

コンクリート合成構造におけるプレキャスト 部材の利用に関する基礎研究

FUNDAMENTAL STUDY ON THE USE OF PRECAST CONCRETE
MEMBERS IN CONCRETE COMPOSITE STRUCTURE

田 辺 忠 顕*
By Tadaaki Tanabe

1. 序

コンクリート構造物を建造する場合、プレキャスト部材を適切に活用すれば、強度・耐久性などに対する信頼度が向上するばかりでなく、急速施工が可能となり工事に伴う交通阻害も減少する。また、部材の標準化が進めば構造物の建設を経済的にすることも可能である。

土木構造物に対するこの方式の応用としては、コンクリート橋梁におけるプレキャストブロック工法¹⁾・プレキャストI型桁にフランジコンクリートを打ち継ぐ合成桁工法がかなり頻繁に用いられているが、さらに工期短縮化、ならびに経済化に意義が深いと思われるのは、プレキャストコンクリート柱材とプレキャストコンクリート桁との接合による合成ラーメンの利用である。これらの合成構造の活用が、きわめて少数の例^{2),3),4)}を除いては実施されていない理由の一つは、解明を必要とする技術的問題点が存在することにあると考えられる。

本論文は、これらプレキャスト合成構造の活用にあたっての問題点の解明を試み、その実用化のための資料を得るために行なった研究の一部を取りまとめたものである。すなわち、プレキャストコンクリート柱とプレキャストコンクリート桁との合成ラーメンにおける接合隅角部の Rigidity を定量的に表現してこの種合成ラーメンにおけるモーメントの分布、たわみ、終局耐力などの力学的諸性状を、単体の鉄筋コンクリートラーメンの力学的諸性状と比較して論じ、さらに接合P C鋼材の定着方法として中間定着の方法を提案し、コンクリート合成構造物の設計上の資料としたものである。

本研究の実施にあたっては、終始東京大学国分正胤先生のご熱心かつご懇篤なご指導を賜り、東京大学岡村甫先生からは数多くの適切な助言と示唆とを頂いた。また、同窓の松見勇氏からも多くのご熱心なご援助を頂いた。

た。実験の実施にあたっては、東京大学土木教室コンクリート研究室の方々、日曹マスタービルダーズ(株)の方々、電気化学工業(株)の方々から、ご熱心な援助を賜った。特に、当時同コンクリート研究室に臨時につとめておられた工藤定実氏、吉住 彰氏からは、3年の間、1日として、ご援助を頂かぬ日はなかったほどである。

謹しんで、ここに謝意を表し、厚くお礼申し上げる次第です。

2. プレキャストコンクリート直交2部材からなる合成ラーメンに関する研究

各種の土木構造物の中で、ラーメン構造形式をとるのが数多くあるが、すべてがプレキャスト部材で構成されたラーメン構造の例は数少ない。たとえば、東名高速道小牧高架橋、国鉄城東貨物南線高架橋などは、大径遠心力プレストレストコンクリート杭を橋脚として用いて経済的な施工を行なった特記すべき例であるが、橋脚上に架設する構桁には、場所打ちコンクリートを使用しているのであって、場所打ちコンクリートの一部混用が一般の限界となっている。これは横桁および柱にプレキャスト部材を使用すれば、これらの接合には種々な不整量を排除する考慮が必要となるからである。また、接合による合成ラーメンの力学的諸性状は、接合方法によって相違するが、それがまだ明らかにされていないからである。プレキャストプレストレストコンクリート柱(プレキャストP C柱)とプレキャストP C横桁とを接合した合成ラーメンの特筆すべき例としては国鉄荒川東高架橋²⁾があるが、この場合には入念な接合試験を行なって始めて実施が可能となったのであって、その成果はプレキャスト構造の利用において、きわめて貴重な資料である。しかし、一般に多本数の合成ラーメン構造を実用するにあたっては、接合隅角部の Rigidity に影響をおよ

* 正会員 工博 電力中央研究所 技術第二研究所

ばす要因の解明・終局耐力の算定方法など、解明を必要とする問題点が相当に残されている。

本章では、プレキャストコンクリート柱とプレキャストコンクリート桁をプレストレスングにより、直接接合した2本柱、ならびに3本柱の大型合成ラーメン供試体に鉛直荷重あるいは、水平荷重を作用させた結果に基づき、接合プレストレス量、あるいは柱・桁の剛比が合成ラーメン接合隅角部の Rigidity におよぼす影響その他を論じ、さらにコ字型の合成供試体を試験した結果に基づき、接合隅角部の Rigidity に影響をおよぼす他の諸要因ならびに合成ラーメン接合隅角部の補強方法等について論じた。

(1) 試験方法

a) 大型合成ラーメン供試体の作製方法ならびに試験方法

合成ラーメン供試体は Fig. 1 に示すようにプレキャスト桁(断面は3種類であって、それぞれ 30×24 cm, 30×20 cm および 30×16 cm であり、長さはすべて 3 m である)と直径 30 cm, 厚さ 6 cm の円環断面を有する長さ 2 m のプレキャストプレストレスコンクリート柱(2本あるいは3本)を組み合わせることで作製したもので、合計5種類である。プレキャスト柱は、断面が 50×35 cm で柱断面の約7倍の断面2次モーメントを有する基礎ばりの中に埋込まれ固定支承として働くようになっている。桁、柱および基礎ばりにおける配筋、鉄筋の種類、P C柱におけるプレストレス量は Fig. 1 に同時に示した。

桁とP C柱との接合は、4種 φ22 mm のP C鋼棒1本をP C柱中空部に中詰めコンクリートを打設して定着し(3. 参照)、次にあらかじめ設けてあった桁の孔に通して緊張することにより接合したのである。

柱と桁とを接合するプレストレスを 2t, 5t, 10t と変化させ、各場合に鉛直荷重をスパン中央に載荷して、桁、柱の変位、接合隅角部の回転角、桁および柱の各箇

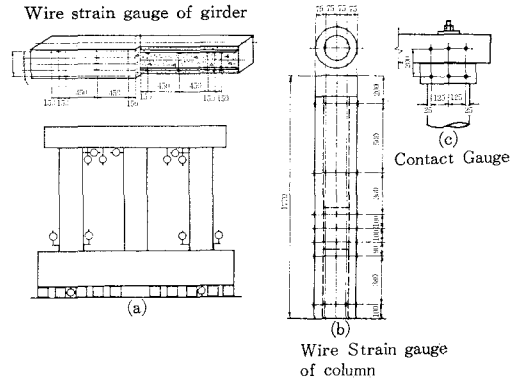


Fig. 2 Position of Wire Strain Gauge, Dial Gauge and Contact Gauge

所のひずみを測定した。30×16 cm (幅×高さ)の断面を有する桁を使用した3本柱合成ラーメンには特に桁端部に水平荷重も作用させて試験した。

鉛直荷重は、スパン中央の鉄筋のひずみが 1000×10^{-6} 程度になるまで段階的にあげ、段階的に0にもどした。鉛直方向および水平方向変位は、Fig. 2 (a) に示す位置に 1/100 mm 示度のダイヤルゲージを設置し測定した。隅角部の回転は Fig. 2 (c) に示す位置にコンタクトボールを配置し、1/1000 mm 示度のコンタクトゲージで、その距離変化を測定し、桁軸線と柱軸線との相対的回転変形の目安とした。桁の鉄筋ひずみの測定位置、およびコンクリートのひずみ測定位置は Fig. 2 (a), (b) に示したようである。

b) コ字型供試体の作製方法ならびに試験方法

上記のごとく、大型合成ラーメンを作製して、接合隅角部の力学的性状、ならびに接合隅角部の性状が、合成ラーメンのモーメント分布におよぼす影響をラーメン構造について検討したのち、接合隅角部のみを取り出したコ字型の供試体を次に述べるように作製して接合隅角部の Rigidity に影響をおよぼす諸要因を変化させて、さらに詳細に Rigidity の検討を行なった。

断面 20×40 cm, 長さ 1.8 m の横桁に断面 20×30 cm,

長さ 1.3 m の柱をプレストレスによって接合して、Fig. 3 に示す供試体を作製した。接合は、柱と桁とを水平な床上に横たえて、柱上面にペーストを塗布し、柱と桁との間に、少量のプレストレスを導入し、セメントペーストの硬化をまって、所要のプレストレスを導入した。使用した鉄筋の種類、P C鋼体の種類

