

# 鋼・コンクリート複合ラーメン橋 ——山形自動車道 阿古耶橋——

佐久間 智\*1・柴田 清\*2

## 1. はじめに

阿古耶橋は、図-1に示すように山形自動車道の笹谷IC～一般有料道路・笹谷トンネル間に位置し、図-2のように鋼4径間連続桁と鋼3径間連続複合ラーメン橋で構成される橋長251mの道路橋であり、平成2年10月に完成した。

本稿では、最初に鋼・コンクリート複合ラーメン橋の意義と課題を述べ、次にこの課題を解決するために鋼部材とコンクリート部材を剛結した模型実験を行ったことを記述する。そして最後に模型実験の結果を阿古耶橋のなかの鋼3径間連続複合ラーメン橋の設計と施工に反映させたことを報告する。

## 2. 鋼・コンクリート複合ラーメン橋の意義と課題

### 2.1 鋼・コンクリート複合ラーメン橋の意義

鋼・コンクリート複合ラーメン橋とは、上部構造には自重の軽い鋼桁を用い、下部構造にはRC橋脚を使用して、これらの異種構造部材をRC橋脚頭部にてPC鋼材もしくはスタッドジベル等で剛結することで上部下部構造を一体化させてラーメン構造としたものである。

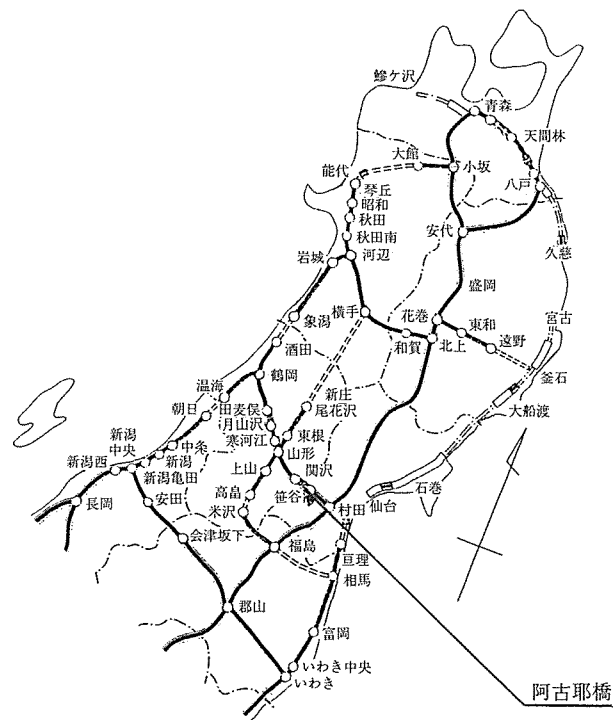


図-1 位置図

橋梁の上部構造と下部構造の接合部には、通常支承が使用されている。しかし、支承は単価が高く、腐食劣化が生じて本来の機能を保てなくなった場合の維持補修は、狭隘な空間での作業を余儀なくされる。つまり、建設段階と管理段階共に橋梁から支承そのものを減らしたほうが、経費節減の方策と考えられる。

高橋脚を有するPC橋では、PC桁とRC橋脚を剛結した連続ラーメン橋が多数採用されており、現在では一般化している。しかし、鋼橋の場合、鋼桁とRC橋脚との剛結構造は、設計・施工に未知な点が多いことから、今まで採用されなかった。

