

プレストレスによる鋼部材と鉄筋コンクリート部材の 軸方向接合工法に関する研究

PERFORMANCES OF LONGITUDINAL JOINT BY PRESTRESSING BETWEEN STEEL MEMBER AND CONCRETE MEMBER

* **

田島二郎 町田篤彦

By Jiro TAJIMA and Atsuhiko MACHIDA

The experiments and analysis were conducted on longitudinally jointing method by prestressing between steel member and prestressed concrete member to evaluate its mechanical properties. By this study, this type of joint was proved to be the most practical method as compared with the other methods. Since sometimes the cracking of concrete at the compression zone governs the ultimate strength of the joint, the ultimate bearing strength of concrete to which the concentrated line load is applied through the end-plate was investigated and the equation to estimate the strength was proposed. Simultaneously, it was proved that the rigidity of anchorage zone of prestressing tendons at the tension fibre is determined mainly by the depth of concrete placed at the end of the steel girder, and also proved that the rigidity can be evaluated successfully by the three dimensional FEM analysis.

1. まえがき

従来、一つの構造物は、鋼構造あるいは鉄筋コンクリート構造というように、1種類の材料を用いて建設されることが多かったが、夫々の材料特性に応じて、鋼部材と鉄筋コンクリート部材を適宜組み合わせる一つの構造物とすれば、合理的な設計が可能となり、構造物に要求される複雑多岐な性能を満足させることが容易となる場合が少なくない。この種の構造では、接合部の設計方法が最大の問題点となるが、これに関しては、公表された研究成果が少なく、国内外を通じて、大規模な構造物にこの種の構造が採用された例もそれほど多くない。

上記のような複合構造の代表例としては、鋼桁と鉄筋コンクリート桁あるいはプレストレストコンクリート桁を軸方向に接合して一体とする構造がある。この種の複合構造は、例えば、主径間部を鋼桁とし側径間部を鉄筋コンクリートまたはプレストレストコンクリート桁とした連続桁や斜張橋に応用すれば、有利な構造にすることが出来る。このような複合桁構造における異種桁相互の接合方法としては、従来の合成桁におけるスタッドジベルを応用したもの、鋼構造における引張ボルト継手（コンクリートではプレストレス）を応用したものおよび両者を併用したものなどが実用性が高い¹⁾。本研究は、これらのうちのスタッドジベルとプレストレスの併用工法についてその変形および耐荷性状を実験的および理論的に研究したものである。すなわち、曲げモーメントに対する接合部の静的および疲労性状を小型試験体を用いて究明するとともに、

* 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)

図1 接合部全体模型小型供試体

Figure 1 consists of two diagrams, (a) and (b), showing the dimensions and loading conditions of the specimens. Both specimens are square, with a total width and height of 300 mm. The concrete core is 100 mm wide. In (a), the loading is applied centrally through a vertical loading plate (19 mm thick) and end plates. In (b), the loading is applied at the edges through loading plates and end plates. The diagrams illustrate the internal structure of the specimens, including the concrete core and the reinforcement bars.

10φ
450

図3 引張部部分
模型供試体

— 72 —

図1の供試体について静的荷重試験を行なった。荷重にあたっては、3.5 tで2回、7.5tで3回の繰り返し荷重を行なったのち、荷重を増加させて破壊に至らした。図4は、この試験で得られた荷重-たわみ曲線である。図4によれば、7.5tまでの荷重レベルでは、たわみは荷重とともに直線的に増大していることがわかる。7.5tは接合部およびプレストレストコンクリート桁の下縁応力が計算上0となる荷重である。従って、この結果は、下縁においてプレストレスによる圧縮応力が打ち消される荷重段階までは、接合部はフルプレストレスのプレストレストコンクリート桁と同様、弾性的に挙動することを示している。これは静的荷重を行なった場合であるが、疲労試験においても、下縁に引張応力を生じない範囲なら、200万回の繰り返し荷重で何の変状も生じないことが示されている。

下縁に引張応力を生ずる荷重段階に至れば、たわみの増大はそれ以前の段階にくらべて著しくなる(図4参照)。これは、言うまでもなく、接合部に開口を生じたためである。接合部の下縁応力が0となる荷重の2倍を上限荷重とした疲労試験では、大きな変状は見られなかったものの、クリップゲージで開口量を測定した結果、開口量は、繰り返し回数の増大とともに開口量が漸増し、100万回の繰り返しで、初回の約2倍になったことが認められた。以上の事実を、すべて、

