

(15) 鋼・コンクリート複合梁軸方向接合部の性状

STUDIES ON BEHAVIOR OF AXIALLY JOINTED HYBRID
BEAMS OF STEEL AND CONCRETE

田島二郎*

町田篤彦**

青木圭一***

Jiro TAJIMA, Atsuhiko MACHIDA, Keiichi AOKI

Experimental and analytical studies were carried out on axially jointed hybrid beams of steel and reinforced concrete. Until the load level at which no tensile stress was developed at the contact face between steel and reinforced concrete, the beam behaved completely linearly. However, when the load reached such a level that tensile stress is developed, its behavior was no longer linear, and the stresses in reinforcing steel and concrete increased rapidly. No slip between steel and concrete was observed, and the shear force was considered to be transferred through friction. The shear force did not have any significant effect on the ultimate load carrying capacity of the joint.

1・まえがき

現在、構造物を合理化するために、種々の形式の構造物が開発され採用されているが、鋼とコンクリートの複合構造は、その有力なひとつとして様々な分野において研究され用いられている。建築の分野では、SRC構造が大正の初期から高層建築などに使用されており、1978年の宮城県沖地震によって大きな地震力を受けたが、構造体には特に大きな被害はなく、その安全性も確立されている。土木の分野でも、SRC構造は広く用いられ、東海道新幹線の馬込高架橋もSRC構造であり、鉄道構造物に対するSRC規準も、1976年に制定されている。その他、合成ばりや合成床、合成トラスなど様々な合成構造も建築の分野だけでなく土木の分野でも積極的に用いられてきている。しかし、鋼とコンクリートの特性をさらに発揮させ、より合理的な構造物を建設するためには、従来の構造形式にとらわれず、自由な組合せによって構造物を作り上げることが必要である。

異種材料の部材を一つの構造物に、適宜それぞれの特性を生かして用いることは、新しいことではなく、1864年に架けられたイギリスのクリフトン吊橋など、タワーは石造、桁は鉄というような構造は、100年以上の年月に耐えている。しかし、異種部材の組合せによる複合構造の総合的な研究が始められたのは1970年代であり、最近では、1972年竣工のクルト・シューマッハ橋、1979年のフレイエ橋などが有

*	工博	埼玉大学教授	工学部建設工学科	(〒338 埼玉県浦和市下大久保255)
**	工博	埼玉大学教授	工学部建設工学科	(〒338 埼玉県浦和市下大久保255)
***		埼玉大学大学院	工学部建設工学科	(〒338 埼玉県浦和市下大久保255)

名である。鋼とコンクリートを組み合わせた複合構造は非常に合理的な構造物と考えられ、例えば橋脚コンクリートと鋼桁を一体としたT形ラーメン構造の橋では、桁の重量が軽量化し、しかも高価で、保守にも問題を生じ易い支承を使わずに済むなどの利点がある。また、連続桁では、中央径間を鋼、側径間をコンクリート構造とすることにより橋梁の軽量化がはかられる。このように土木構造物に一般的に用いられている鋼とコンクリートを材料とすることにより、更に経済性に優れた構造物の建設が可能となる。

本研究は、鋼部材と鉄筋コンクリート部材をプレストレスにより軸方向に接合した複合構造の梁において、梁の挙動すなわち接合面の挙動及び歪、破壊の状況について実験、解析したものである。

2・供試体及び実験概要

実験に用いた供試体の形状は次の事を考慮してこれを定めた。①接合面にせん断力を生じさせるために中央一点載荷とし対象形とするため接合部は二ヶ所とする。②破壊を鋼桁と鉄筋コンクリート桁の接合部に起こさせる。この場合、コンクリート桁の接合面における鋼桁からの摩擦力の方向が、載荷方向と逆方向となり破壊を助長するようにさせるために中央にコンクリート桁、両側に鋼桁を配置することとした。以上から、供試体は図1に示すものとした。

供試体の製作にあたって、中央の鉄筋コンクリート桁は鋼桁端面を型枠としたが、別々に養生した後、三者をPC鋼棒のプレストレス力によって軸方向に接合した。実験は鋼桁部の長さを100cmとしたし供試体2体、同70cmとしたS供試体2体の2種類合計4体について行った。