鋼桁とRC橋脚を剛結した鋼・コンクリート複合ラーメン橋は、下記に示す利点が考えられ、今後の新しい橋梁形式の一つとして比較検討の対象となる可能性が十分にある。

- ① 上部構造と下部構造が、一体の剛結ラーメンであ



\*1 Satoru SAKUMA  
日本道路公団  
仙台建設局構造技術課  
課長代理



\*2 Kiyoshi SHIBATA  
日本道路公団  
仙台建設局工務課  
課長

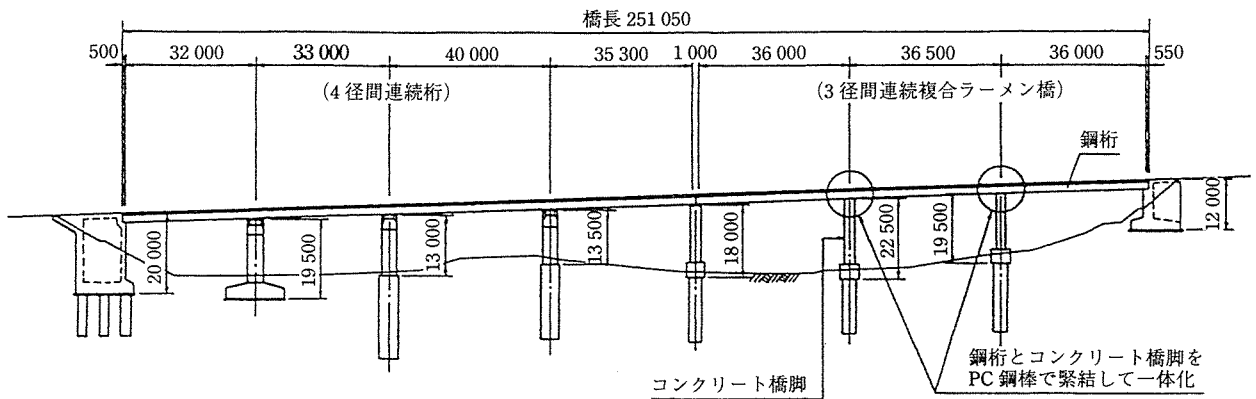


図-2 阿古耶橋全体一般図

るため、不静定次数が高く、耐震性に優れる。また、不静定構造であるため、若干の変状があれば応力再配分がなされ、終局耐力が増す。

- ② 維持管理段階の橋梁の弱点となる支承を減らすことができるため、維持管理の軽減が図れる。
- ③ 地震時の慣性力は、多数の下部構造で負担するため、各下部構造相互のバランスがよくなる。また、橋脚天端が剛結であるため、橋脚下端に発生する地震時断面力が小さくなり、橋脚が経済的となる可能性がある。
- ④ 単価の高い支承を減らすことができるため、建設時のコスト削減を図れる可能性がある。
- ⑤ 鋼橋であるため、コンクリート橋と比べて重量が軽い。このため、比較的地盤が悪い建設地点でもPC連続ラーメン橋のような大きな基礎構造を必要としない。
- ⑥ 上部構造の曲げモーメントを一部橋脚にも負担させることができるため、鋼重を減らせるだけでなく、たわみも小さくできる。

## 2.2 鋼・コンクリート複合ラーメン橋の課題

前述のように鋼・コンクリート複合ラーメン橋には利点が多いが、鋼桁とRC橋脚との剛結部の設計・施工に関する基準等が整備されておらず、類似構造物の施工例も少ないので下記のような課題が考えられる。

### 2.2.1 剛結部の構造

剛結部は、車両による活荷重や地震時の慣性力により発生する断面力（曲げモーメント、せん断力、軸力）を鋼部材とコンクリート部材の間で確実に伝達しなければならない。断面力の伝達方法にはプレストレスによる剛結構造（以下「PC剛結構造」という）と、スタッドジベル等を用いる鉄筋コンクリートによる方法（以下「RC剛結構造」という）などが考えられる。この2つの方法のいずれの剛結構造が適切であるか検討する必要がある。図-3に剛結構造の概念図を示す。

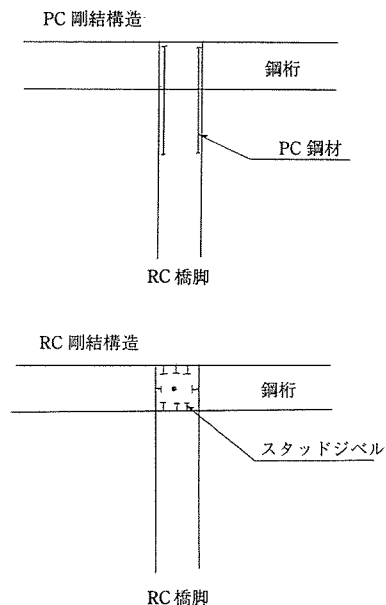


図-3 剛結部の概念図

### 2.2.2 剛結部の設計

剛結部の構造は、従来の支承による支点部とは大幅に異なるため、剛結部の鋼桁の細部構造、PC剛結構造の場合のPC部材と鋼部材との取合い、必要プレストレス量の考え方、RC剛結構造の場合のスタッドジベル等の配置、必要本数などの考え方を整理する必要がある。

### 2.2.3 剛結部の施工

剛結部の施工にあたり、鋼桁の架設、RC橋脚の配筋、コンクリートの打設、さらにはPC剛結構造の場合には、PC鋼材の配置と緊張等の多くの作業が重複する可能性がある。したがってこれらの諸作業がお互いに支障なく行えるように、剛結部の構造詳細を考える必要がある。

## 3. 鋼部材とRC部材の剛結構造に関する実験

鋼・コンクリート複合ラーメン橋における剛結部の課題を解決するために、実橋の設計・施工に先だって埼玉

大学に委託して鋼部材とRC部材の剛構造について数種類の模型実験を行った。

ここでは、阿古耶橋に採用したPC剛構造に対する模型実験について述べる。PC剛構造を採用した理由としては、PC剛構造がRC剛構造と比較して応力伝達が理論的に明確となっているためである。

### 3.1 供試体

供試体を図-4に示す。主桁としてI桁断面の鋼桁を2本並べて、主桁の中央部に鉄筋コンクリートの柱（以下「RC柱」という）を逆T形に接続して、ここを剛結部とした。桁の剛結部は、主桁に2枚の横梁をRC柱の幅と同間隔に設け、RC柱側の桁のフランジはエンドプレートで繋いで箱状の空間を造り、この中にコンクリートを充填した。RC柱は片端をエンドプレートに接し、PC鋼棒（φ21，C種1号）4本をRC柱から充