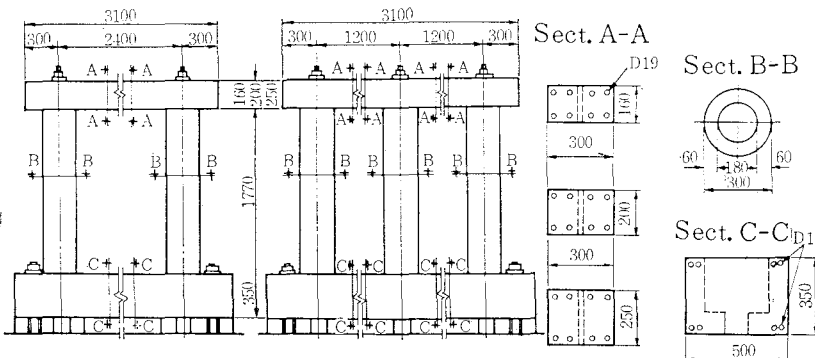


Fig. 1 Large Scale Models of Composite Frames

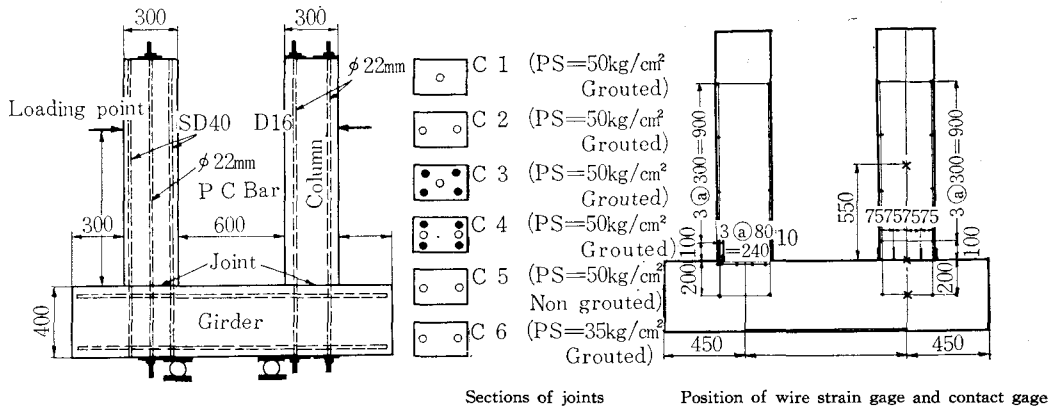


Fig. 3 II Shaped Specimen

は Fig. 3 に同時に示した。

接合隅角部の種類は、Fig. 3 に示したようであって、接合プレストレスが 50 kg/cm² および 35 kg/cm² のもの、鉄筋で補強してあるもの、その補強のないもの、グラウトのあるもの、グラウトのないもの、P C鋼材が分散して配置されているもの、P C鋼材が断面中央に集中しているもの等である。

接合プレストレスを導入したのち、グラウチングを行った。グラウチング後の材令が、1 週程度るとき、供試体を Fig. 3 に示すように、ローラー支承の上に設置し、柱の一端から、50 t 油圧ジャッキにより水平力を作用させて、試験を行なった。終局荷重の1/10~1/15に相当する 0.5 t おきに、載荷荷重を増加させて、各荷重階における桁、柱のコンクリートおよび鉄筋、P C鋼棒のひずみ、柱と桁との接合面における接合面の離間の程度等を測定した。配置したコンタクトポール位置、ワイヤストレインゲージ位置は Fig. 3 に示したようである。

(2) 合成ラーメンにおけるモーメント分布

場所打ちコンクリートのラーメンに載荷する場合には、その終局荷重に至るまで隅角部における柱軸線と桁軸線とのなす角は、ほぼ 90° に保たれるのが通常であるが、合成ラーメンの場合には、プレストレスの大きさによっては、柱と桁とのなす角度が終局荷重まで 90° に保たれるとは限らないと思われる。そこでまず合成固定ラーメンの桁のスパンの中央に鉛直方向荷重あるいは桁端部に水平荷重を作用させて、荷重増加に伴う合成ラーメンの力学的性状の変化を詳細に検討した。

試験の結果から、この種の合成固定ラーメンと単体固定ラーメンとの力学的性状におけるおな相違点が以下の点であることが判明した。

プレキャスト部材を P C鋼材によって接合した合成ラーメンの力学的性状における顕著な特徴は、接合部に作用するモーメントが大きくなるとしだいに接合隅角部の Rigidity が減少し、単体ラーメンにおけるモーメント分布とは相当異なってくることである。すなわち、鉛直方向荷重に対しては、あたかも柱の Stiffness が減少したかのごときモーメント分布をなすとともに、水平方向荷重に対しては、桁の Stiffness が減少したかのごときモーメント分布をなすのである。すなわち、鉛直方向荷重に対して、柱の Stiffness が減少すれば、柱に伝達される単位荷重当たりのモーメント量が減少し、その結果、桁のスパン中央の作用モーメントが増大するのである。

Fig. 4 には、断面が 30×16 cm (幅×高さ) の桁を使用し、接合プレストレスが 5 t の場合の合成ラーメンに鉛直方向荷重 (各スパンの中央に載荷) を作用させた

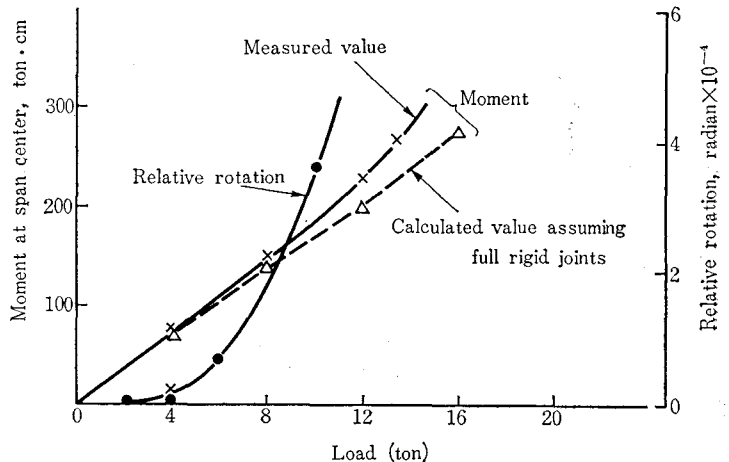


Fig. 4 Moment at Span Center of a Composite Frame and Relative Rotation of the Joint

場合の、接合隅角部およびスパン中央のモーメントの実測値を示した。また、同図には、柱と桁とが剛接合されているとして計算した接合隅角部および、スパン中央のモーメントも示した。

また、接合隅角部における接合面相互の離間を各荷重階についても示した。

これらの図は、接合面の離間が生じ、桁軸線と柱軸線との間に相対的な角変形が生じると、上記のごときモーメント分布が生じることを明らかに示している。

柱・桁接合部が、剛であるとして行なった弾性計算によれば、約 12 t の載荷重のときスパン中央の鉄筋の応力度を 1400 kg/cm² とするモーメントが発生するが、実測によれば、同荷重のとき、接合隅角部において、5 × 10⁻⁴ ラジアン程度の軸線相互の角変化が生じ、このため角変化のない場合に比して、側柱接合部におけるモーメントは、約 44% 減少し、スパン中央では約 15% 増加することが示されている。

次に上記の合成ラーメンの桁端部に水平方向荷重を加えた場合の実測結果を Fig. 5 に示した。

Fig. 5 には、水平方向荷重に対する、接合隅角部のモーメントの実測値および、柱支承部のモーメントの実測値を示した。また、接合隅角部の接合面相互の離間の実測値も示した。これらは接合隅角部における軸線相互の相対的回転変形が 5~7 × 10⁻⁴ ラジアン程度生じると側柱下端におけるモーメントは、10% 程度増加するとともに、接合隅角部では 29% モーメントが減少することを示している。すなわち、これらの結果は、合成ラーメンに水平荷重が加わって、接合隅角部の Rigidity が減少した場合の影響は、桁の Stiffness が減少した場合と全く同等であることを示している。

このようにして合成ラーメンのモーメント分布は、接

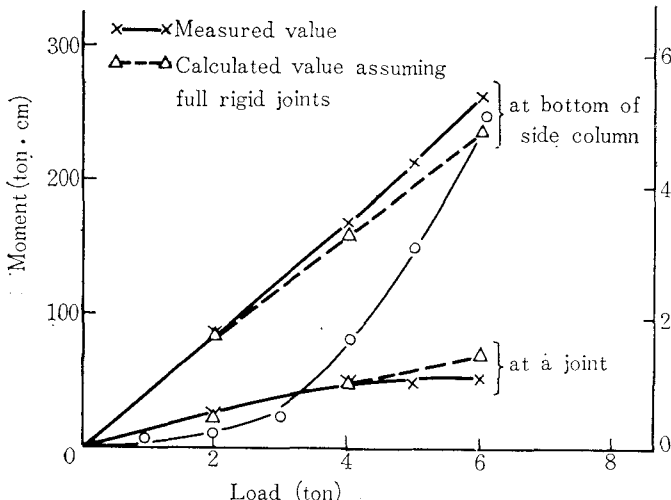


Fig. 5 Moment Distribution of a Precast Rigid Frame

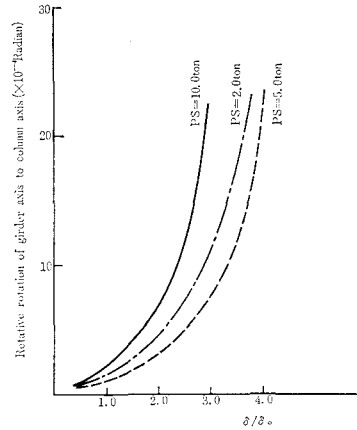


Fig. 6 Relation Between σ/σ_0 and Relative Rotation of Girder Axis to Column Axis