この種の接合工法では、下縁応力が0となる状態を設計上の一つの限界状態とすべきことを示している。

図4には、プレストレストコンクリート桁の部分のたわみおよび鋼桁の部分のたわみを通常の方法で計算して重ね合わせて求めたたわみも示している。これによれば、実測値は7.5t程度の荷重レベルより、徐々に計算値より大きくなり、20t程度では両者の差が相当に大きくなっていることが認められる。これは、明らかに、たわみの計算に開口の影響を無視しているためである。この種の接合部の開口を生じた後の変形挙動を明らかにする目的で、たわみの計算に開口の影響を考慮することを試みた。計算にあたっては、通常の弾塑性梁理論におけるもののほか、

- (1) コンクリートのひびわれに伴うエネルギーの開放は、蓄えられているひずみエネルギーに比べて無視し得る。すなわち、外力によって加えられたエネルギー増分は、蓄えられるエネルギー増分に等しい。
- (2) PC鋼棒とコンクリートとの間には付着はなく、PC鋼棒のひずみはスパンを通じて一定である。
- (3) プレストレストコンクリート桁と鋼桁は、接合部の圧縮上縁を中心に回転する。
- (4) 微小な荷重変化に対しては、変形は直線的に変化する。

と言う仮定を設けた。(1)および(2)の仮定は、PC鋼材のひずみとその位置のコンクリートのひずみとの差の総和が開口量となることを仮定したものであり、(3)の仮定は、この開口量による剛体的回転が付加的たわみとなるとするものである。また、(4)は荷重-変位曲線を折れ線で近似することを仮定するものである。以上の仮定をもとに、外力の増加に対し、PC鋼材のひずみ増分を仮定して(1)が成り立つように逐次近似計算を行ない、PC鋼材のひずみを確定するという計算を繰り返して、たわみを計算した。この結果も図4に示してある。これによると、上記の方法による計算値は、荷重の全範囲にわたって、実測値によるも

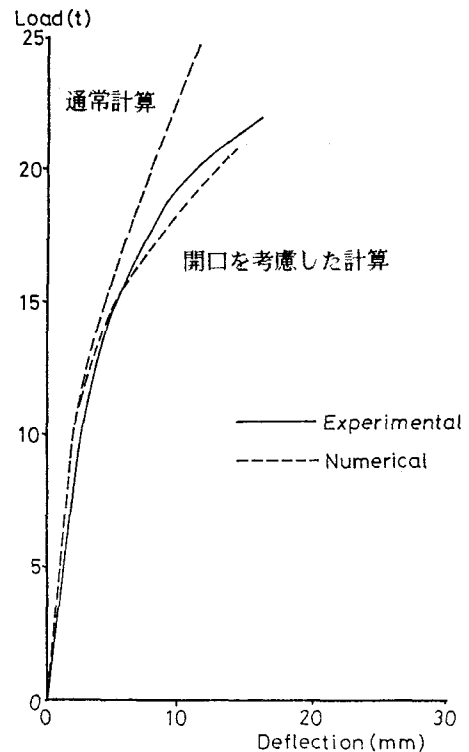


図4 接合部のたわみ性状

のと概ね一致していることが示されている。上記の計算では、鋼桁端におけるPC鋼材定着部の変形を無視している。また、上記の仮定(1),(2)は過剰な単純化であり、(3)の仮定も現実とは若干相違している。このような諸点にも拘らず図4の結果が得られたのは、上記の誤差が打ち消し合ったためと考えられる。このように、若干の疑問は残るものの、上記のような方法で開口を生じた後の変形特性の目安が得られることが示されたのは、この種の接合工法の挙動解明に大きな手がかりを与えるものと考えられる。

上記のような、接合部下縁の開口およびこれに伴うたわみの増大というような現象を除き、この接合工法の実用性を疑問視させるような現象は、少なくとも外見上は終局に近い荷重レベルに至るまでは、認められなかった。供試体は、接合部の上縁より若干下がった位置からプレストレストコンクリート桁上縁に向かうひびわれが発生し、これがコンクリート桁の上縁を欠落させるように進展して終局に至った(図5)。このひびわれは鋼桁上フランジよりプレストレストコンクリート桁端面にもたらされる集中的な支圧力によって発生するものであって、感圧紙を用いて支圧力を測定した結果、 600kg/cm^2 の支圧力が測定されたことより明らかである(図6)。接合部は、このひびわれの進展によってその終局耐力に至った。

本実験で見られたように、接合部上縁にひびわれが発生進展することは、この種の接合部の終局耐力を支配することがあるのである。従って、このような場合のコンクリートの支圧強度を明らかにすることは、接合部の終局耐力を予測する上で重要な事項となる。これについては、次章に詳述する。