鉄筋コンクリート桁は矩形断面で、PC鋼棒を通すためにコンクリート打ち込み時に下縁から15cmの位置にシース管を入れた。この位置は、プレストレス力導入時に接合部に全く引張力も生じさせないように定めたものである。また、下縁から4cmの位置には、D19の軸方向鉄筋3本を配置した。これは鉄筋コンクリート桁中央部付近が曲げによって破壊することを防ぐためである。鋼桁は、I形断面ばかりで、用いた鋼材はすべてSS41である。接合部の詳細図を、図2に示す。鋼桁端に厚さ6mmのエンドプレート及び両側面に10mmのカバープレートを溶接し、この箱形の部分にコンクリートを充填して、4本のPC鋼棒の定着部とした。なお、エンドプレート厚及びコンクリート充填量は、この部分で破壊が起こらないように定めた。プレストレスは、PC鋼棒1本当たり20t、合計80tを目安として導入した。載荷は、最大容量100tのアムスラー型試験機を用いて行い、両端単純支持、中央一点載荷とした。載荷にあたっては、接合部下縁側において導入したプレストレスの効果がなくなり、応力が0になる時の荷重の1/2、1、3/2倍の荷重をそれぞれ3回ずつ繰り返したのち、破壊にいたる

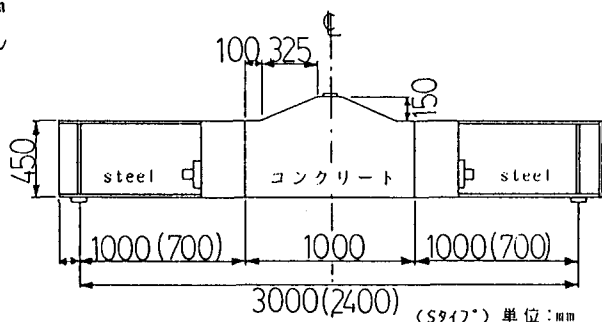


図1 供試体

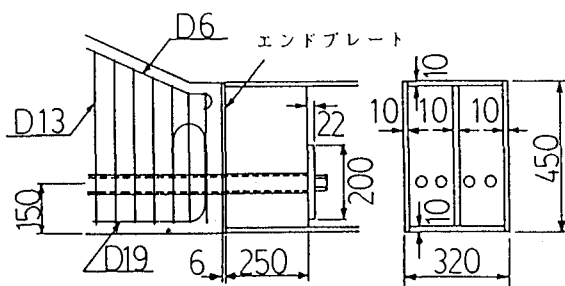


図2 接合部詳細

まで載荷した。測定した項目は、接合部の開口量、コンクリートとP C鋼棒、鉄筋、鋼桁のひずみなどである。

3・解析方法

上述の供試体では、鋼とコンクリートをP C鋼棒により緊結一体としているために、荷重がある値を超えると接合部下縁は開口する。以下、この時の荷重を開口荷重と呼ぶことにする。後で詳述するように、荷重が開口荷重以上になると構造物の挙動は非線形となる。そこで、解析方法として、(1)開口現象を起こすまでの線形範囲内の解析方法として、従来から適用されている2次元FEMを用いた解析と、(2)鋼桁とコンクリート桁との接合部の非線形挙動を解析するための単純梁理論と2次元FEMを用いた解析の計2種類の方法を採用した。なお、(1)、(2)の解析方法とも供試体が左右対象な事から1/2モデルについて解析した。また、コンクリート充填部は、ヤング率の比で鋼に換算している。

(1)の解析方法については、従来のFEM解析と同様の手法である。また、プレストレス力は外力として入力している。

(2)の解析方法は、鋼桁端の変位を単純梁理論により求め、それに基づいてコンクリート桁の変位と応力を2次元FEMで解析する方法である。鋼桁及びコンクリート桁の変位と応力が求まった際に構造物として一体性を保つには、鋼桁及びコンクリート桁が与える外力が互いに釣り合っていないといけない。つまり、プレストレス力とコンクリート反力が釣り合い、かつ荷重によるモーメントとプレストレス力及びコンクリート反力によるモーメントが釣り合っていないといけない。そこで、釣り合いが保たれていない場合は、鋼桁の鉛直変位及び水平変位を修正して反力及びモーメントが釣り合うまで繰り返し計算を行う。この釣り合いの繰り返し計算方法の概略を図3に示す。図3-(a)のようにプレストレス力がコンクリート反力よりも大きな場合には鋼桁をコンクリート桁側へ移動させ、逆に図3-(b)のように小さな場合には、鋼桁をコンクリート桁から離して釣り合いを取らせる。また、図3-(c)のように荷重によるモーメントがプレストレス及びコンクリート反力によるモーメントより大きな場合には鋼桁を下方へ移動させ、図3-(d)のように小さな場合には、鋼桁を上方へ移動させ釣り合いを取らせるのである。