合隅角部の Rigidity の低下によって影響されることが明示されたが、Rigidity の低下は接合隅角部に作用するモーメントが、ある限界を越えると、かなり急激に著しくなるのであって、作用モーメントが、ある限界以内の量であれば、接合隅角部の Rigidity の低下は、それほど著しくなく、単体の場合とほぼ同様な力学的性状を有すると認められた。その限界としては、Fig. 6 に示したように、接合プレストレスによって生じる柱上面のコンクリートの圧縮応力度 σ_0 と、荷重によって生じる柱接合面最外縁の引張応力度 σ との比の絶対値 $|\sigma/\sigma_0|$ が、1.0~1.5 の範囲であることも認められた。したがって、接合隅角部に作用するモーメントが、この限界以上となる場合には、接合隅角部の Rigidity の低下を考慮に入れた応力解析が必要となる。

その場合の数量的な解析は、以下に示すように接合隅角部にゼンマイ状のばねを考慮して、ばね係数 K が、作用モーメントおよび軸力によって徐々に変化すると考えることによって可能であることが認められた。まず、解析における桁断面および柱断面に作用するモーメントと変形との関係を求めるに当たっては、Hognestad のストレスブロックを採用し、コンクリートの引張応力は無視した。

各断面に働いているモーメントを仮定すれば、その断面の曲げ変形が求まるのでそれを部材長にわたって積分すれば、部材端部の回転角が求まる。この回転角が、(i) 柱の下部においては回転角は 0 となること、(ii) 接合隅角部では柱上端と桁端の回転角との差は $(1/K) \times M_T$ (M_T = 接合隅角部に作用するモーメント) であることの両

条件を満たすようになるまで演算を繰返すことによって、各荷重段階におけるある K の値に対応するモーメントの分布を求めた。

その計算結果の一例として、桁 B (断面 30×16 cm) の柱軸線から 15 cm 離れた断面に作用するモーメントと荷重との関係を各種のばね定数の場合について Fig. 7 に示した。接合隅角部において両部材軸線が 90° を保ち、相対的角変位がない場合は $K = \infty$ の曲線で示され、単純支持の場合は $K = 0$ の線で示される。太い実線で示してある曲線は、この断面に作用したモーメントの実測値である。すなわち、この実測線と各 K の値に対する計算値の曲線との交点を検討することにより、 K の値を求めることが可能となったのである。たとえば Fig. 7 においてプレストレスが 10 t の場合、4 t 程度の荷重に対しては、隅角部は $K = (1/4.0) \times 10^6 \text{ ton} \cdot \text{cm} / \text{ラジアン}$ のばねで接合されていると考えてよく、8 t の荷重の付近では隅角部は $K = (1/14.0) \times 10^6 \text{ ton} \cdot \text{cm} / \text{ラジアン}$ のばねで接合されていると考えられるのである。

次に、Fig. 8 には、接合プレストレスが 5 t で、桁断面が 30×16 cm の合成ラーメンの載荷重 12 t の場合のモーメント分布の実測値と、このような解析によって得た計算値とを比較して示したが、ばね係数を $(1/8) \times 10^6 \text{ ton} \cdot \text{cm} / \text{ラジアン}$ と取ることによって、実測値と計算

値がおおむね一致するのが認められるのである。

(3) 接合隅角部の Rigidity に影響をおよぼす諸要因

2. (2) に述べたように、接合隅角部の Rigidity の低下が、合成ラーメンのモーメント分布に重大な影響をおよぼすのであるが、この影響は、接合隅角部における Rigidity の変化が明らかになれば、ばね係数の導入によって計算しうるものである。

それで、接合隅角部の Rigidity に影響をおよぼす要因を詳細に検討した。

まず、桁と柱との剛比が、その要因の一つと考えられたので、桁の断面寸法を変化させて試験したほか、柱の本数が 2 本の場合と 3 本の場合とで剛比の変化が、2 倍となるので、その場合についても、接合隅角部の Rigidity を比較した。接合隅角部の Rigidity は、ばね係数によって表現し実測した合成ラーメン各部のひずみから、モーメント分布を求め、計算によるモーメント分布が、実測モーメント分布に一致するように、接合隅角部のばね係数を定めた (2. の (2) 参照)。

Fig. 9 は、上記の 3 本柱合成ラーメンと 2 本柱合成ラーメンとにおける接合隅角部の Rigidity の変化の実測値を隅角部に作用するモーメントとの関係において示したものである。接合プレストレス力が、5 t の場合と、10 t の場合について、Rigidity の変化の実測値が示されているが、この図には、2 本柱ラーメンと 3 本柱ラーメンとでは、接合隅角部におけるモーメントと Rigidity との関係に本質的な相違のないことが明りように示されている。

すなわち、柱、桁の剛比は、接合隅角部の Rigidity にそれほど影響をおよぼさないことが示されている。

なお、3 本柱ラーメンの方が Rigidity の低下が小さいのは、柱間隔が小さいために 2 本柱の場合に比して接合隅角部に作用する軸力が大きいためであって、接合隅角部の Rigidity の算定には、接合プレストレス力の大きさおよび作用するモーメントのほかに、接合部に作用する軸力の大きさの影響をも考慮する必要のあることを示している。

また、水平荷重をうける場合にも接合隅角部におけるモーメントと Rigidity との関係は鉛直荷重の場合と大差のないことが Fig. 9 に示されている。水平荷重が作用する場合には、柱に作用する軸力が小さいのでモーメントが大きくなると Rigidity の低下が著しくなるこ

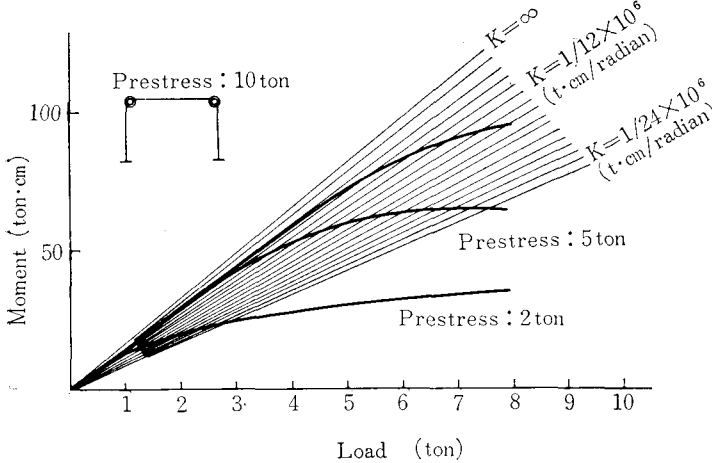


Fig. 7 Relation of Moment and Load at the Jointed Corner

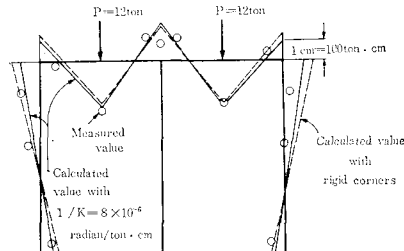


Fig. 8 An Example of Moment Distribution in a Composite Frame

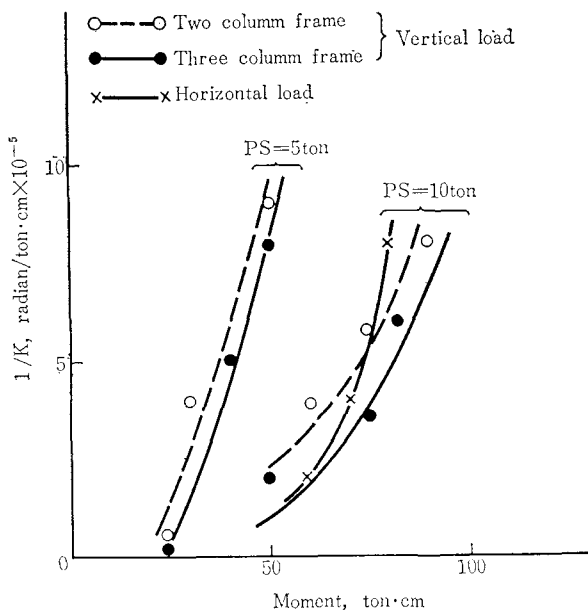


Fig. 9 "Joint Ductility Coefficient"

