モデルのずれ止め剛度 C について、 $C \leq 10^4 \text{tf/m/m}$ および $C \geq 10^6 \text{tf/m/m}$ ではそれぞれ事実上、非合成および完全合成としての性質を示し、その間では不完全合成の性質を表す。
 - ⑤荷重満載の場合などでは、橋端においてアーチ材から鋼上弦材に導入された水平圧縮力は比較的短い範囲でコンクリート床版に分担される。
 - ⑥集中荷重の場合などには上弦材の曲げモーメントによりずれ止めに比較的大きな伝達せん断力が生ずる。
 - ⑦ずれ止めの配置は全長に分散配置し、さらに橋端に剛で強いものを配置するのがよいと考えられる。
 - ⑧合成逆アーチ橋の鋼骨組面内およびコンクリート床版の挙動を解析する簡易解析法は全体一括解析法に比べてあまり差異がなく、実用的であることがわかった。

最後に、本研究の一部は文部省科学研究費試験研究(1)(課題番号62850081)の援助を受けて行われたことを付記し、関係各位に謝意を表する。

参考文献

- (1) 阿部英彦・中島章典：合成トラスおよびアーチ橋の実験的研究、第2回合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集、pp.1-6、1989.9
- (2) 浜田純夫・有住康則：不完全合成桁の有限要素解析、土木学会論文報告集、No.265、pp.1-9、1977.9
- (3) Moffatt, K.R. and Lim, P.T.K. : Finite element analysis of composite box girder bridges having complete or incomplete interaction, Proc. of ICE, Part 2, pp.1-22, 1976.3
- (4) 小松定夫・佐々木孝：不完全合成格子桁橋の理論と近似計算法について、土木学会論文報告集、No.329、pp.27-37、1983.1
- (5) 山尾敏隆・崎元達郎・湯治秀郎・川井豊：合成I桁橋の挙動を求める構造モデルと一解析手法について、構造工学論文集、Vol.35A、pp.1197-1204、1989.3

(1990年10月12日受付)