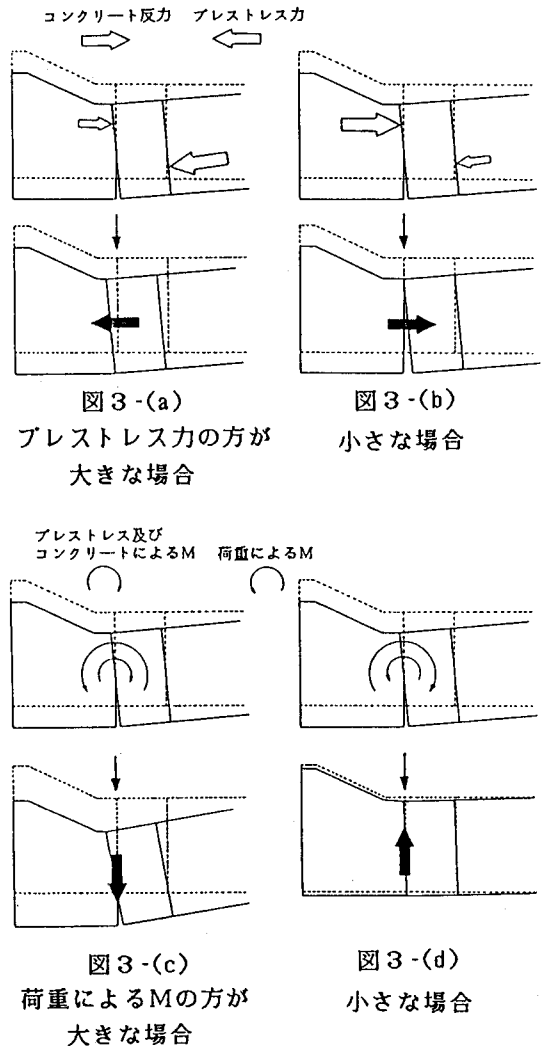


図3 外力の釣り合せ方法の概略

4・実験結果及び解析結果

開口荷重は、部材を曲げと軸力のみを受けるものと仮定し、コンクリートのヤング率を $3.5 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ とした弾性梁理論による計算で約24トと算出され、(2)の手法による解析結果(図4 荷重-開口量の関係参照)からも約25トと算出されている。また、解析値は荷重が大きい場合に実験結果と良く対応しているが、実験値は载荷の初期から開口現象が見られる。これは接合面のキャッピングを施さなかったのが原因であると思われる。しかし、実験結果で開口量が急増し始めるのは、約24トで解析値とよく一致している。すなわち、開口現象は、接合面において導入したプレストレスが働かなくなった際に始まるのである。図4中線形解析値とはコンクリートの応力-ひずみ関係を線形とした解析値のことであり、非線形解析値とは非線形応力-ひずみ関係を用いた解析値のことである。

図5に、(2)の解析により得られたコンクリート桁部接合面の変位を示す。図に見られるように、荷重0トでは、プレストレスにより箱詰コンクリート部の下縁を最大とした軸方向変位がコンクリート桁側にまでおよんでおり、荷重の増加とともに下縁の変位は減少し上縁の変位が増加に転換している。また、コンクリート桁接合面は荷重30トまではある点を軸として直線的に変位しているが、40トからは上部の変位が急増している。これは、