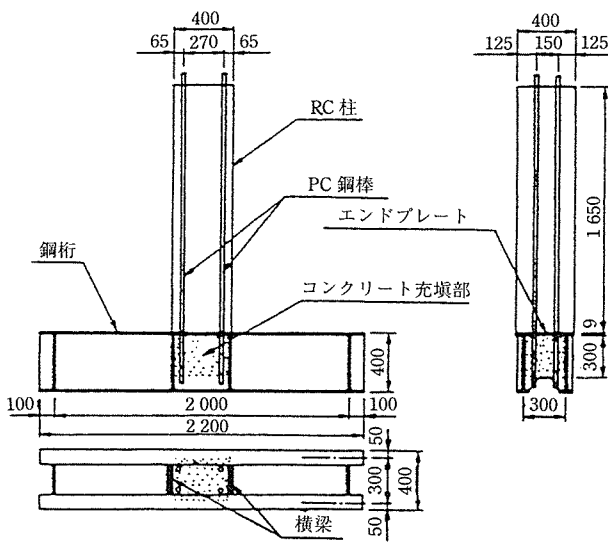


図-4 供試体

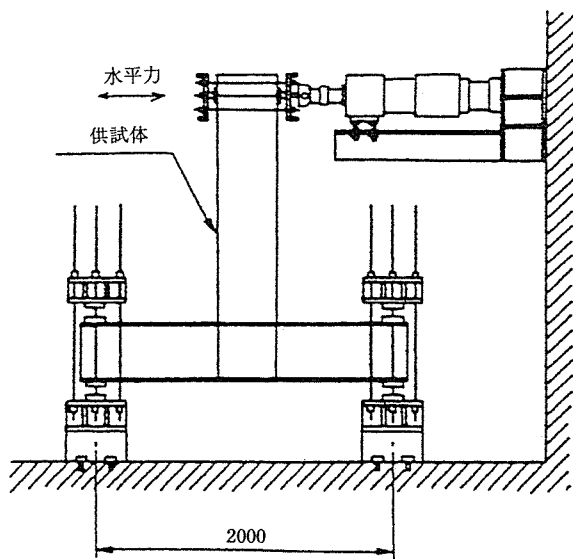


図-5 荷重方法

填コンクリートまで貫いて通し、これを緊張して主桁とRC柱を剛結した。

### 3.2 実験方法

図-5に示すように荷重荷重はRC柱の上端に水平力を与えた。荷重の大きさは、開口荷重（主桁とRC柱の接触面においてRC柱の最外縁にて圧縮応力が0となる荷重で計算上3.2tf）以下の3tfにて百万回の繰返し荷重，開口荷重より大きい7tfにて1万回の繰返し荷重，そして破壊までの静的荷重の3段階である。ここで開口荷重以下の状態は死荷重+活荷重が荷重される常時，開口荷重以上の状態は地震時の影響を考慮する場合を想定したものである。

### 3.3 実験結果

実験結果は、荷重荷重の段階に対応した3つの状態に着目して述べる。

- ① 開口荷重以下の3tfでの主桁の応力分布を図-6に、RC柱の応力分布を図-7に示す。図には梁理論とFEMによる解析値も示している。この図から実験結果と2つの解析値は比較的合っている

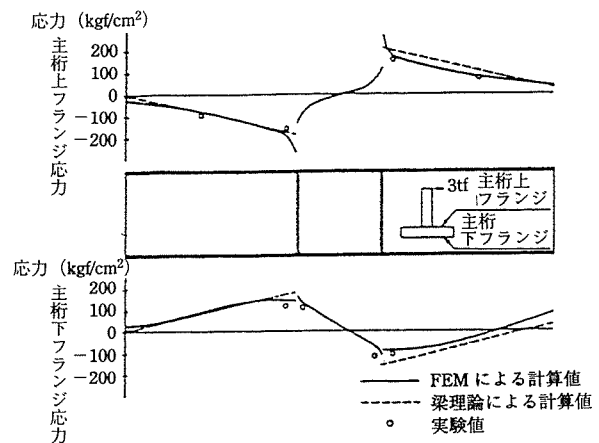


図-6 開口荷重以下での主桁応力分布

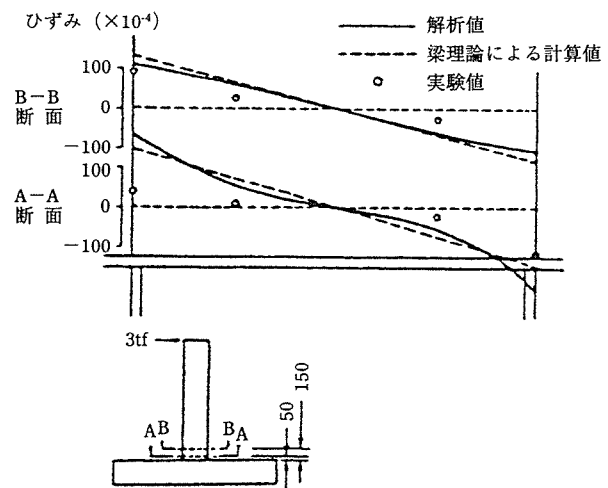


図-7 開口荷重以下でのRC柱のひずみ分布

ことがわかる。

- ② 開口荷重以上の7tfによる繰返し載荷前後の静的載荷による主桁とRC柱のひずみ分布を図-8, 9に示す。載荷前後のひずみ性状はほぼ同様であることがわかる。また、荷重を除去した後は閉口していた。
- ③ 最終的な荷重は17.5tfであった。破壊形態は、まずPC鋼棒が降伏し、次に圧縮側コンクリートが圧壊するものであった。RC梁としての耐荷力計算による破壊荷重は17.1tfであり、実験の破壊荷重(17.5tf)に近い値であった。

