

横締されたプレキャスト・コンクリート版の静的挙動に関する研究 STATIC BEHAVIOR OF Laterally TIGHTENED PRECAST CONCRETE PLATES

吉 田 博* 榎 谷 浩** 井 原 朋 美*** 藤 井 智 弘****
 By Hiroshi YOSHIDA, Hiroshi MASUYA, Tomomi IHARA and Tomohiro FUJII

An assembled precast concrete plate laterally tightened by steel bars can not regarded as a perfectly unified structure. Slip may yield between surfaces at the sides of isolated concrete plate and also rotation may occur there.

In this study, firstly the slip behavior at the concrete surfaces compressed under a certain pressure was experimentally investigated. Secondly, the experiments for the transformation of lateral bending moment beyond the joint of the contacted surfaces of each plate were carried out. From these test results, rigidities of springs for shear force and lateral bending moment were evaluated.

The assembled precast concrete plate was replaced by a model consisted of plate elements and the springs, and then analyzed by means of the finite element method.

Finally, a model test of the assembled precast concrete plate was carried out and compared with the analytical results. From these studies, a rational analytical method was proposed.

1. ま え が き

最近、品質管理の行き届いた工場において製作されたプレキャスト部材が、現場で横締により一体化され、構造物としての機能を有するように仕上げられることが多くなってきた(図-1)。例えば、T型けた橋またはスラブ橋として用いるもの、およびプレハブPCのスノーまたはロックシェッドの屋根として用いるもの等が見受けられる。このような、プレキャスト部材を横締して一体化し、構造物として使用する場合、(1)必要とする横締力および横締間隔、(2)静的および動的荷重に対する挙動、(3)解析法、および(4)耐荷力、破壊挙動、などについて明らかにする必要がある。

本研究では、まず、静的荷重のみを対象とし、問題とされる以下の点を解明するために、基礎的実験、模型実験およびそれらに基づいた理論的考察を行った。

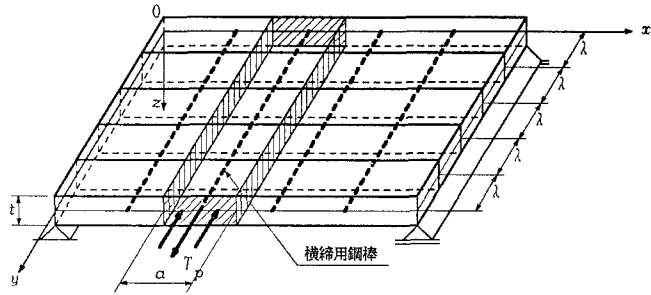
(1) 横締めして一体化されたプレキャスト版が荷重作用を受けるとき、部材間にはせん断力が発生し、このせん断力がある一定値をこえると部材間で上下方向のスリップが発生する可能性がある。このスリップが発生するときの横締力と荷重の関係を明確にする必要があると共に、スリップが発生した後の挙動を明らかにする必要がある。

(2) ある横締力で緊張されて一体化されているプレキャスト版に荷重が作用するとき、ある大きさの荷重まではこれらの部材は完全に一体化して挙動すると考えられるが、ある大きさ以上の荷重では部材相互間

*	工 博	金沢大学教授	工学部土木建設工学科 (〒920	金沢市小立野2丁目40-20)
**	工 修	金沢大学助手	工学部土木建設工学科 (〒920	金沢市小立野2丁目40-20)
***		金沢大学技官	工学部土木建設工学科 (〒920	金沢市小立野2丁目40-20)
****		日本サミコン(株)技師	金沢営業所 (〒921	金沢市大額1丁目413番地)

での部材軸（ x 軸）まわりの曲げモーメント（以後、横曲げモーメントと言う）の伝達是不完全となる。横締力とこの伝達横モーメントの関係を明確にする必要がある。

（３）上記２つの項目が明らかとなれば、それらの関係を考慮した解析方法を開発し、一般性のある横締されたプレキャスト版の挙動を明らかにすることが可能となる。



図－１ 横締されて一体化された版

まず、基礎的実験として、横締力によりある圧力で接触しているプレキャスト部材間のせん断力によるスリップ試験を行い、横締力と部材間にスリップが発生するせん断力の関係を明らかにする。つぎに、横締された部材間での横モーメントの伝達に対するばね定数の検討実験を行い、横曲げモーメント分布を決定するための基礎資料を得る。さらに、実験室内に長さ 450cm、幅 80cm、高さ 22cm の逆 U 型断面を有する 5 枚のプレキャスト PC 版を並べ、横締して一体化させたものをスパン 400cm で単純支持した試験体を組み立てた。この試験体に各種の荷重を作用させて、ひずみおよびたわみ等の測定を行う。これらの実験結果に基づき、横締されたプレキャスト版の解析のためのモデル化を行い、妥当な解析法を開発する。