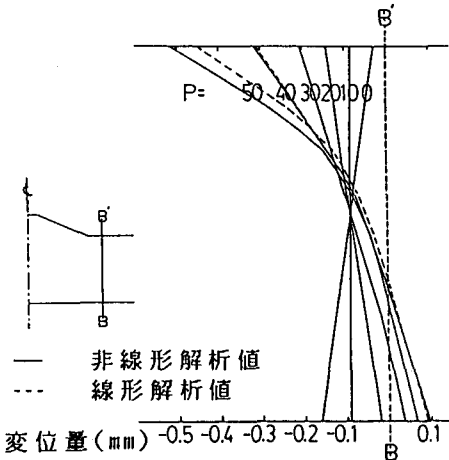


図5 接合面の変位

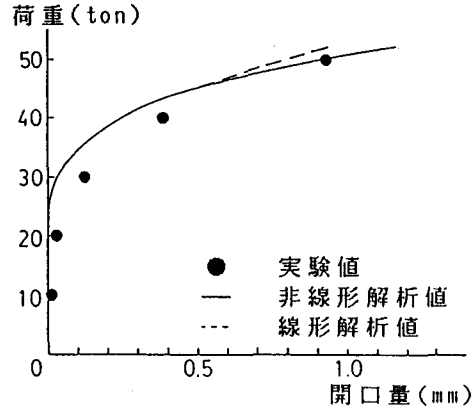


図4 荷重-開口量の関係

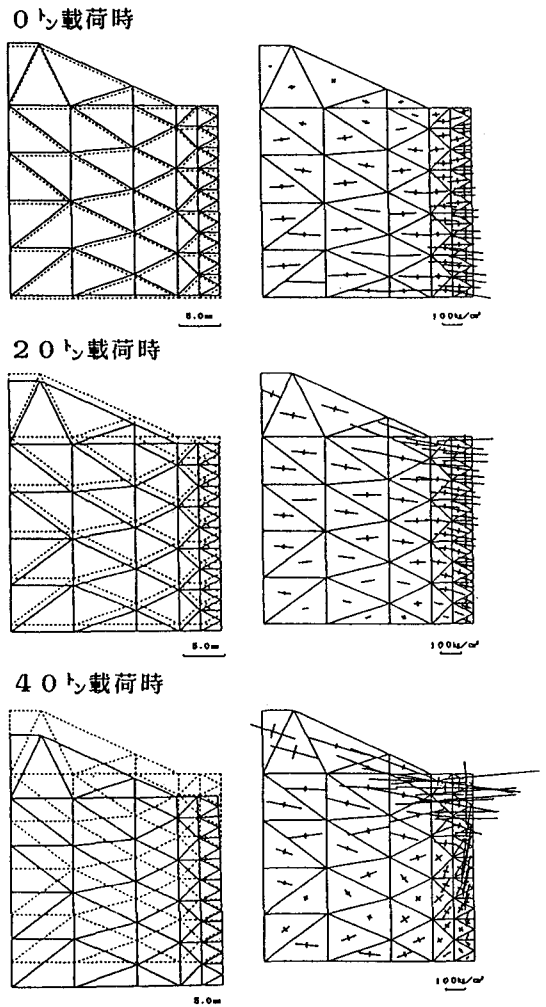


図6 コンクリート桁の主応力図、変位図

30tまではプレストレス力がコンクリート桁部全面に働いており、30t以降では接合部上縁の歪が急増したためである。

また、図6のコンクリート桁部の主応力図及び変位図においてもこの状況が起こっていることが示されている。図のように荷重0tでは下縁に大きく圧縮力が働くが、荷重40tではこれが上縁に集中し、下縁に引張力が生じる。すなわち、圧縮力は下縁から上縁に移行し、開口現象が始まるとこの圧縮力は上縁に更に集中するのである。また、実験では、この圧縮応力の集中により約50tでひびわれが接合面から発生したものの圧壊までに至っていないことが示された。しかし、このような結果が得られたのは後の表1に示すようにコンクリート強度を400kg/cm²以上と高かったことが一因と考えられる。また、曲げ引張ひび割れはタイプではそれぞれ36t、40t載荷時に発生しており、30t以降に下縁の応力が圧縮から引張へ移行するという解析結果から30t以降でひび割れが起こるといふ裏付けが出来る。破壊性状は、接合面から発生した軸方向ひびわれが荷重の増加にともない発達し、接合部コンクリート上縁2cm程が剝離し圧壊した。剝離したのは、コンクリートのかぶり部分であり、ここに、鋼桁からの応力が集中して作用したものである。

図7に接合面付近におけるコンクリート上縁の軸方向歪を示す。この図より、実験値は接合面から3cm、解析値は同じく3.33cmの値であるため、解析値は比較的小さめであることを除き全体的な傾向はほぼ一致していることが分かる。また、この図からも、荷重30t以降ではひずみが増大しており、接合面上縁に圧縮力が集中している傾向をうかがい知ることが出来る。

図8は荷重とプレストレス増加量との関係を示すものである。同図より解析値と実験値とは非常に良く一致しており、荷重30tまでは線形的に増加しているが、それ以後は非線形に増加していることが認められる。

(1)の解析方法により求めた荷重20t時の梁の上面及び下面の応力分布を図9に示す。図のように鋼桁部及びコンクリート桁部のいずれにおいても、実験値、解析値、梁理論による計算