以上の実験結果から、この鋼・コンクリート複合構造の剛結方法(PC剛結構造)についてまとめると以下のようになる。

- ① 開口荷重以下の載荷では、たわみ・ひずみともに線形挙動を示し、梁理論による計算が十分に適用できる。

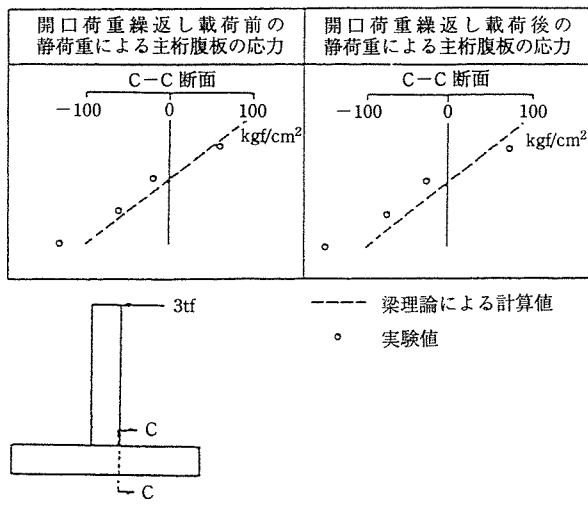


図-8 開口荷重前後の主桁の応力

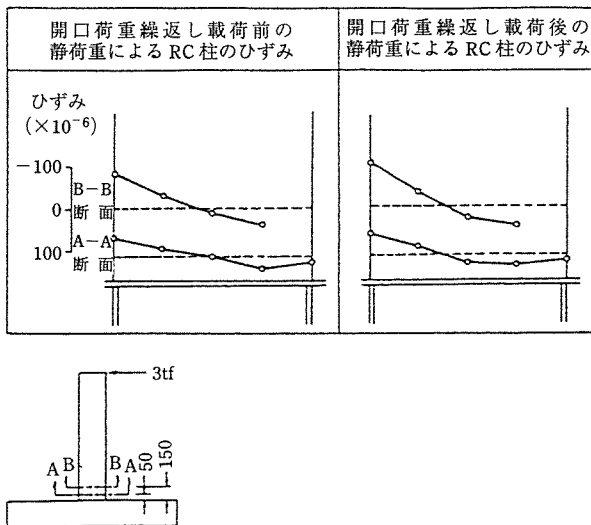


図-9 開口荷重前後のRC柱のひずみ

- ② 開口荷重以上の載荷でも、接合部の各箇所の応力状況等に繰返し載荷の影響は見られず、開口による接合部の劣化はない。
- ③ 破壊は、PC鋼棒が降伏した後に圧縮側コンクリートが圧壊する形態であった。破壊時の実験値と梁理論による計算値はほぼ同じとなった。

#### 4. 阿古耶橋の設計と施工

##### 4.1 阿古耶橋の概要

阿古耶橋の位置と全体一般図は図-1, 2に示すとおりである。鋼・コンクリート複合ラーメン橋は、鋼3径間連続桁の2つの中間支点到箱状の横梁を有しており、コンクリートで充填した横梁をPC鋼棒を緊張することで鋼桁とRC橋脚を剛結構造としている。図-10, 11に剛結部の概要図を示す。

##### 4.2 剛結部の設計

阿古耶橋では、PC剛結構造を前述の「3. 鋼部材とRC部材の剛結構造に関する実験」の「3.3 実験結果」

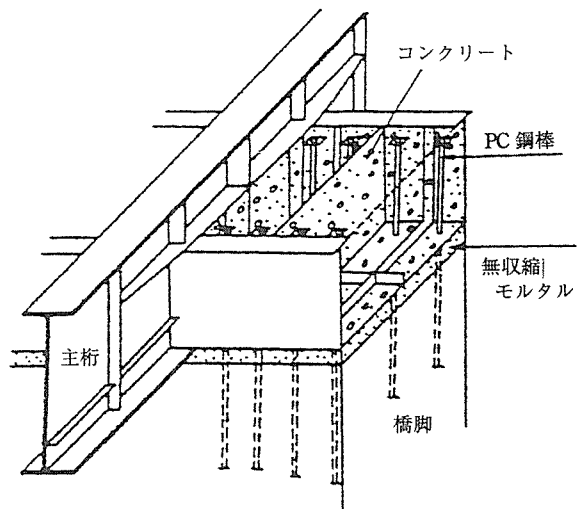


図-10 剛結部模式図

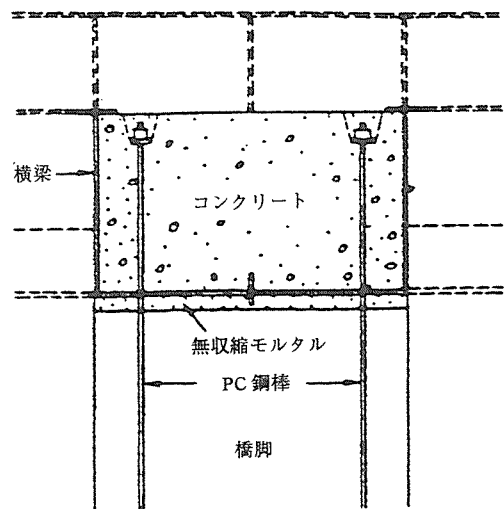


図-11 剛結部横断面

の①～③をもとに採用した。

図-10, 11 に示すように剛結部は、横梁が箱形状を形成しており、RC 橋脚とは無収縮モルタル部にて完全に縁が切れている。ここを剛結構造としているのは、PC 鋼棒による圧縮力のみで、この圧縮力(=プレストレス)の大きさの決定方法が重要である。

本橋は、PC 連続合成桁の1次床版およびプレキャストブロック工法におけるブロック継目部の設計レベルと同等と考えて、プレストレス量を常時状態(死荷重+活荷重)で接合部に引張応力が発生しない(開口しない)ように設定し、PC 鋼棒φ32 (B種2号)を74本配置した。したがって常時状態(死荷重+活荷重)以外の荷重(地震時、終局荷重作用時など)では、部材に引張応力が発生するため、引張側のコンクリート断面を無視して設計した。また、せん断は、プレストレスによる摩擦力によって抵抗するものとした。