4. 圧縮側接合部の力学的挙動

長スパンの橋梁におけるように、桁高が大きくなる構造に本研究のような接合工法を適用する場合、接合部は、ほぼ一様な圧縮力の場にある圧縮フランジ側、同じく一様な引張力の場にある引張フランジ側およびウェブに分割できる。このような場合における圧縮側接合部では、前章で述べたことより、集中線荷重を受けるコンクリートの変形耐荷性状を明らかにする必要があることは容易に推論出来る。局部的な集中線荷重を受ける場合のコンクリートの支圧強度あるいは耐荷性状に関しては、既に相当の研究成果が公表されているが、本研究の場合、鋼桁端に配されるエンドプレートを通じて圧縮力が伝えられる点が従来の研究とは異なっている。それで、図2に示すような供試体を用いて載荷試験を行ない、この場合のコンクリートの変形耐荷性状を検討したのである。図2(a)は補剛材その他によりコンクリートの中央に集中荷重が載荷される場合(以下、中央部載荷と言う)、同じく(b)はフランジその他によりコンクリートの縁端部に載荷される

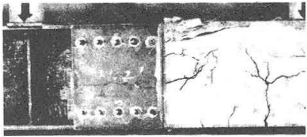


図5 接合部の破壊状況

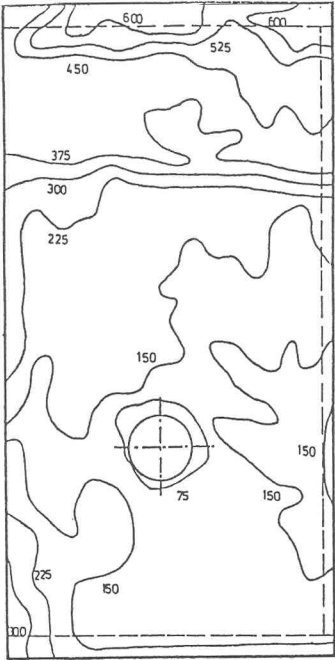


図6 コンクリート桁端面の支圧応力

場合（以下、縁端部載荷と言う）に対応させたものである。載荷にあたっては、幅を供試体の幅に等しく100mmとした厚さ19mmのSM50鋼板を用い、これを、厚さと幅の面が下向きになるように、かつ、幅方向がコンクリートの幅方向に一致するようにしてコンクリート上面の所定の位置に置いた。実験要因の主なものは、コンクリート強度、エンドプレート厚さおよび補強鉄筋の有無である。

中央部載荷の場合、荷重の増大に伴い、載荷点直下を中心として放射状に下方に進展するひびわれが発生した。このひびわれは、エンドプレートがない場合やこれが薄い場合には載荷点より鉛直下方に向かう割裂ひびわれの様相を呈していたが、厚さが厚くなる程、放射状の広がりが大きくなり、ひびわれの数も増した。その間、載荷点の荷重方向の変位は荷重とほぼ比例して増加し、供試体が弾性的に挙動していることが同われた。ひびわれ発生時の荷重を載荷板の厚さと幅で除して支圧応力 q_c とし、更にこれをコンクリートの圧縮強度の平方根 $\sqrt{f_c}$ で除した量とエンドプレート厚さとの関係は、図7のようであった。図7より

$q_c / \sqrt{f_c}$ コンクリート強度および補強鉄筋の有無に拘らずエンドプレート厚さ t とほぼ同一の直線関係にあることが認められている。 $\sqrt{f_c}$ はコンクリートの引張強度に比例する量であるから、図7の結果は、エンドプレートを介して集中線荷重が載荷される場合のひびわれ強度もコンクリートの引張強度に比例することを示している。そして、さらにこのひびわれ強度は、エンドプレートの厚さと直線関係があることも示されたのである。ひびわれが生じた後もすべての供試体は直ちに耐荷力を失うことなく荷重の増加に耐え、ひびわれ荷重の2倍程度の荷重で最大荷重を示した。最大荷重時では、放射状のひびわれの幅が増大するとともに、載荷点では、エンドプレートがコンクリートにめり込み、この部分のコンクリートが圧壊した。補強鉄筋がない場合でも、この状況はほぼ同様であり、最大荷重が補強鉄筋がある場合よりやや低下したのみであった。図7には、最大荷重時についても、支圧応力とエンドプレート厚さとの関係を示してある。これによれば、最大荷重時の支圧応力もコンクリートの引張強度に比例し、エンドプレート厚さと直線関係にあることがわかる。ひびわれ荷重の場合と相違する点は、補強鉄筋のある場合には、これがない場合よ