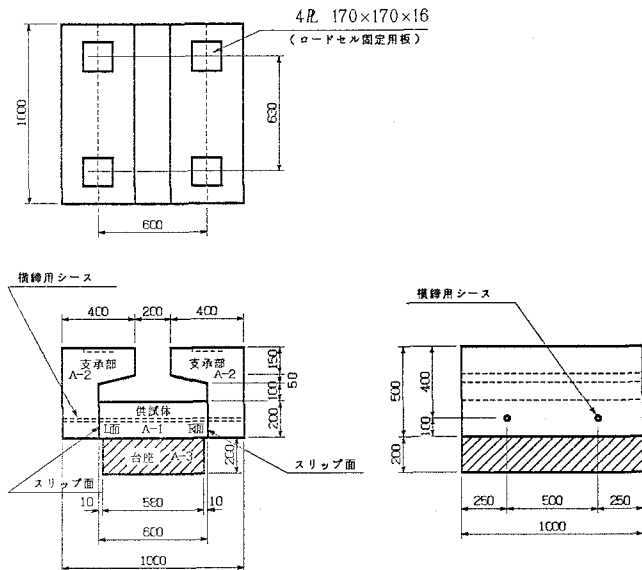
本研究は、これらの基礎的実験、模型実験および理論解析結果をとりまとめ、横締により、一体化されたプレキャスト版の静的挙動について検討を行ったものである。

２ プレキャスト部材間のせん断力によるスリップ試験（実験－Ａ）

横締されたプレキャスト部材間には、荷重がある一定値より大きくなると、荷重によって発生するせん断力によりスリップが生ずる。

このスリップが生ずるときの荷重の大きさと横締力および横締間隔、接合面の処理方法等との関係を明確にする必要がある。

ここでは、これらの関係を究明するための基礎的モデル実験について述べる。横締力としては２種類を用い、接合面の処理方法としては３種類、すなわち、無処理、モルタル処理およびモルタル・グラウト処理を用いた。無処理の場合は、接合面での横締力に対するスリップ発生荷重の比を求めることであり、モルタルおよびモルタル・グラウト処



図－２ スリップ試験用供試体および装置

理においては、接合面の処理方法による抵抗せん断力の影響について検討を行うことが目的である。

(1) 供試体

供試体および載荷装置の一般図を図-2に示す。供試体は図-2に示すA-1部分であり、A-2は支承部分であり、左右2体で1組となっており、この部分の上部に荷重を作用させることにより、供試体A-1の両端に純粋なせん断力を作用させることができるようになっている。A-1は2体のA-2に挟まれており、下面より10cmの位置にφ32mmのシース2本が配置されている。これらA-1およびA-2のシース内に通したP C鋼棒(φ23mm)を緊張することにより、供試体A-1に横締力を与えることができる。以後、このA-1部分をせん断供試体と呼ぶことにする。A-3はA-1の台座になるもので、A-1より幅が両端で各1cmずつ狭くなっており、荷重による供試体のスリップを拘束しないようになっている。

支承部分A-2の上面には、それぞれ2枚の銅板が埋め込まれており、この上にロードセルをボルトで固定できるようになっている。また、せん断供試体A-1と支承部分A-2とのスリップを検出するために、それぞれの側面に電気的変位計(東京測器研究所製 CDP-10)を設置した。

せん断供試体と支承部分の接合面の処理方法としては、接合面が、全く処理が施されていない無処理、接合面にモルタルを1cmの厚さで打設して、処理を施したモルタル処理、および接合面にモルタル処理を施した後、養生して所定の本締めを行った後、シース孔とP C鋼棒の隙間にグラウト注入したモルタル・グラウト処理の3種類とした。なお、用いたコンクリートは28日材令平均圧縮強度 $\sigma_u=667\text{kg/cm}^2$ 、および平均ヤング率 $E_c=415,000\text{kg/cm}^2$ のものである。