#### 4.3 構造解析

構造解析は、鋼の主桁とRC 橋脚を含めた全体系を平面骨組解析にて実験した。上部構造は、5本の各主桁の荷重分配作用を考慮した設計を行うため、ラーメン構造によるRC 橋脚の影響を支点位置で回転バネとして与え、任意平面格子桁として変位法を用いて解析した。これにより、自動設計・作図システムを使用することができることで省力化が可能となった。

今回の鋼・コンクリート複合構造の場合と、通常の連続桁の場合において、主桁に発生する曲げモーメントの比較を図-12に示す。複合構造とした場合、連続桁に比べて支点部のモーメントが大きくなるが、径間中央部で2割程度小さくなる。支点部では、横梁内で応力が減少し、横梁外側を設計断面として考えられるため、ピーク値よりも5～10%小さい値で設計できた。また、たわみ量も通常の連続桁より約50%程度小さくなった。

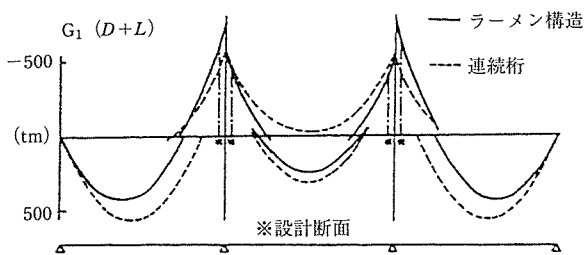


図-12 ラーメン構造と連続桁の曲げモーメント

#### 4.4 無収縮モルタル注入試験

鋼・コンクリート複合構造の剛結部については、前述の「3. 鋼部材とRC 部材の剛結構造に関する実験」において模型供試体を作製し、実験や解析を実施したが、実橋に適用するにはいろいろな問題があった。

問題の一つとして、横梁底部とRC 橋脚の天端の接合部を密着させるため、約100mmの空隙に無収縮モルタルを充填させることがある。本橋のように主桁や横梁下面にHTB等の凹凸がある箇所への施工例は少ないため、実物の部分的な模型によりモルタルの注入試験を2回実施して充填性の確認と施工方法の確立を図った。

この試験の主な目的は下記のとおりである。

- ① できるだけ実橋と同様なモデルによる施工方法の確立と作業手順を把握すること。
- ② 空隙を無くして、充填率を上げるための構造を検討すること。
- ③ 注入グラウト材の使用状況と信頼性の確認

図-13に実験モデルを示す。実験においてモルタルの注入状況が上より確認できるように透明アクリル板を用い、主桁下フランジ、横梁添接板およびHTBなども実橋と同じように設置し、かつ、実験モデルを固定するコンクリート架台もRC 橋脚天端と同じく縦横断勾配をつけて設置した。

材料は、実績のあるセメント系無収縮モルタル(マスターフロー870)を使用することとした。注入方法は比較的柔らかいモルタル(コンシステンシー7秒/Jロート)を用い、ヘッド圧( $h=2$ m)を利用して行った結果が良好であったため、実施工はこの方法により実施した。

充填する間隙中にあるライナー・シースおよびHTB等は、充填に及ぼす影響は少なかったが、主桁の下フランジや添接板に沿って空気が逃げずに部分的に空隙が発見されたため、これらの位置に空気排出孔を重点的に設置した。この結果、平均充填率99%と良好な結果が得られた。

充填したモルタルを抜き取りコア供試体として圧縮試験を実施した結果、橋脚のコンクリート強度350kgf/cm<sup>2</sup>に対して600kgf/cm<sup>2</sup>以上となり、十分な強度が確認できた。

#### 4.5 実橋載荷試験

橋梁完成後、トラックによる静的載荷試験を実施することで剛結構造であるP<sub>6</sub>橋脚上の中間支点の横梁・PC 鋼棒および無収縮モルタルの応力発生状況について、理論値と実測値の比較検討を行った。

図-14に示すように応力測定は、横梁のウェブ(C<sub>1</sub>～C<sub>18</sub>)、PC 鋼棒(P<sub>1</sub>～P<sub>14</sub>)、接合部の無収縮モルタル部(K<sub>1</sub>～K<sub>6</sub>)にひずみ計を設置して行った。荷重の載荷は、1台当り総重量22tのトラックを4台用いて、中央径間(CASE 1)と側径間(CASE 2)に載荷した場合について実施した。理論値は詳細設計で使用した平面格子解析(GRID)と、平面骨組解析(FRAME)により、載荷荷重位置と載荷荷重に基づいて算出した。ただし、