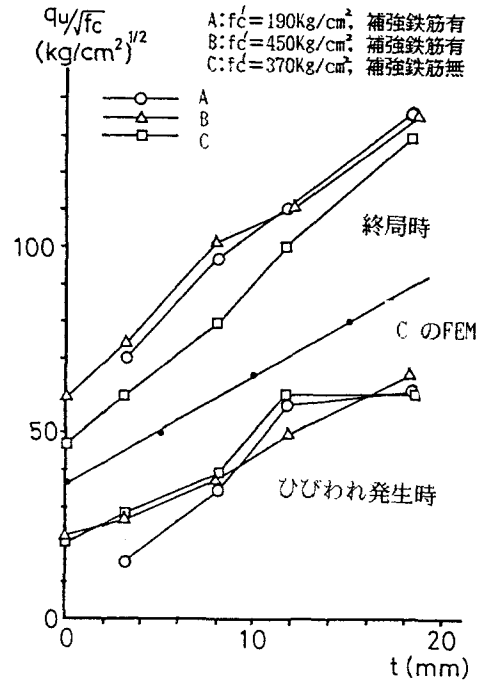


図7 ひびわれ発生時および終局時の支圧応力（中央部載荷）

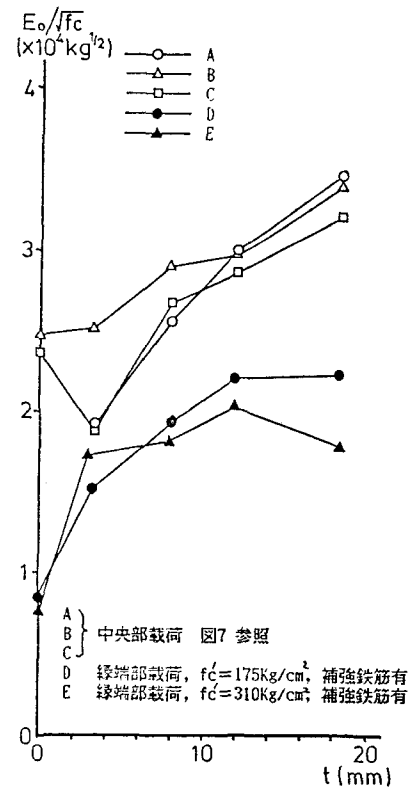


図8 圧縮部の剛性

り高い支圧応力を示す点にある。この結果は、補強鉄筋がコンクリートが割裂されるのを防ぐ役割を果たすことから当然の結果であるが、その影響は意外に小さい。これは、エンドプレートとコンクリートの間の摩擦が補強鉄筋と同様の効果をもたらしたためと考えられる。

縁端部荷重の場合は、ある荷重レベルに達すると、載荷点下より供試体の中心軸方向に向かうひびわれが発生した。この間の荷重と変位は、ほぼ比例関係にあった。それで、この比例定数を接合部の剛性 (E_0) とみなし、これとエンドプレート厚さとの関係を中心部載荷の場合とともに図8に示して検討を加えた。これによれば、縁端部載荷の場合、中央部載荷の場合と同様、剛性 E_0 はエンドプレートの厚さとともに増加することが認められる。後に述べるように終局耐力もエンドプレートの厚さが増すと増大するから、接合部の性状を向上させる上でエンドプレートの厚さを増すことは相当に有効であると言える。しかし、図8には、エンドプレートの厚さとともに剛性が平行して増すと言うことはなく、剛性の増加には限界があることも示されている。すなわち、エンドプレート厚を無暗に大きくするのは得策とは言い難く、最適の厚さが存在するのである。また、同図には、縁端部載荷の場合の剛性は中央部載荷の場合より相当に小さく、これの大約1/2であることも示されている。このことも、本研究の接合工法においては、設計上、留意すべき事項である。ひびわれ発生時の支圧応力は、図9に示すようであって、中央部載荷の場合と同様に、コンクリート引張強度にほぼ比例し、エンドプレートが極めて薄い範囲を除いてその厚さとともに直線的に増加する。

ひびわれ発生荷重を越えて荷重が増大すると、載荷点外側のコンクリートが三角形に剝落し、終局に至った。終局時の支圧応力は、図9に合わせて示すようであり、ひびわれ発生時のそれと同様、コンクリートの引張強度に比例し、エンドプレート厚とほぼ直線関係にあることが判明した。しかし、支圧応力の絶対的な大きさを中心部載荷の場合のそれと比較すれば、縁端部載荷の場合、相当に低いのである (図7および図9参照)。それで、載荷の位置に拘らず同一の式で終局時の支圧応力を計算する可能性を探るため、既往のエンドプレートがない場合についての研究成果を参照し、コンクリートの端部から荷重作用位置までの距離