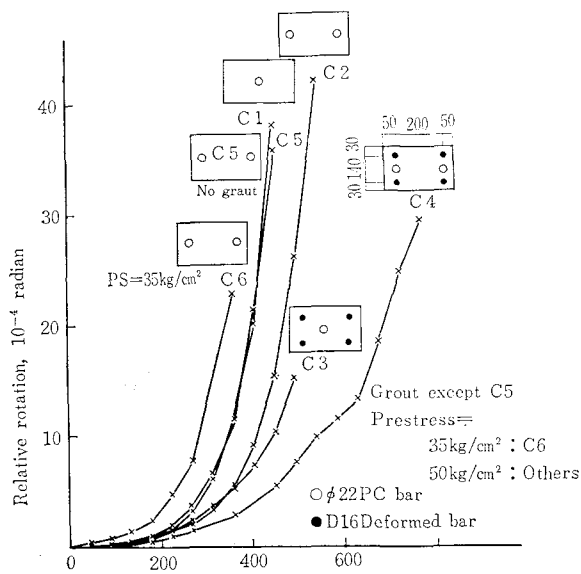


Fig. 10 Measured Relative Rotation in Various Types of Joints by 4cm Measured Length

とも示されている。

以上、要するに、接合隅角部の Rigidity に重要な影響をおよぼすのは、作用モーメント、作用軸力だけでなく、接合時に与えたプレストレス量および接合柱の断面形状も著しい影響をおよぼすことが示されたのである。それで、接合柱面の断面諸性状が接合隅角部の Rigidity におよぼす影響を検討するために、接合 P C 鋼材とコンクリートとの付着のある場合およびない場合について、また、接合面に対する鉄筋の補強がある場合、およびない場合について、また P C 鋼材が集中して配置されてい

る場合、および分散して配置されている場合について、その Rigidity を比較した。

Fig. 10 の C2 と C5 は、シースにグラウトが注入されて、P C 鋼材とプレキャスト柱との間に付着のある場合とグラウトがない場合を比較したものである。

グラウトのない場合には、ある場合に比べて接合隅角部の回転変形は大きく、2 倍程度になっていることが示されている。シースの直径が、P C 鋼材直径と比較して、さらに大きい場合には、接合隅角部の回転変形が生じて P C 鋼材がその影響を受けず直線状となり得るため、P C 鋼材の抵抗力が少なく、接合隅角部の回転変形はより大きくなると考えられる。

Fig. 10 の C2 と C1 は、P C 鋼材の配置位置を分散させた隅角部の Rigidity と、断面中央に配置した隅角部の Rigidity とを比較したものである。

接合プレストレス量は両者とも等しく、一様に 50kg/cm^2 である。この場合にも、明らかに、P C 鋼材を分散して配置した方がその Rigidity は大きくなることが示されている。

Fig. 10 の C3・C4 は、接合隅角部に、鉄筋を補強した場合に、その効果を示したものであるが、柱、桁の適当な位置に孔を設けて、鉄筋を挿入しグラウチングを行なってコンクリートとの付着を生ぜしめれば、接合隅角部の Rigidity ははなはだしく改善されることが示されている。

これらの結果から、実際のプレキャスト合成ラーメンを実用する場合に、接合隅角部の Rigidity の低下を接合プレストレスを増さないでも効果的に防ぐのが比較的容易であることがわかる。すなわち、P C 鋼材を分散して配置しグラウトを行なうこと、P C 鋼材のほかに異形鉄筋も配置することなどの処置を講ずれば、接合隅角部の Rigidity の低下を著しく緩和することが可能であって、実用上合成ラーメンに単体ラーメンとほぼ等しい力学的特性を付与することが十分に可能であることが明示されたのである。

(4) 接合隅角部の Rigidity の算定方法

(3) においては、合成ラーメン接合隅角部の Rigidity を実験結果に基づいて考察したが、これらの実験結果は、接合隅角部の Rigidity とプレレストコンクリートばりの曲げ変形との、類似性を強く示唆するものである。

それで以下に述べる仮定を行なって、この種接合隅角部の Rigidity を、接合面の断面形状・プレストレス量等から定量的に求めることを試みた。まず、接合隅角部にグラウトが施されていて、プレストレス用鋼材および

補強鉄筋に付着の生じている場合、

- (1) この種合成ラーメンにおける桁軸線の柱軸線に対する相対的回転変形の発生機構は、プレストレストコンクリートばりにおける曲げ変形の発生機構と本質的に等しいとする。そして、曲げモーメントに対するはりの曲率を求める手法を、接合隅角部に応用し、求めた変形を ϕ_{cal} とする。
- (2) 実際に生じる接合隅角部の回転変形は、接合部柱断面の引張側最外縁のプレストレスによる圧縮応力が0になるまで、 ϕ_{cal} に等しいとする。便宜上、引張側最外縁の応力が、0になるモーメントを Balanced Moment と呼ぶ事にする。
- (3) 作用モーメントが、この Balanced Moment よりも大きくなると、P C鋼材、および補強鉄筋のグラウトとの付着が、破壊され始め、モーメントが大きくなればなるほど、付着の切れる範囲は、大きくなる。計算の便宜上、この付着の切れる範囲を 15 cm とする。

Fig. 11 には、このような仮定に基づいて計算した値と、実測値との比較を示した。Balanced Moment よりも小なるモーメントの範囲では、実測値と計算値は、よい一致を示しており、Balanced Moment よりも大なるモーメントの範囲では、初期の段階では計算値が実測値

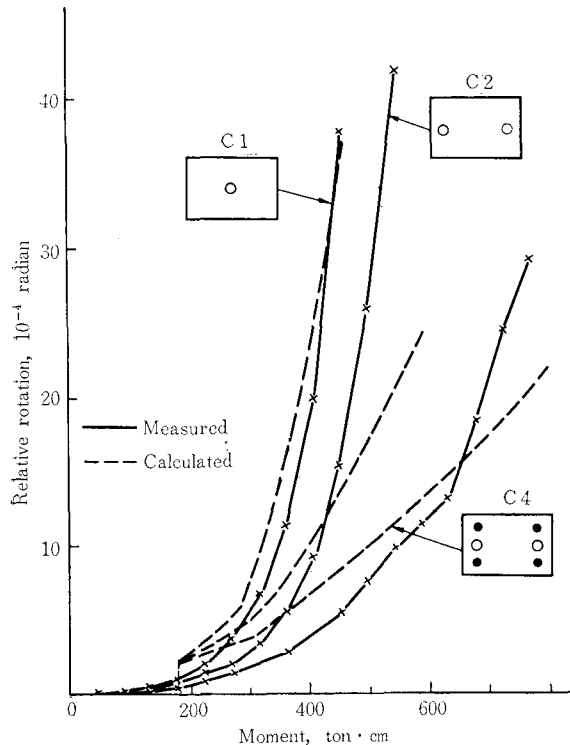


Fig. 11 Calculated Relative Rotation by the Method in 4.3

を上まわり、作用モーメントがさらに大となると、逆に実測値が計算値を上まわることが示されている。これは P C鋼材、あるいは鉄筋の付着の切れる範囲が初期の段階では 15 cm よりも狭く、作用モーメントが増大するにつれて付着の切れる範囲が広がって、ついに 15 cm 以上になるためと考えられる。しかし、上記の仮定に基づく計算値は、P C鋼材の位置が変化した場合にも (C1, および C2), また、鉄筋の補強がある場合にも、おおむね実測値と一致しているので、各種の接合隅角のばね係数を接合柱の断面諸寸法、P C鋼材の量および位置、プレストレス量、補強鉄筋の位置および量とから、与えられている作用モーメント、作用軸力に対して、上記の方法によって、かなりの程度まで、数量的に求められると思われる。

グラウトが施されず、P C鋼材が孔の中を自由に移動できる場合は、その回転変形の機構が非常に複雑であるので、実験結果に基づいて実験式を提示することを試みた。2. の (2) に述べた 2 本柱大型合成ラーメンにおいて、接合プレストレス力を、2t, 5t, 10t と変化させ、各荷重階におけるばね係数と、前期の σ/σ_0 との関係を 2. の (2) に述べた計算方法に基づいて求めた。グラウトがない場合には鋼材の伸びが接合隅角部に集中した形となり、モーメントの増加に伴って、回転変形は累乗的に増加するので、べき乗の形でばね係数を表わすと、それぞれ Fig. 12 に示すようになった。さらに、接合プレストレス σ_0 で一般化して

$$K = \frac{I_R}{I_{15}} \times 10^{(7.4 - 0.03\sigma_0 - 0.55\sigma/\sigma_0)} \quad (\text{ton} \cdot \text{cm} / \text{ラジアン})$$

ただし、 $\sigma/\sigma_0 > 1$ のときを導いたが、これはあくまで $d/e = 0.15$ (d : P C鋼材と圧縮側最外縁の距離、 e : P C鋼材両定着端の距離)