(2) 実験方法

横締には、センターホール・オイルジャッキを使用した。また、緊張力の測定には、センターホール・ロードセルおよび静ひずみ測定器を用いた。モルタル処理およびモルタル・グラウト処理においては、接合面のモルタル打設後3日で横締を行った。グラウトはプレストレス導入後に行った。

①横締力：載荷装置の容量の関係で、横締力は表-1に示すとおりとした。なお、表中、横力とは供試体の両側面に作用する圧縮力で、P C鋼棒1本当りの横締力の4倍であり、全横締量の2倍である。

②荷重：荷重載荷装置として、

サーボパルサー(島津製作所製 EHF40 容量40tf)を使用した。

サーボパルサーによる載荷荷重を供試体の支点部でさらに測定するために、ロードセル(東京測器研究所製 CLU-20)を4個使用した。ロードセルの出力は動ひずみ測定器を介して、マイクロコンピュータ(TEAC製 PS-85)に入力し、周波数2HzでA/D変換を行ってサンプリングし、明確な変位が確認されるまで、徐々に荷重を上げていった。サンプリン

表-1 各種処理方法に対する横締量

接合面 処理方法	横締力(1本当り) tf (kN)	横力 tf (kN)
無処理	2.5(24.5)	10.0(98.0)
	5.0(49.0)	20.0(196.0)
モルタル処理	1.5(14.7)	6.0(58.8)
	3.0(29.4)	12.0(117.6)
モルタル・ グラウト処理	1.5(14.7)	6.0(58.8)
	3.0(29.4)	12.0(117.6)

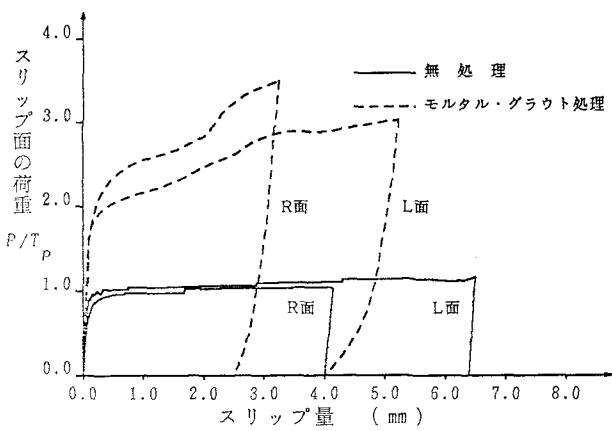


図-3 荷重と接合面のスリップ量

グした数値データはカセットテープに記録させた後、すべりが発生したときの荷重等を計算した。

③変位：供試体および支承部側面に設置された変位計による相互のスリップの測定方法は、荷重の場合と同様である。

接合面が無処理の場合は、1つの供試体で2種の横締力に対し、各々3回ずつ実験を行い、同様の実験を供試体を交換して、合せて2つの供試体について行った。モルタル処理、およびモルタル・グラウト処理の場合には、それぞれ、供試体2個について実験を行った。

(3) 実験結果

静的載荷試験における荷重と供試体接合面における変位の関係を、総ての実験についてグラフ出力した。図-3は接合面が無処理の場合とモルタル・グラウト処理の場合について、供試体の左右両面での荷重と接合面でのスリップ量の関係を示したものである。なお、荷重は供試体の左右での各々2個のロードセル

による測定荷重の合計 P を全横締量 T_p で無次元化して示してある。図中に示した無処理の実験結果は、 P C鋼棒1本当り5tfで横締したものであり、モルタル・グラウト処理の実験結果は、1本当り3tfで横締した場合のものである。これらの荷重-変位関係より、接合面にスリップが発生する荷重を明瞭に識別することが可能である。

以下に、各接合面の処理方法ごとの実験結果を示す。

a) 無処理の場合

無処理の場合の全横締量、供試体の両面に作用する横力、接合面でスリップが発生したときの全荷重値、およびこれらより計算した横力に対するスリップ発生荷重の比を表-2に示す。この表より、これらの値にはかなりのばらつきがあるが、無処理の場合の接合面にスリップが生ずる荷重は横締力に関係なく、横力の約0.7倍であることが明らかとなった。

b) モルタル処理およびモルタル・グラウト処理の場合

モルタル処理およびモルタル・グラウト処理における全横締力、横力、接合面でスリップが発生したとき

表-2 スリップ発生時の荷重値(無処理)