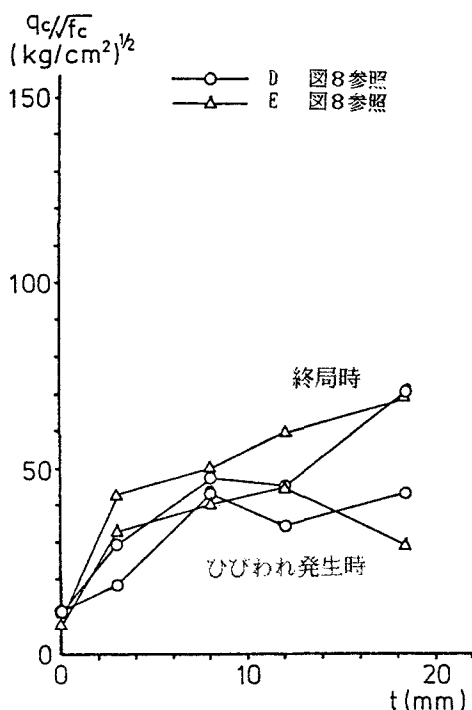


図9 縁端部載荷時の支圧強度

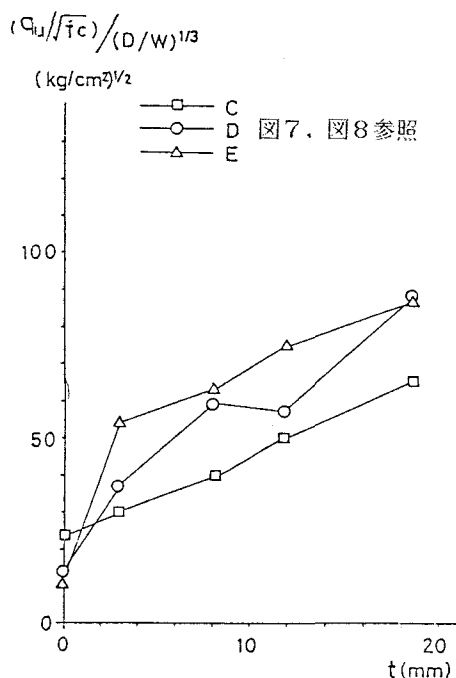


図10 支圧強度に及ぼす載荷位置の影響

D と荷重の幅W の影響を考慮したD/W なるパラメータを用いて支圧応力を整理し直した。この結果は、図10に示すようであって、同図より、載荷位置の終局支圧応力に及ぼす影響は、エンドプレートがある場合も、これがない場合と同様、 $(D/W)^{1/3}$ によって表現し得ることが分かる。すなわち、エンドプレートを介して集中荷重が載荷される場合、終局時の支圧応力は、下式により計算することができる。

$$q_u = (\alpha t + \beta) \sqrt{f_c'} \cdot (D/W)^{1/3}$$

ここに、 α 、 β ：定数

前章で述べたように、プレストレスを応用した接合部では、鋼桁よりの集中荷重によって、コンクリート桁圧縮部に軸方向に平行にひびわれが生ずることが接合部の終局耐力を左右することがある。接合部圧縮部の耐荷性状は、上に詳述したように、実験の範囲内ではほぼ説明されたとと言える。しかし、これが規模の極めて大きい実際の場合に適用できるとは限らないので、より一般化する目的で、解析的に評価できるか否かを検討した。用いた解析方法は、FEMであり、解析プログラムには、COMM-2〔2〕を用いた。メッシュ分割および解析結果を中央部載荷で補強鉄筋がない場合を例にとって示せば、図11および図7のようである。図7より明らかなように、解析結果は実測より若干低いものの、コンクリート強度およびエンドプレート厚さの影響は、概ね正しく捉えている。解析が若干低い値を与える理由は、COMM-2で用いているコンクリートの構成方程式が二軸応力状態にもとずくものであることにありと考えられる。すなわち、本実験の場合、エンドプレートとコンクリートの間の摩擦がコンクリートを三軸応力状態にしたと考えられ、これが上記の結果をもたらしたと考えられるのである。このように、解析法の修正は比較的容易と判断されるのであって、解析的にもこの種の接合部の耐荷性状を明らかにし得る見通しが得られたと言える。

5. 引張側接合部の力学的挙動

引張側接合部では、開口を生じたのち、鋼桁端に設けたPC鋼材定着部がコンクリート桁の方向へ引張られるから、この部分の変形耐荷性状が接合部全体の力学的性状を左右することとなる。それで、圧縮側接合部の場合と同様、桁高の高い場合を想定して、この部分の挙動が模擬できるような部分供試体について載荷試験を行なった。用いた供試体は、図3に示すようであり、鋼桁端のフランジ、リブ、補剛材などで囲まれた部分にコンクリートを充填したものを模したものである。実際の構造物では、フランジやリブなどにはス