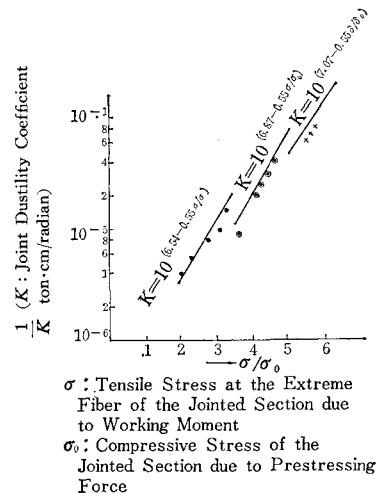


Fig. 12 Joint Ductility Coefficient of the Jointed Corner and σ/σ_0

で行なった上記の実験の範囲内での実験式であって、この応用は、この種接合隅角部の Rigidity の大体の目安を得るための範囲で使用可能であって、グラウトがない場合の接合隅角部のより詳細な Rigidity の検討が必要である。

(5) 実構造物における解析例

接合断面の諸性状から接合隅角部のばね係数を算出し、算出したばね係数を用いて合成ラーメンの応力解析を行なう手法を、実際の構造物に応用するため、試みに東名高速道小牧高架橋を検討した。東名高速道小牧高架橋は、大径のプレキャストPCパイルを柱材として活用し、ラーメン横桁に場所打ちコンクリートを用いて、建設されたものであるが、この場合の柱、横桁両部材ともに、プレキャスト部材を用いたとし、プレストレスによって剛接されたものと仮定して、その場合の合成ラーメンの応力分布を、上記のようにして求めたばね係数を用いて、解析した。柱とはりは、 40 kg/cm^2 の一様なプレストレスによって接合されたとし、 90 ton/m の等分布鉛直荷重が作用する場合（これは中央柱上の桁断面に対する設計荷重にほぼ等しい）および、 180 ton/m の等分布鉛直荷重が作用する場合（これは、中央柱上の桁断面の破壊荷重にほぼ等しい）について解析した。 90 ton/m の等分布の場合、接合隅角部における柱、はりの相対的回転変形は 3.0×10^{-5} ラジアンとなるが、合成ラーメン各部のモーメントは、単体ラーメンの場合と大差ないことが Fig. 13 に示されている。しかし、 180 ton/m の等分布荷重の場合、接合隅角部における柱・はりの相対的回転変形は、 15×10^{-5} ラジアンとなり、この結果、接合隅角部における作用モーメントは単体の場合の85%に減少し、横桁のスパンセンターおよび中央柱上の桁断面におけるモーメントは、4%増加することが示された。より正確な解析を行なうためには、この上さらに、曲げモーメントの増加による部材断面の断面2次モー

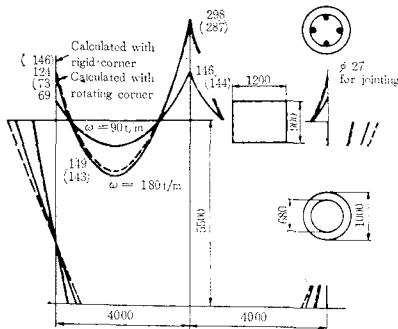


Fig. 13 An Example of Moment Distribution in a Composite Frame with Rotation Calculated by the Method in 2.4

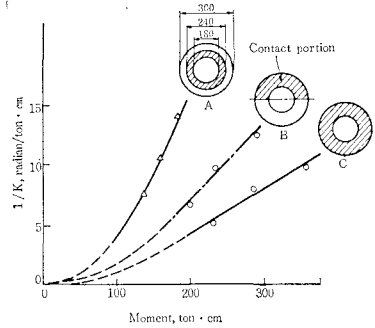


Fig. 14 Effect of Irregularity of Column Head on the "Joint ductility coefficient" $1/K$

メントの減少、その他を考慮に入れなければならないが、上記の解析によっても、かなりの程度まで合成ラーメンの応力分布をとらえ得ると考えられる。

(6) 接合面の不整が、合成ラーメンのモーメント分布におよぼす影響

2.の(2),(3)で述べたことは、柱と桁との接合時に柱上面にキャッピングを行ない、接合面相互の完全な密着を施した場合に適應できることである。急速施工の実を上げるためには、敷モルタルを施す工程を省き直接剛接する方がよいのであって、このような場合には、部材接合面の凹凸、不規則な傾斜、あるいは柱相互の高さの差などが、合成ラーメンの作製時の内部応力、作製後の接合隅角部の Rigidity などに複雑な影響をおよぼすことが考えられる。特に、合成ラーメンの柱が3本以上となる場合には、これらの影響が大きくなると考えられる。

Fig. 1 に示す3本柱合成ラーメン供試体と同様な供試体において、中央の柱の高さと左右の柱の高さとの間に5mm(スパンとの比1/240)程度の差を設けて(中央柱が側柱よりも高い場合をA、低い場合をBとする)プレストレスによって直接剛接し試験した結果、上記の各種不整量はその影響の相違により、2種類に分けられることが示された。

一つは柱相互の高さの差であり、他は接合面全体の完全な密着を妨げる不整である。

前者の不整は、接合時の内部応力の発生に大きな影響をおよぼし、後者の不整は接合隅角部の Rigidity の減少に大きな影響をおよぼすことが明らかとなった。

柱の高さに差があれば、高い柱に桁を接合した後、低い柱の上方では桁が浮いた状態となっている。したがって、この低い柱に桁を接合する場合には、スパンの長さのアームと柱の上面に桁下面が接触するまでに導入したプレストレス力との積で表わされるモーメントが、すでに接合してある柱に作用する。このアームの長さが大き

いために、高さの不整は接合時の内部応力の発生に大きな影響をおよぼすのである。

一方、後者の不整（柱の高さは等しいが、接合平面が正しい平面でない不整）の場合には、少なくとも柱上面の1点は、桁下面と接触している。その接触点とプレストレス導入位置との距離は、スパン長に較べればきわめて短い。したがって、この種の不整が、プレストレス導入時の内部応力におよぼす影響は、高さの差ほど著しくなく、接合隅角部の Rigidity を減少させる効果が大きいことが示されたのである。

実際の不整は、この2種が複雑に組み合わさっているため、その数量的な解析は、非常に困難であるが、次のような手法を用いれば、ある程度各種不整量の影響を数量化することが可能と考えられた。

まず、柱相互の高さの差を無視して剛結した場合の内部応力の算定は弾性計算による。次に柱上面が正しい平面でない不整が接合隅角部の Rigidity におよぼす影響は、グラウトのある場合、2. の (3) に述べた方法によって定量的に解析することが可能と考えられる。

このような考えに基づいて、最も簡単な不整の場合についてその影響の程度を解析した。

すなわち、高さの差はなく、接合柱上面が凹凸上あるいは傾斜しているため、接合面相互の完全な密着が妨げられ、面と面の一部が離れている場合について、その接合隅角部の Rigidity の減少の程度を解析したのである。

Fig. 14 に示したAタイプの不整は、円柱の内壁面付近のみが横桁下面と接している場合であり、Bタイプの不整は、円柱の断面積の1/2が横桁下面と接している場合である。比較のため不整の全くない場合のCタイプを同時に示した。

Aタイプ・Bタイプの不整がある場合には、いずれも、接合隅角部の Rigidity がかなり減少することが示されているが、このような解析を行なうことによってごく少量の不整を許容し、その悪影響の分だけ、柱あるいははりの断面を補強することも、急速施工の目的のためには、有効な方法と考えられた。

一方、この種の不整を調整する手段として、ラテックスモルタルの活用が考えられる。すなわち、ラテックスモルタルを接合柱面上に塗布しておき、面の凹凸あるいは、柱相互の高さの差を、ラテックスモルタルのクッション作用により吸収しようとするものである。試験の結果から、市販のラテックスモルタルのヤング率を下げると、材令3日で、 $8 \times 10^4 \text{kg/cm}^2$ 程度まで減少させることが可能である。

この種のラテックスモルタルを使用すれば、最大1mm程度の不整は、吸収することが可能であるが、それ以上の不整に対しては、ラテックスモルタルのブロック

を、間隔をおいて柱上面に敷き、プレストレスを入れた後、グラウトを施せば、ラテックスモルタルブロックにはかなりひびわれが発生しても、耐久性その他で問題となることはほとんどないと思われ、かつ、プレストレスがグラウトの硬化とともに、グラウト部分に移動してくると考えられるので、有用な方法と考えられた。