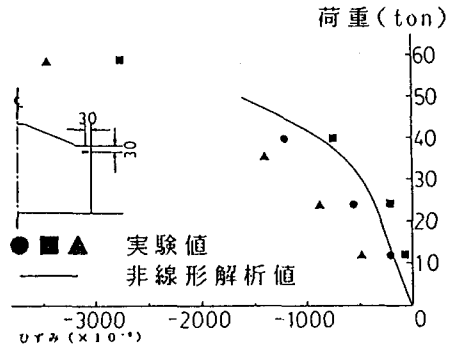


図7 コンクリート上縁の軸方向歪

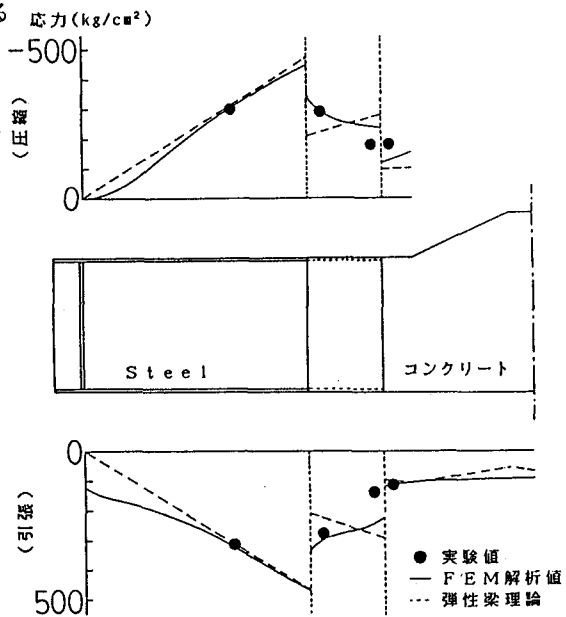


図9 上下面曲げ応力の分布

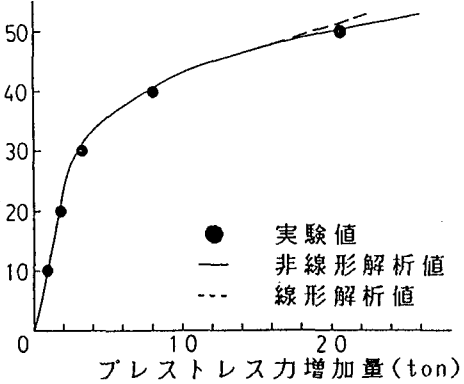


図8 荷重-プレストレス増加量の関係

値とも良く対応している。しかし、箱詰めコンクリート部では、解析値と実験値はある程度の対応はしているが、梁理論による計算値は適用できないことが分かる。この原因は、梁理論の計算にプレストレスを考慮に入れていない事が上げられる。また、箱詰コンクリート部では、鋼桁に比べて応力は大きくない。これは、箱詰コンクリート部はPC鋼材を定着させるために剛性が高くなり応力を分散してしまうためである。さらに、この種の接合ではコンクリート桁から直接受けるのは圧縮力だけで、引張力はPC鋼棒を介して受けるために応力の乱れが心配されたがコンクリートを充填したため圧縮、引張側とも均等な応力分布となりコンクリートを充填した効果が十分現れている。

以上の結果は、Lタイプについて述べたが、Sタイプについても同様の結果が得られている。

表1に複合構造継手部の終局強度を示す。表中の破壊荷重の計算は、通常行われる鉄筋コンクリートの曲げ圧縮破壊耐力算定式によっており、せん断力の影響は含まれていない。この表に見られるようにS-1タイプについては、供試体製作時にコンクリート接合面上縁が傾斜してしまい均等に反力を受け持たなくなり、偏心が大きかったために実験値と計算値が一致していないが、その他は良く一致している。このことは、接合部の終局強度にはせん断力は影響していないことを示している。

表1 終局強度

タイプ	破壊荷重(ton)		Pu/Pun	コンクリート強度 (kg/cm ²)			
	計算値	実験値		PC導入時		試験時	
	Pun	Pu		コンクリート部	接合部	コンクリート部	接合部
L-1	70.4	69.0	0.98	496		446	441
L-2	72.1	69.2	0.96	508	443	517	441
S-1	100.7	84.6	0.84	460	458	466	481
S-2	98.1	94.2	0.96	416	535	420	517

5・結論

1) 接合面に開口現象が生じるまでは、変位、ひずみ及びプレストレス力などは線形的に増加するが、開口現象が生じた以後は非線形に増加する。すなわち、開口を生じるまでは、鋼とコンクリートを結合した梁では、いわゆる梁理論と呼ばれる計算が適用できると思われる。

2) 開口後の構造物の挙動は非線形となり、PC鋼棒のひずみ、開口量及び接合部コンクリートの応力などが急激に増大するため、設計上常時繰り返される荷重は、開口現象を起こす荷重までにするのがよい。

3) 接合部のせん断力によるずれは無く、摩擦によりせん断力は伝達されている。

4) 接合部コンクリートの終局強度には、せん断力は影響していない。

5) 今回の実験及び解析では、コンクリートを充填した箱詰部の挙動及び応力伝達等については詳しくその性状を調べられなかったが、供試体で示すような簡単な構造で充分応力は伝達されていると思われる。