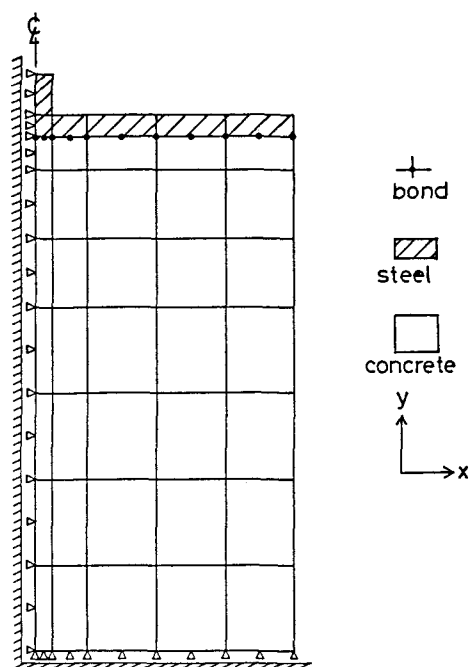


図11 メッシュ分割（中央部支圧）

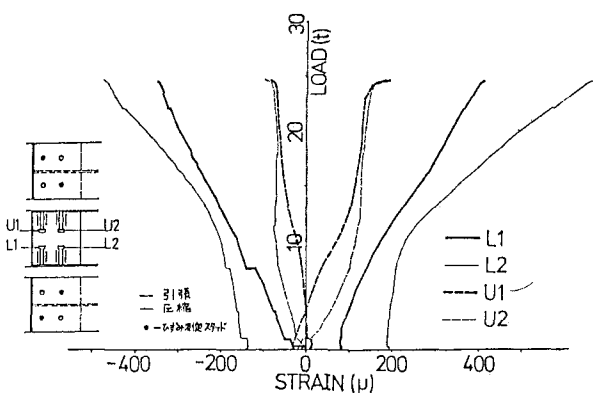


図12 スタッドジベルのひずみ状況

タッドジベルが溶植されようが、この供試体では、これを行っていない。これは、3で述べた全体模型供試体についての試験で、スタッドには、ほとんど応力が生じていないことが認められたこと（図12）、本供試体についての予備試験でも同様に、スタッドには応力が生じなかったことなどより、P C鋼材に作用する引張力はエンドプレートを介して直接フランジやリブに伝達されと考えられたからである。このことから、引張側接合部の終局耐力は、フランジやリブとエンドプレートとの溶接部の強度によって決定されることが推論できる。しかし、中央スパン300 - 400 M 程度の斜張橋にこの接合工法を適用する場合を例にとって試算した結果、エンドプレートの厚さを極端に薄くしない限り、溶接部の強度は十分に大きく、この部分が終局に至る荷重より相当低い荷重で、接合部はその耐力に至ることが示された。それで、実験は主にその変形状態に着目して行なった。採用した実験要因の主なものは、コンクリートの充填高さとエンドプレートの厚さである。

載荷試験の結果、エンドプレート中央部のP C鋼材方向の変位と荷重との関係は、荷重が低い範囲の変位が全く生じない部分、それに続く荷重とともに直線的に増加する部分、直線性が失われて、変位の増加が著しくなる部分に分割できることが明かとなった。最初の部分は、コンクリートと鋼板との付着力が有効のため、エンドプレートには荷重が伝達されない荷重レベルにおけるものであり、実際には期待しないのが安全側の部分である。それで、P C鋼材定着部の剛性は、これに続く直線部分の勾配 E_0 を用いれば最も的確に表わし得ると判断される。

図13は、3mmのエンドプレートを用いた場合の E_0 をコンクリートの充填高さに対して示したものである。同図によれば、コンクリートの充填高さが増加するのに伴って E_0 が顕著に増加するのがわかる。また、図では明瞭でないが、コンクリートを全く充填しない場合の E_0 は6cm充填したものの約1/90であった。このように、コンクリ