3. プレキャストコンクリート直交二部材の接合における、PC鋼材の中間定着に関する研究

上記のようににプレキャスト柱とプレキャスト桁とを剛接合してコンクリート構造物を作製する方式は、土木方面では数例を除いてほとんど実用されていないが、急速施工の見地から今後は普及するものと考えられる。その場合に考慮すべき問題点として、接合隅角部の Rigidity を前章で論じたがその他に、この方式の重要な問題点は、接合方式として簡便容易で、かつ確実な方法を見出すことである。一つの方法として、鉄筋を双方の部材から突出させておいて、溶接し、間詰めコンクリートを打設する方法も考えられるが、より効果的な方法は、プレストレスの利用である。プレキャスト直交2部材を剛結した合成構造の数少ない例の、国鉄総武線荒川東高架橋もプレストレスによる剛接方式を採用した。しかし、この場合には、接合用PC鋼材を基礎に定着し、次に矩形ボックス断面の柱を建て込み、あらかじめ設けられた柱および桁の孔にPC鋼材を通し、これの緊張によって柱と桁とを接合したのであって、これらの方法によれば、桁および柱のPC鋼材の貫通する孔の位置をかなりの精度であわせなければならないし、橋脚が非常に高い場合には、PC鋼材の配置作業が非常に困難となる。このような場合に、中空のプレキャスト柱を利用して、柱の全高の中間にPC鋼材を定着すれば、上記の難点を克服し、かつ経済的にも有利に施工を行なえる場合があると思われる。すなわち、このPC鋼材の中間定着方法は、あらかじめ柱の中間に打設した中詰めコンクリートにPC鋼材を定着しておき、現場では桁に設けた孔にPC鋼材を通して緊張する作業だけを行なって、柱および桁を剛接合しようとするもので、この方法によれば、桁における孔の位置の誤差をPC鋼材の可撓性で吸収できるので、緊張作業は容易となり、PC鋼材の長さも減ずる。また、PC鋼材の腐食は、グラウチングその他で防止することが可能である。

この種の中間定着の応用範囲は必ずしも狭くないと思われるが、実用を提案する前に、定着部の特性、特に終局耐力を確かめておく必要がある。本章では、小型あるいは大型のプレキャストコンクリート中空柱における、

中間定着部の引き抜き試験、あるいは押し抜き試験を行なって、この種定着部の耐力性状を検討し、その実用性を論じた。

(1) 供試体の作製方法ならびに試験方法

柱材に用いたプレキャストコンクリート中空柱は、プレキャストパイプであって、外径が 20 cm・肉厚が 5 cm のパイプ、外径が 30 cm・肉厚が 5 cm~6 cm のパイプ、および外径が 70 cm・肉厚が 11 cm の実物大のパイプである。外径が 25 cm のもの、および 30 cm のものの一部は、プレストレスが導入されていない。他の供試体には、80 kg/cm² 100 kg/cm² のプレストレスが導入されている。パイプの材令が 1 か月以上たった後、パイプ中空部に中詰めコンクリートを打設した。プレキャストコンクリート柱の内壁面には、種々の処理を施した。外径 20 cm および 30 cm のパイプについては、内壁面に鉄筋の突出がある場合について検討を行ない、外径 70 cm のパイプについては、レイタンスを取り除き、さらにコンクリートの表面をはつて凹凸を施した処理の場合について検討を行なったのである。前記のような表面処理を施してあるパイプ中空部に、外径 20 cm および 30 cm の供試体の場合には 4 種 ϕ 22 mm P C 鋼棒 1 本を、中詰めコンクリートの中央に定着板を用いて定着した。外径 70 cm のパイプの場合には、P C 鋼材は定着せず、単に中詰めコンクリートのみを打設した。これは、多本数の P C 鋼材を同時に一様に引き抜くことが試験装置の関係上不可能だったので、押し抜き試験にあてたためである。

このようにして作製した外径 20 cm および 30 cm のパイプの場合には、P C 鋼棒を油圧アムスラー型 100 t 万能試験機により引き抜き、外径 70 cm のパイプの場合

は、Fig. 15 に示すように東大大型試験室の 2000 t 万能試験機により押し抜いた。引き抜き試験も押し抜き試験も荷重の作用点は中詰めコンクリート端面であって、試験方法の相違による中間定着部の終局耐力の相違はほとんどないものと考えられる。

(2) 中間定着部の終局耐力

試験の結果は Table 1 および Fig. 16 に示したようであった。Fig. 16 の上部に PD 1, PD 2 の平均付着応力度と引抜き量との関係を示したが、これらの場合には引抜き量が 1 mm 以上となり、付着が完全に切れたと思われる状態になっても、パイプ表面にはひびわれが全く認められなかったのである。すなわち、これらはプレキャスト柱の内壁面と中詰めコンクリートとの間に付着破壊を生じたのである。

また、Fig. 16 の下部に PD 12 と PD 14 の押し抜き荷重と押し抜き量との関係を示したが、これらの供試体においては、押し抜き量が 0.2 mm 程度のとき、パイプに縦ひびわれが発生し、同時に押し抜き量が急増し始めたのである。すなわち、これらの破壊は、中詰めコンクリートのすべりがほとんど発生しないうちにコンクリート柱壁面に縦ひびわれが発生し、そのひびわれ幅が増大する引張り破壊と考えられる。

前記のように、この種定着部の破壊モードには、2 種類あることが明瞭に示された (Table 1 参照)。P C 鋼材に緊張力を与えると中詰めコンクリートとプレキャスト中空柱内壁との境界面には付着応力が生じ、コンクリート柱の壁内には円周方向の引張応力が発生して、この種定着部の終局引抜き破壊モードは、これらの 2 種類の応力と各応力発生箇所の強度との大小関係によって定まるものと考えられる。壁厚が内半径に比べて大きな小口径のコンクリート柱 (外径 20 cm~30 cm) では付着破壊する 경우가多く、壁厚が内半径に比べて小さな大口径のプレキャストコンクリート柱では引張破壊が卓越する。

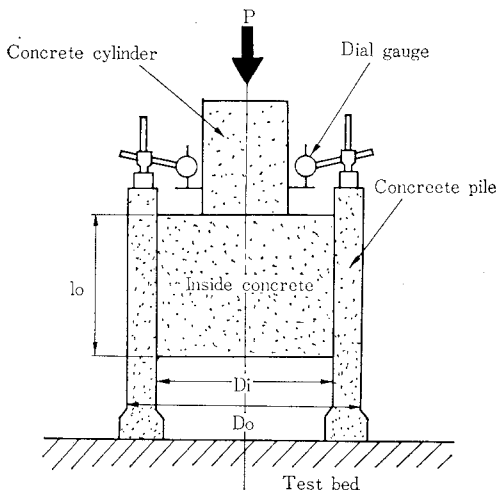


Fig. 15 Test Procedure of Push-out Test

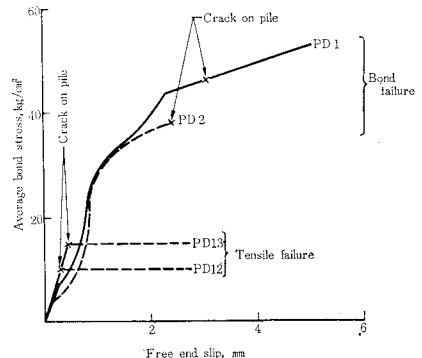


Fig. 16 Relation Between Bond Stress and Free End Slip

Table 1 Specimens and Test Results

	Properties of piles						Comp. Strength of inside kg/cm ²	Test results							
	D _o cm	D _i cm	I _o cm	Stress kg/cm ²	Comp. strength kg/cm ²	Inside surface		Fail. mode	P _u ton	Ult. bond stress	Cal. of P ton	$\frac{P_u}{P_{cal}}$	α		
PD1	20	10.8	5	0	585	shear key	360	Bond	7.9	47	25.3	1.23	0.81		
PD2	20	10.8	10	0	585		360	Bond	13	39					
PD3	20	10.8	10	0	585		440	Bond	20	(60)					
PD4	30	18.2	20	0	585		440	Tens	31						
PD5	30	19.6	10	0	585		440	Bond	20	32					
PD6	30	18.0	10	80	565		350	Tens	26	22.5				1.02	0.98
PD7	30	18.0	20	80	565		350	Tens	26	25.5				1.02	0.98
PD8	30	20.0	10	80	565		350	Tens	20	23.6				0.85	1.18
PD9	70	50.0	25	60	500	220	Tens	60	114	(0.53)	1.89				
PD10	70	50.0	25	60	500	305	Tens	47	114	(0.41)	2.44				
PD11	70	50.0	35	60	500	305	Tens	68	114	(0.60)	1.67				
PD12	70	50.0	45	60	500	305	Tens	71	114	(0.62)	1.61				
PD13	70	50.0	27	60	500	210	Tens	75	114	(0.66)	1.51				
PD14	70	50.0	27	60	500	520	Tens	118	114	1.04	0.96				
PD15	70	50.0	35	60	500	520	Tens	93	114	0.82	1.22				
PD16	70	50.0	45	60	500	520	Tens	110	114	0.97	1.03				

引張破壊を生じる場合についてさらに検討するため、大口径 (70 cm) のパイルを用いて、付着長・付着面の処理の程度・中詰めコンクリートの品質を 2, 3 種類に変化させて、これらの要因が破壊耐力におよぼす影響を試験した。その結果、この種の定着部が引張破壊を生じる場合には、付着長を極端に長くしても有効ではなく、効果的な付着長の極値が存在すること、中詰めコンクリートの品質が劣る場合には、引張破壊耐力も減少すること、パイル内面を処理しない場合には、終局耐力は十分な付着がある場合の 60~70% となる事等が判明した。