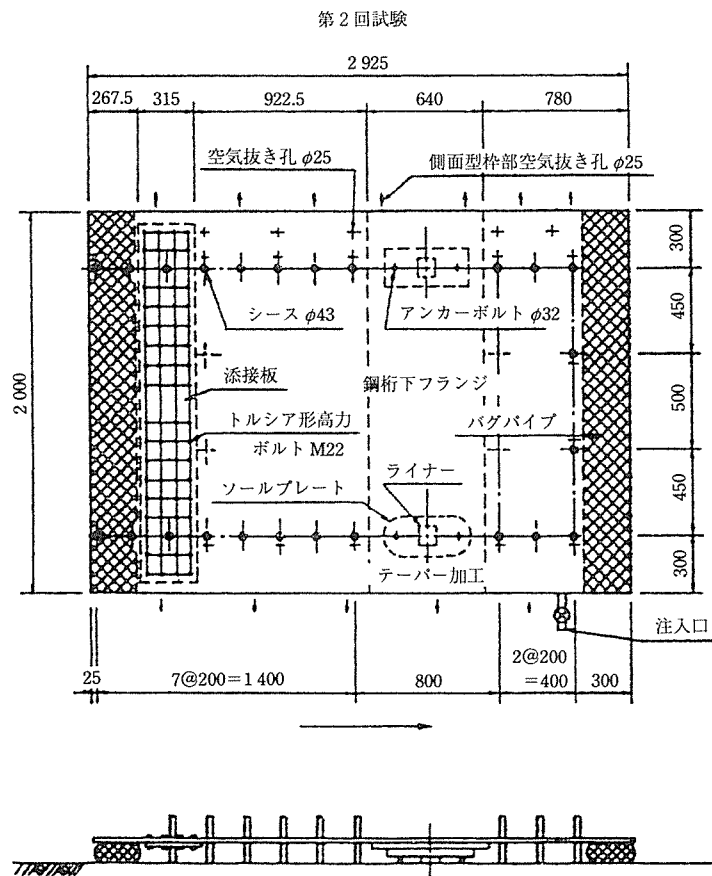
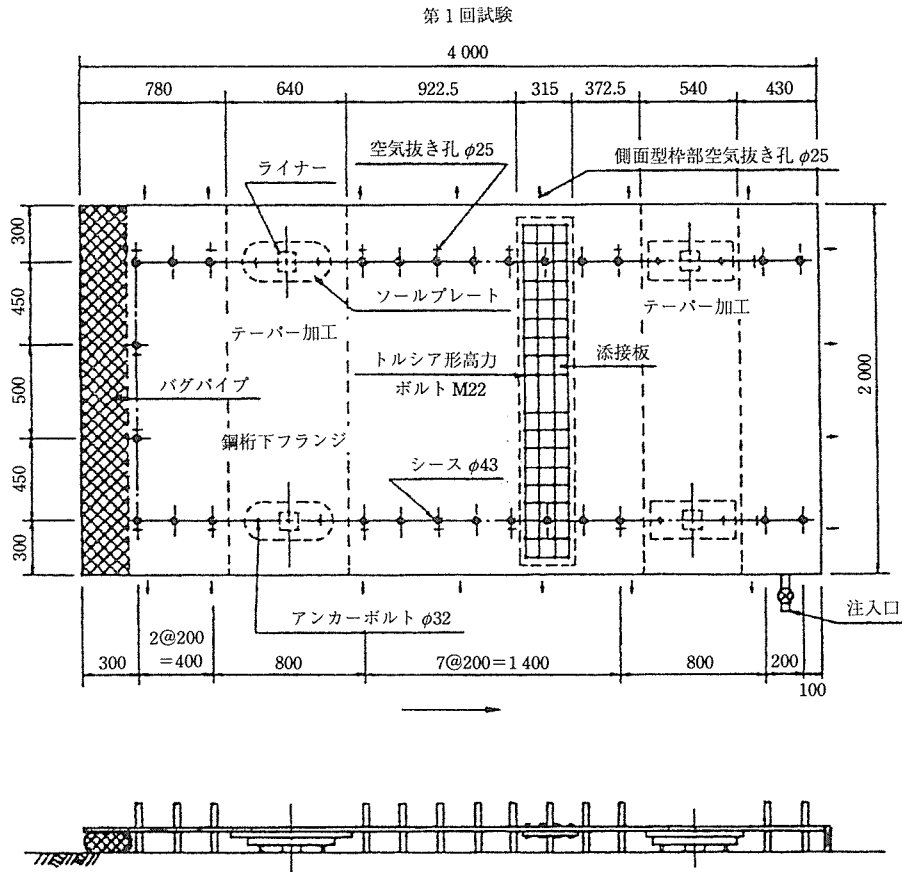