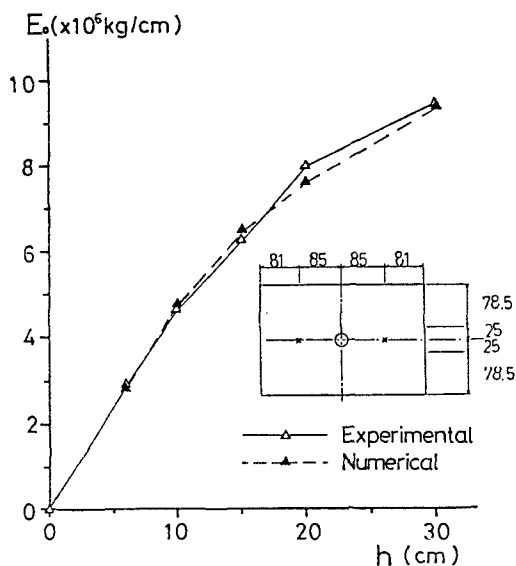


図13 PC鋼材定着部の剛性とコンクリート充填高さの関係

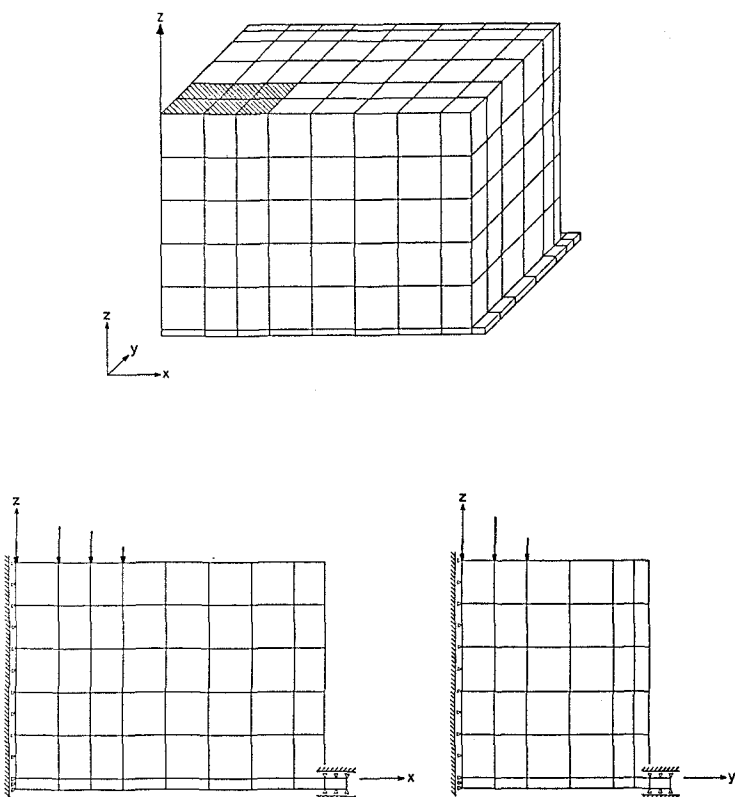


図14 メッシュ分割（引張部供試体）

ートを充填することが接合部の剛性を高める効果は極めて大きいのである。図13には、接合部の剛性を解析的に求め得るか否かを検討するため、図14のようにメッシュ分割して3次元の線形FEMによって、この実験を解析した結果も示してある。解析に用いたモデルは、4辺の回転が拘束された鉄板（エンドプレート）の上にコンクリートブロックが載っているとした簡単なものであるが、図に見られるように、実験結果と解析結果はよく一致している。すなわち、この種の接合部の引張側の剛性は、比較的容易に解析的に求められることが示されたのである。図15は、このことをもとにして、接合部の剛性に及ぼすエンドプレート厚さの影響を解析によって検討した結果を示すものである。これによれば、エンドプレート厚の増加による E_o の増加はわずかであり、コンクリートの充填高さを増加させる方がはるかに効果的であることが明瞭である。

図16は、 E_o が低下しエンドプレートの変位が著しく増大を開始する荷重とコンクリート充填高さとの関係を示したもので、実験によって得られたものである。この荷重の大きさはP C鋼材定着部の耐荷性状を評価する上で極めて重要な荷重であるが、図16は、これにもコンクリート充填高さが著しい影響を及ぼし、充填高さが低い範囲内では、両者は直線関係にあることを示している。荷重をさらに増大させれば、定着部は終局に至ると考えられるが、実際に終局に至ったものは、充填高さを6cmとしたもののみであり、20cmおよび30cmとしたものは E_o が低下を開始する荷重すら明らかにできなかった。このことは、コンクリートの充填高さがある程度以上とすれば、P C鋼材定着部の耐力を検討することを要しない程に高くすることができることを示すものであって、本章頭初の推論を裏付けるものである。

6. 結論

鋼桁と鉄筋コンクリート桁あるいはプレストレストコンクリート桁を軸方向に接合して一体の桁とする複合構造における接合部について、接合部全体を模擬した小型の梁供試体および圧縮部あるいは引張部のみを部分的に模擬した部分供試体についての載荷試験、FEMを中心とした挙動解析などを行なって、その変形耐荷性状の解明を図った。載荷試験では、実際に比して著しく小さい供試体しか用い得ず、また、解析もその範囲が限られているが、行なった試験および解析の範囲内で以下のことが結論される。