前記のように、この種定着部の引張破壊耐力は、種々な要因によって影響されることが明らかとなったので、この種定着部の応力解析を、軸対称問題として、有限要素法によって、理論的にも取扱いその破壊機構の解明を行なった。

まず、直径 70 cm の大型パイル中間定着部を Fig. 17 に示すようなリング要素に分割し、載荷重 100 t の場合について各部分の応力を求めた。その結果、まず、中詰めコンクリートとプレキャスト柱内壁との打継面の端部に、その両者をひきはがすかなり大きな引張応力ならびに、せん断応力の作用するのが認められた (Fig. 17 参照)。打継目の引張強度・せん断強度がかなり低いことがこの種定着部の最弱点であって、まずこの先端部から付着が切れ、それが徐々にもう一方の端部に進行するものと考えられる。

先端部で、付着が切れることは実験的にも認められたことである。そこで、Fig. 17 の点 2 あるいは点 3 まで付着が切れた場合を想定して応力を求めた。その結果 Fig. 18 に示すように、付着力の存在する限界点にかなり大きな軸方向引張応力の応力集中が発生し、それは、付着の切れた範囲が大きくなればなるほど、はなはだし

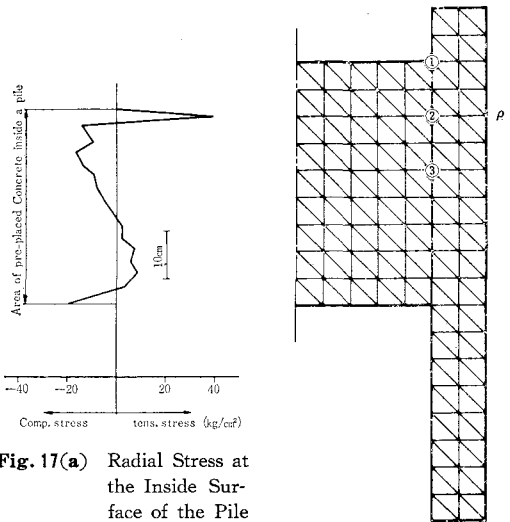


Fig. 17(a) Radial Stress at the Inside Surface of the Pile (Calculated at 100 ton Push off Force)

(b) Ring Element Mesh of Anchor Zone

くなる事が判明した。それで次に、この応力集中によって、プレキャスト中空柱内壁面にリング状のひびわれが発生したとして、この場合の応力分布を計算した。この場合の解析結果は、フープ方向の引張応力がいずれの場合も、10 kg/cm² 以下であって、大きくない。したがって、実験における終局荷重が作用したとしても、この応力状態では、プレキャスト中空柱壁には、軸方向ひびわれは発生しないと思われる。しかし、実験の結果によれば、すべての外径 70 cm のパイルについて、軸方向ひびわれの発生が観測され、続いて押し抜き耐力が失われるのが認められたのであって、これらの実験の結果、ならびに応力解析の結果は次のような破壊機構を示すものと考えられる。

すなわち、実際のパイルの内面はかなり凹凸があっ

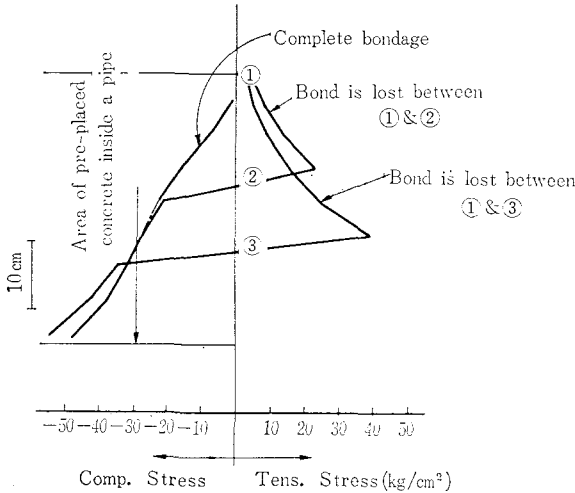


Fig. 18 Axial Stress at the Inside Surface of the Pile (calculated at 100 ton Push off Force)

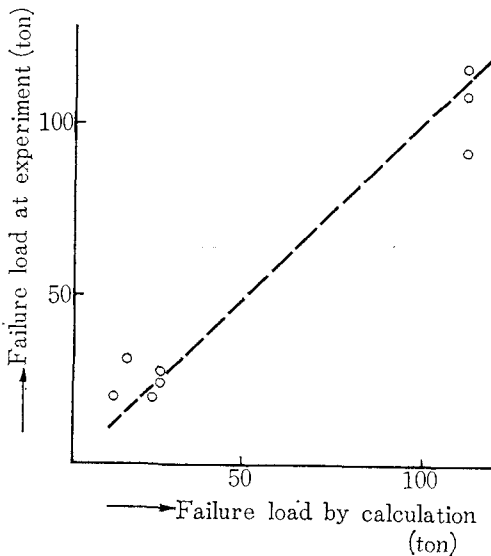


Fig. 19 Comparison of Calculated Tensile Failure Load and Experimental Failure Load

て、内径が軸方向に沿って一定でないが、上記の解析は、プレキャスト中空柱の内径が、付着長のすべての範囲で一定に保たれているとして、行なっているため、計算上の円周方向応力が実際よりかなり少なくなっていると考えられる。

たとえば、この種の問題であって、上記の計算上の条件がかなりよく確保されていると考えられる鋼管柱に、CSA モルタルを打設し、押し抜き試験を行なった場合の結果は、解析による計算値と相当に一致しているのである。

中詰めコンクリートの径が、プレキャスト中空柱の軸方向に沿って変化して、狭い中空部に内径のより大きな中詰めコンクリートを押し抜く場合には、付着の切れるに従って、大きなくさび作用が発生し、これに基づく大きな円周方向応力が発生すると考えられる。これは簡単な応力計算から容易にわかることである。したがって、この種引張破壊は上記のくさび作用によるものと考えられる。

このような応力解析および考察の結果に基づけば、前記の現象、すなわち、(i) この種定着部が、円周方向の引張破壊を生じる場合、付着長をある一定値以上長くしても、その終局耐力は変化しない、(ii) レイタンスの存在によって付着力が減少すれば、終局耐力も減少する、(iii) 中詰めコンクリートの品質が減少すれば、終局耐力も減少する、は次のことを示している。

(i) 付着長がある程度以上となれば、その区間内には軸方向の応力集中部分ならびにくさび作用の大きくなる部分が必ず存在するのであって、プレキャスト中空柱の引張破壊は、その局所の破壊によってひき起こされるものであるため、付着長をある限度以上に長くしても有効でない、(ii) レイタンス等による付着力の喪失は、付着なしの区間を大きくさせ、したがって応力集中の程度をはなはだしくさせ、かつくさび作用をひき起こしやすくする、(iii) 中詰めコンクリートの品質が劣る場合にも (ii) と同様な悪影響が生じる。

内径の変化の影響・付着の程度を考慮に入れて、この種定着部の終局耐力を計算することは、はなはだ困難であるが、発生するフープ方向力は、内径の変化の程度に比例すると考え、その程度は、各パイルにつきほぼ等しいとすれば、ある程度まで、終局耐力を算定することが可能と思われた。すなわち円周方向の引張応力が発生する範囲は、付着の切れる範囲の大きさによっても影響を受けられるが、内壁面のレイタンスを完全ににとって処理した場合に、Table 1 の実験結果から 0.5 D 以内であることが示唆される。この範囲の中空柱壁の円周方向の全引張抵抗が、くさび作用によって発生する円周方向力に等しいとして、円周方向力と軸力との比を求めたところ、内壁面のレイタンスを完全に除去した場合約 15% となった。この力の割合は、载荷条件の等しい供試体においてはほぼ等しいと考えられたので、この値を基礎として、付着が著しく劣る場合、中詰めコンクリートの品質が低下している場合等の終局耐力の低下を、くさび作用が発生しやすいためと考えると、発生しやすいの程度を示す係数 α を求めると Table 1 のようになる。このようにすれば、付着の良否・中詰めコンクリートの

品質の程度が、引張破壊耐力におよぼす影響がある程度まで評価できるのである。

引き抜きあるいは押し抜きによる引張破壊の実測荷重と、上記の仮定に基づく計算上の破壊荷重とを比較すると Fig. 9 のようになった。少数の実験結果に基づいたものであるが、外径の相当に異なる 20 cm, 30 cm, および 70 cm のパイルについて、計算値は実測値とほぼ一致している。

定着部が付着破壊する場合の破壊機構は、比較的簡明であり、破壊耐力は、平均付着強度と付着面積との積で与えられる。この場合には、中詰めコンクリートはプレキャスト柱から圧力を受け 3 軸圧縮の状態となっている。このために、付着強度は、単なる打継面における付着強度よりも大きくなるなど考えられる。