図-13 実験モデル

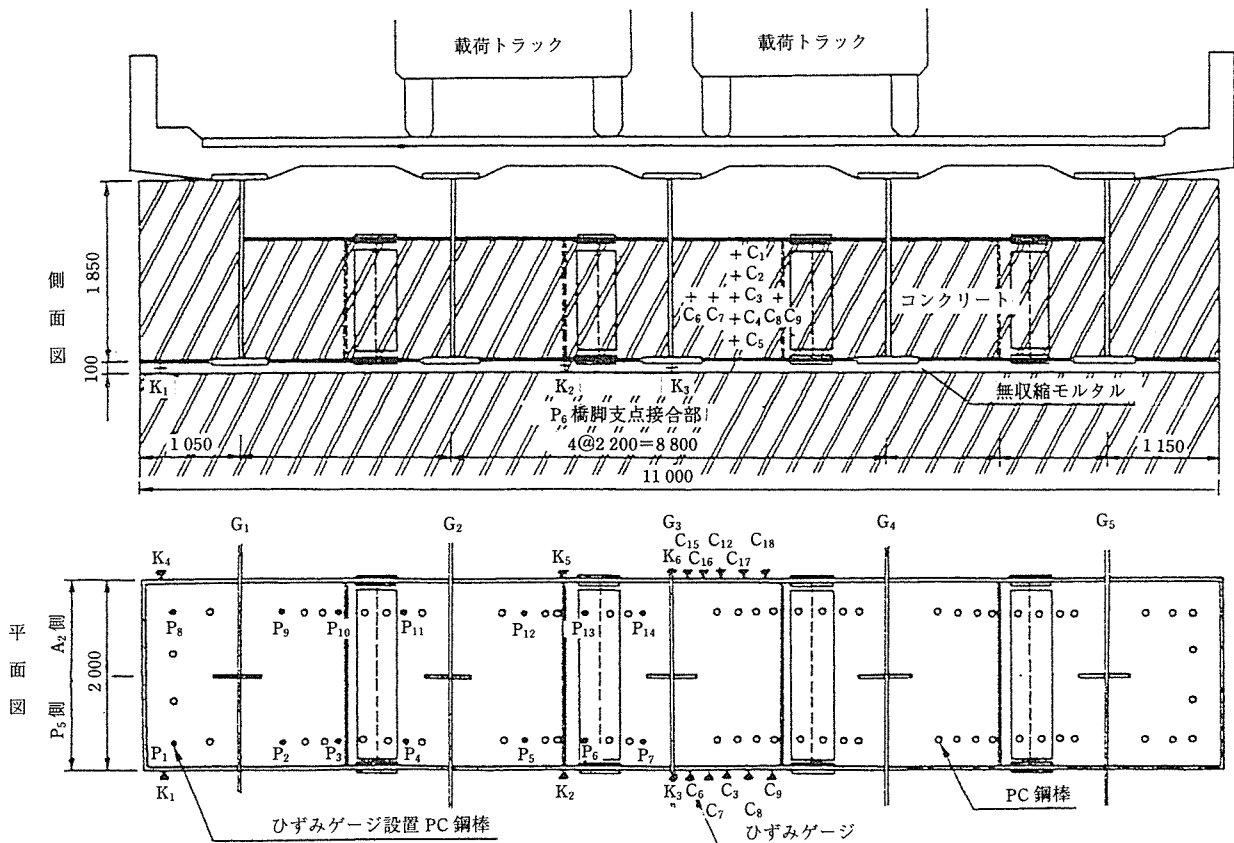


図-14 測定機器配置図

横梁部は主桁の断面は無視して、横梁内のコンクリート・PC鋼棒および横梁腹板の合成断面と仮定して理論値を算出した。

図-15は理論値と載荷試験により得られたPC鋼棒と無収縮モルタル部の応力を示し、図-16は横梁腹板の応力である。PC鋼棒の応力は、測定箇所P1とP8を除

いて30%程度の低い値であった。無収縮モルタル部の応力は、CASE1のK3やCASE2のK6など荷重が載荷された径間側の主桁直下にある測定点では理論値よりもかなり大きくなっている。また、横梁腹板の鉛直応力と水平応力の分布についても、CASE1のC6やCASE2のC15などは、荷重が載荷された径間側の主桁付近の