(1) 鋼桁端のある範囲にコンクリートを打ち込んでP C鋼材の定着部を形成し、プレストレスによって、

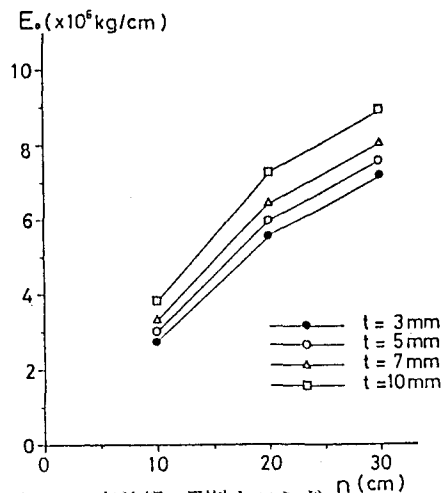


図15 定着部の剛性とエンドプレート厚さの関係

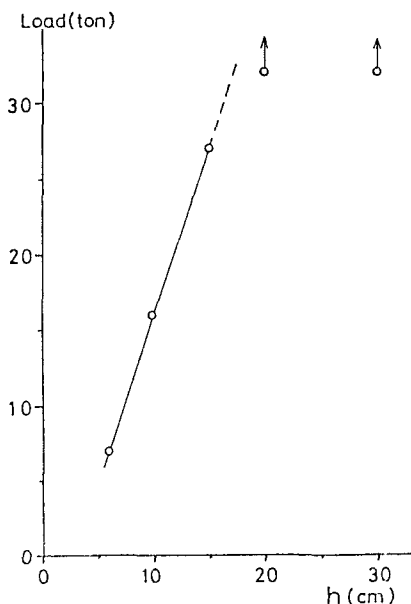


図16 剛性減少荷重とコンクリート充填高さとの関係

鋼桁とコンクリート桁を接合する工法は、曲げモーメントが作用する場合、接合部下縁が引張応力状態になって、開口を生ずるまでは、通常のPCブロック工法におけると同様、一体の桁と何ら変りなく挙動すること、鋼桁端に打ち込んだコンクリートの補剛効果のため、鋼桁からコンクリート桁に作用する支圧応力が小さくなること、PC鋼材定着部の構造細目が簡易であること等により、極めて実用性の高い工法であるといえる。

(2) 鋼桁端のPC鋼材定着部では、PC鋼材の緊張力はコンクリートおよび桁端のエンドプレートに伝えられた後、溶接部を介して鋼桁のフランジやリブに伝達される。従って、コンクリートから鋼桁のフランジやリブへ、緊張力を直接伝達させるためのスタッドジベルその他のずれ止めは、実験室的には、不要と考えられる。この結果は、実際の構造物において、ある程度のずれ止めを配置する必要性を否定するものではないことは、当然である。

(3) 接合部圧縮側では、コンクリート桁には、鋼桁よりエンドプレートを介して集中線荷重が載荷される。このため、コンクリート桁には載荷位置から桁の軸方向に向かうひびわれが発生し、これが接合部の終局耐力を左右することがある。

(4) 鋼板を介して集中荷重が作用する場合のコンクリートの支圧強度は、コンクリート強度に比例し、鋼板の厚さと直線関係を保って増大する。また、集中荷重の幅 W に対するコンクリート端部からの距離 D の比 D/W の $1/3$ 乗に比例すると考えてよい。

(5) 接合部引張側では、鋼桁端におけるPC鋼材定着部の変形耐荷性状が開口を生じた後の接合部の変形耐荷性状を支配する。接合部の耐力は、エンドプレートと鋼桁との溶接部の強度およびエンドプレート自体の強度に左右されるが、実際の構造について試算した結果、エンドプレートを極端に薄くしない限り、溶接部の強度は問題にならない位に大きくできることが判明した。また、コンクリートの充填高さがある程度以上とすれば、エンドプレート自体の強度も問題にならなくなることが示された。

(6) PC鋼材定着部の剛性は、コンクリートの充填高さに支配され、エンドプレート厚さは大きな影響を及ぼさない。三次元の線形FEM解析によればこの剛性を精度よく予測することが可能である。

謝辞 本研究はその大部分を昭和59年度文部省科学研究費補助金(課題番号 59850077)を受けて行なったものである。本研究の実施にあたり、大友健(昭和59年当時埼玉大学大学院生)、百瀬和夫(昭和60年当時埼玉大学大学院生)をはじめとして、昭和57年-60年における埼玉大学建設材料研究室卒論生 古城一郎、白子高史、矢野徹、後藤広治、村上孔、木村聡、本田健司の諸氏の手を煩わせた。ここに記して謝意を表するものである。

参考文献

- 1) 田島二郎、町田篤彦、睦好宏史：鋼部材とコンクリート部材の接合工法に関する実験的研究，第4回コンクリート工学年次講演会論文集，pp. 433-436，1982
- 2) 前川宏一，二羽淳一郎，岡村甫：鉄筋コンクリート用解析プログラム，第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウム論文集，JCI，pp79-86，1983

(1985年10月18日受付)