以上、この種定着部の耐力を引張破壊する場合と、付着破壊する場合とに分けて論じたが、いずれか小さい方が終局耐力を支配するのは当然である。現在の JIS に定める P C パイルは、この種の柱材に用いるためには、らせん鉄筋量が過少であるので、大口径の P C パイルでは、引張破壊を生じ定着耐力が低くなる。したがって、大口径の P C パイルの中空部に P C 鋼材を定着するためには、定着部付近にあらかじめ十分ならせん鉄筋を配置しておくか、円周方向プレストレスを導入しておく必要があると思われる。内壁面に沿って軸方向の鉄筋を配置することならびに内壁面に鉄筋等を突出させて、付着の確保をはかることも、終局引き抜き耐力の増加に、かなり資すると考えられるので、これらの処置を講ずることも有効であろう。これらのらせん鉄筋あるいは円周方向のプレストレスの所要量については、上記の方法によりある程度の目安を得ることが可能と思われる。たとえば、外径 70 cm, 壁厚 10 cm の P C パイルに対して、270 t の引抜き耐力を確保するためには、SR 24 ϕ 10 mm の丸鋼を 15 cm ピッチ程度でらせん状に配置したり、あるいは 60 kg/cm² 程度の円周方向プレストレスを導入する必要がある。これらの補強効果は、さらに実験によって確かめる必要があるが、この種定着法の実用性は明らかであり、プレキャストコンクリート柱とプレキャストコンクリート桁との接合方法として有効な手段と考えられるのである。

5. 結 論

プレキャストコンクリート部材によるコンクリート合成構造の利用がもたらす利点は多いが、特に建設工期の短縮化が著しい利点としてあげられる。わが国における近年の建設需要の増大に伴い、上記の利点が注目されて、プレキャストコンクリート部材によるコンクリート

合成構造の利用が、強く要望されるようになってきている。コンクリート合成構造のうち、ある種の合成構造、たとえば、プレキャスト I 型ばりにフランジコンクリートを打ち継いだ合成桁などは、かなり実用されているが、プレキャスト部材の活用をさらに一歩進め、プレキャスト部材のみによって構造物を作製すれば、プレキャスト工法の利点はいっそう発揮される。特に直交する 2 部材をプレストレスによって接合して製造されるものは、合成ラーメン構造その他に応用されるものであって一般に広く応用可能な構造であるが、その力学的性状に不明な点も多く、この種の合成構造の実用例は数少ない。

この種の構造を活用するための第一歩は、接合隅角部の力学的性状を明らかにすることであるが、その代表的な合成ラーメン構造に関して、実験を行なった結果、

(1) プレストレスによって合成されたラーメンにおける接合隅角部の Rigidity は作用モーメントによる曲げ引張り応力度が、接合プレストレスによって導入された圧縮応力度以下の場合には、単体の場合と大差ないが、作用モーメントが、その限界を越えると、Rigidity は減少し始め、合成ラーメンのモーメントは、鉛直荷重に対しては、あたかも柱の stiffness が減少したかのごとく分布し、水平方向荷重に対しては、あたかも桁の stiffness が減少したかのごとく分布することが示された。これらの分布は、接合隅角部にゼンマイ状のばねを仮定し、このばね係数を適当に取ることによって、初期荷重階から終局荷重階に至るまでの全過程について数値解析できることが示された。

このばね係数 K は、グラウトが施してあって P C 鋼材が付着を有する場合には、接合隅角部に作用するモーメント M ・作用軸力 P ・接合柱の断面形状・プレストレス量・補強材の量および位置等から

$$K=15.0 \frac{M}{\phi} \quad (\text{ton}\cdot\text{cm}/\text{ラジアン})$$

によって、ある程度まで決定できることが明らかとなった。ここで ϕ は、平面保持則と Hognestad の応力ブロックを用いて求めた作用モーメント M および作用軸力 P に対する接合柱面の曲げ変形である。グラウトが施してなくて、P C 鋼材と柱のコンクリート部分が自由に相対的変位を生じうる場合には、柱の曲げ変形が接合隅角部に集中するため、接合隅角部における柱・桁の相対的回転変形は、グラウトのある場合に比べて、かなり大きくなる。この場合の接合隅角部の Rigidity を決定する要因としては、グラウトのある場合に述べた要因のほか、P C 鋼材両定着端の距離がかなり複雑な影響をおよぼし、Rigidity 接合隅角部のを解析的に求めるのは非常に困難であって、適当な実験式を用いる必要がある。たとえば、円環断面の中心、4 種 ϕ 22 mm の P C 鋼棒を

配置し、両定着端の距離を約 1 m とした場合、およびそれと相似な断面の場合について、

$$K = 10^{(7.2 - 0.03\sigma_c - 0.55\sigma_c/\sigma_s)} \times \frac{I_R}{I_{15}} \text{ (ton} \cdot \text{cm/ラジアン)}$$

の式が導かれた。

(2) 合成ラーメンにおける柱および桁の剛比が柱および桁の作用モーメント、作用軸力に影響をおよぼすのは当然であるが、接合隅角部の Rigidity におよぼす影響は間接的であり、直接的な影響、すなわち接合部における柱の断面形状・接合用 P C 鋼材の配置・接合プレストレス量およびその分布等の影響に比べれば少ないことが確かめられた。これは、(1) の結論を実験的面から立証するものでもある。

(3) 今日までに実用された数例の合成ラーメンにおいては、横桁を場所打ちコンクリートとしたり、柱上面に敷モルタルを施工したりしている。これは、いかに入念に施工しても、柱相互の高さに若干の差を生じたり、あるいは柱の上面がいくぶん凹凸となるのをまぬがれることができないためである。しかし、急速施工の実をあげるためには、この工程を省き桁を直接柱に接合するのが望ましい。この可能性を検討するため、桁を柱に直接接合し、不整量のおよぼす影響を実験した結果、柱の高さの不整が最も著しい悪影響をおよぼすことが明らかにされた。たとえば、3 本柱のラーメンにおいては、高さの差がスパンの 1/1 000 程度であっても、無視できない程度の内部応力が発生することが示された。高さの差が著しい場合は論外であるが、入念に施工した際に生じる微少な不整量の影響をあらかじめ予測し、部材の耐力をその分だけ増加させておくのも実用的な方法と考えられた。たとえば、柱相互の高さは同一であっても、柱の上面が水平面でない不整がある。このような場合にはそれらの影響を(1)に述べた方法で解析すれば、ある程度まで合理的にこの種の合成ラーメンを設計することが可能であると思われる。

(4) プレストレスによって、プレキャストコンクリート桁とプレキャストコンクリート柱とを剛接する場合、P C 鋼材の一方の定着端を基礎の中に埋込むのが、従来の方法であった。

この定着方法に較べて、適当な肉厚とし、らせん鉄筋

で十分に補強した中空プレキャストコンクリート柱を用いて、その中空部に P C 鋼材を中間定着する方法は、より簡便で高い橋脚にもより容易に適用できると思われる。

P C 鋼材のこの種定着方法においては、定着部の引き抜き強度が主要な問題であるが、試験の結果から、定着部の引き抜き破壊モードには、(i) 中詰めコンクリートとプレキャスト柱内壁面との付着破壊、(ii) 円周方向応力によるプレキャスト柱壁体の引張破壊、の 2 種類が存在することが明りょうに認められ、(i) による場合の破壊強度が単なる付着強度と付着面積の積として与えられ、(ii) による場合には、軸方向に沿う中詰めコンクリートの直径の変化の程度によって、くさび作用によって発生する円周方向の引張力を与え、その円周方向応力の発生する範囲を中詰めコンクリートの品質の程度、内壁面の処理の程度等によって適当に定めることによって引き抜き耐力をある程度計算することが可能と思われる。

これらを要するに合成ラーメンの設計にあたっては設計荷重作用時の隅角部モーメントに対し、フルプレストレッシングの状態となるようにプレストレスを導入すれば、設計荷重以下の荷重に対しては合成ラーメンのモーメント分布は、隅角部が剛である単体ラーメンの場合と、ほとんど等しくなる。なお、接合用 P C 鋼材を適当に分散して配置シグラウトを施したり、鉄筋で補強したりすれば終局荷重に近い荷重に対しても単体ラーメンと同程度の力学的性状を付与することができる。この場合、適当なプレストレス量・P C 鋼材の位置・補強鉄筋の量および補強鉄筋の位置を検討するためには 2. で述べたばね係数を使用することができるのである。

参 考 文 献

- 1) プレストレスト コンクリート 技術協会：プレストレストブロック工法施工マニュアル。
- 2) 大沢清志・日浦一雄：P C プレキャストブロック工法(京王帝都電鉄多摩川の施工例)，土木技術，24 卷，7 号。
- 3) 寺本義雄：首都高速道路におけるセルラー 栈橋工法について，建設，1963 年 8 月。
- 4) 市原誠夫・山根 巖：小牧高架橋(東名高速道路)のセミプレハブ方式円柱橋脚，橋梁と基礎，1 卷，12 号，昭和 42 年 12 月。

(1972.4.3・受付)