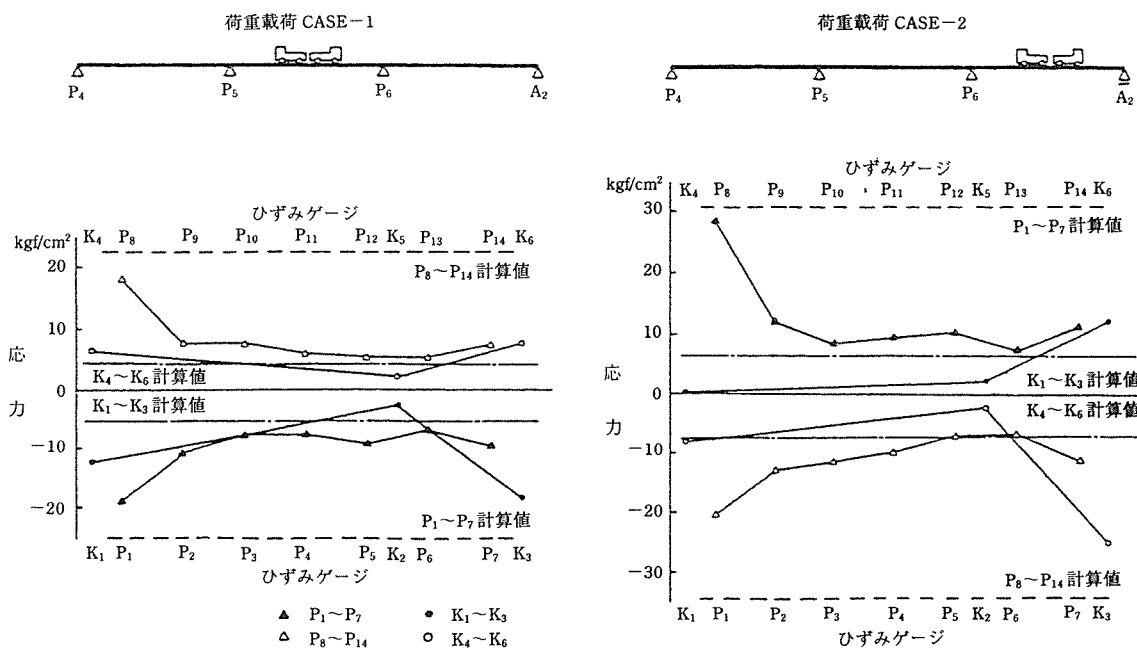


図-15 橋脚接合部無収縮モルタルおよびPC鋼棒応力測定図

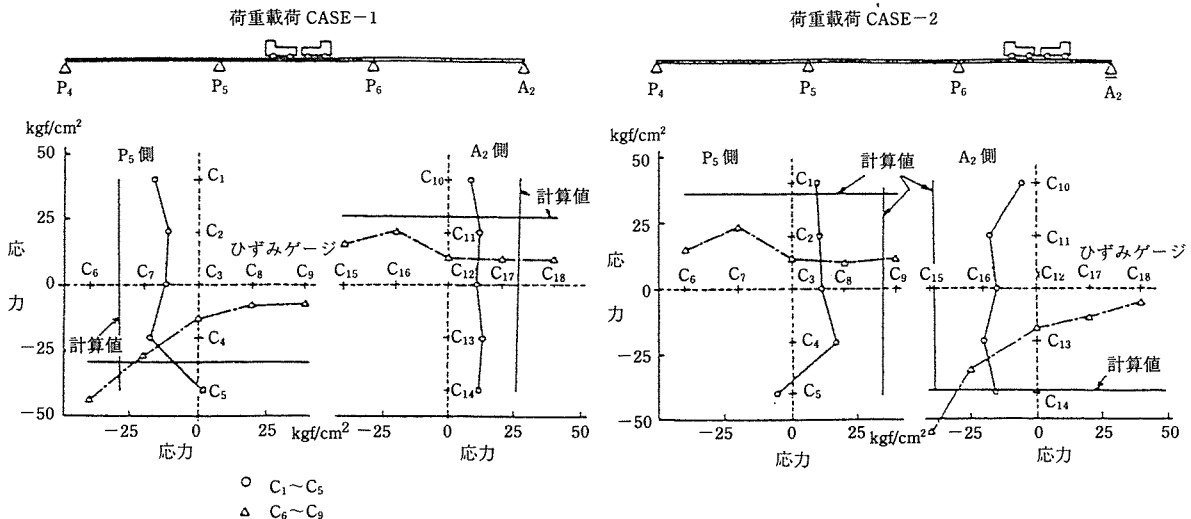


図-16 橋梁部腹板応力測定図

横梁では理論値よりも大きな応力であるが、それ以外は理論値よりもかなり小さな値であった。

PC 鋼棒および横梁腹板の応力が、全般的に低い値であったことは、構造解析により算出した理論値が合成される鋼板として厚さ 11 mm の横梁腹板のみを考えているが、実際には主桁の腹板ダイヤフラム等が存在するため、これらによる合成断面性能が増したためと考えられる。

また、主桁付近の横梁や主桁直下の無収縮モルタル部において応力が大きくなったのは、主桁から RC 橋脚への荷重伝達を設計上では主桁から横梁に一樣に伝達した後、RC 橋脚に伝わると考えたが、実際の荷重の伝達はその一部が主桁から横梁、横梁内コンクリートを介して RC 橋脚に伝わり、一部は横梁内の主桁腹板や主桁フランジから横梁内コンクリートや RC 橋脚に直接伝わる等の複雑な力の流れになっているためと考えられる。

また、主桁付近以外の横梁各部の応力は、いずれも低い値であり、それらの差が少ないことから、柱頭部に対して大きなねじり等は発生していないと考えられる。

この荷重試験の結果から、阿古耶橋に採用した平面格子解析と平面骨組解析の組合せによる構造解析の考え方は妥当な結果であり、剛結部の安全性も十分であると判断できる。

### 5. あとがき

これら述べたように、鋼・コンクリート複合ラーメンという新形式を阿古耶橋に試験的に採用したが、今回採用した PC 剛結構造は、下記に示す問題点があると思われる。

- ① 予め PC 鋼棒を RC 橋脚の天端に配置して箱状に製作した横梁の底板に孔を開け、PC 鋼棒を貫

通する構造としたため、剛結部の構造が複雑であり、主桁と横梁の架設時の施工性が劣る結果となった。

- ② 横梁の底板と RC 橋脚天端とのすき間への無収縮モルタルの充填は、確実な充填を行うために入念な施工が要求されるが、狭隘な空間の作業でもあり、施工性の改善が必要である。
- ③ 一般の鋼連続桁と比較して、主桁の重量は約 5～6 % 減少したが、剛結部に横梁部を用いて PC 鋼棒によるプレストレスを与える方法を採用したこと、横梁部の設計を安全側として行ったため、横梁部の重量が 18 t 発生した。横梁部の必要性はもちろん、設計理論を確立することで鋼重の軽減を図り、経済性を図る必要がある。
- ④ 初めての構造を採用したことから、安全側を考えて PC 鋼材量を配置したために従来の連続桁と比較して経済的な利点はあまりなかった。

今後において、剛結部は今回の阿古耶橋に採用した横梁部を有する PC 剛結構造に限らず、スタッドジベルを用いた RC 剛結構造などの構造細目（横梁の必要性も含めて）が整備され、施工性・経済性等に優れた剛結構造を採用することで鋼・コンクリート複合ラーメン橋の特徴を生かした橋梁形式を検討していきたいと考えている。

### 参考文献

- 1) 紫桃孝一郎、長江進：鋼とコンクリートの複合構造——山形自動車道 阿古耶橋——、日本道路公団技術情報、No. 111, pp 23～29, 1992. 1
- 2) 半田徹：鋼とコンクリートの複合構造——阿古耶橋について——、橋梁, pp 3～7, 1991. 7

【1994年11月29日受付】