実験 No	全 横 締 量 t f (kN)	横 力 t f (kN)	供 試 体 No	スリッ プ 発 生 荷 重 t f (kN)	スリッ プ 発 生 荷 重 横 力
1	5.0 (49.0)	10.0 (98.0)	1	8.85 (86.7)	0.885
2				8.09 (79.3)	0.809
3				7.45 (73.0)	0.745
4			2	7.55 (74.0)	0.755
5				8.06 (79.0)	0.806
6				7.16 (70.2)	0.716
平 均				7.86 (77.0)	0.786
1	10.0 (98.0)	20.0 (196.0)	1	17.58 (172.3)	0.879
2				14.05 (137.7)	0.703
3				16.22 (159.0)	0.811
4			2	14.78 (144.8)	0.739
5				14.00 (137.2)	0.700
6				12.69 (124.4)	0.635
平 均				14.89 (145.9)	0.745

表-3 スリップ発生時の荷重値(モルタル)

実験 No	全横締量 tf (kN)	横力 tf (kN)	スリップ 発生面	スリップ発生荷重 tf (kN)	スリップ発生荷重 横力
1	3.0 (29.4)	6.0 (58.8)	L	18.18 (178.2)	3.030
2	6.0 (58.8)	12.0 (117.6)	R	31.10 (304.8)	2.592
平 均					2.812

表-4 スリップ発生時の荷重値(モルタル・グラウト)

実験 No	全横締量 tf (kN)	横力 tf (kN)	スリップ 発生面	スリップ発生荷重 tf (kN)	スリップ発生荷重 横力
1	3.0 (29.4)	6.0 (58.8)	L	15.26 (149.6)	2.544
2	6.0 (58.8)	12.0 (117.6)	R	26.68 (261.4)	2.224
平 均					2.384

の全荷重値およびその値を横力で除した値を、それぞれ、表-3および4に示す。接合面を処理した場合には、左右の接合面が同時にスリップする場合は少なく、どちらか一方のみでスリップが発生するケースが殆どであるため、最初にスリップが発生した面についてのスリップ荷重およびこれに対応する比を求めた。

これらの値は比較的ばらつきが大きく、明確には言及できないが、接合面が処理されている場合、接合面にスリップが生ずる荷重は、横力の約2.5倍と大きくなるが、グラウトの影響は特に認められない。モルタル処理の場合は無処理の場合と同様、スリップが発生した後、荷重が一定のままスリップ量が増大するが、モルタル・グラウト処理の場合は、スリップ量が増大し始めても、前者に比べある程度のせん断抵抗力を有していることがわかる。

3. 横締めによるプレキャスト部材間でのばね定数の検討実験（実験-B）

横締めされたプレキャスト版上に荷重が作用する場合、部材軸に沿った曲げモーメントが発生すると同時に、当然横曲げモーメントも発生する。本実験では、この横曲げモーメント分布は、横締めされた版が完全に一体化していると仮定して求めることが可能かどうか、また、可能でなければどのような解析法が妥当かについて検討するための基礎資料を得るためのものである。

横締めされた版は、部材軸直角方向に配置されたPC鋼棒によりプレストレスが導入されて、相互に密着している。このように、プレストレスが導入されて互いに密着している版に曲げモーメントが作用するときの挙動を究明するための基礎的モデル実験について述べる。

（1）供試体

図-1に示す横締めにより一体化された版から、斜線で囲まれた部分を取り出してモデル化した。したがって、供試体は図-4に示すように、100cm×100cm厚さ22cmの独立した正方形鉄筋コンクリート版5枚から成り、それぞれの版には上面より17cmの位置に等間隔に3本のφ32mmのシースが配置されている。これらの正方形版5枚を一行に並べ、シース内にφ23mmのPC鋼棒を通し、緊張して正方形版5枚を一体化し、これをスパン4mで単純支持し、そのスパン中央に荷重を載荷して、その挙動を調べようとするものである。なお、用いたコンクリートは実験-Aと同一のものである。

このように一体化された長さ5mの版を単純支持し、そのスパン中央に荷重を作用させると、荷重が小さ

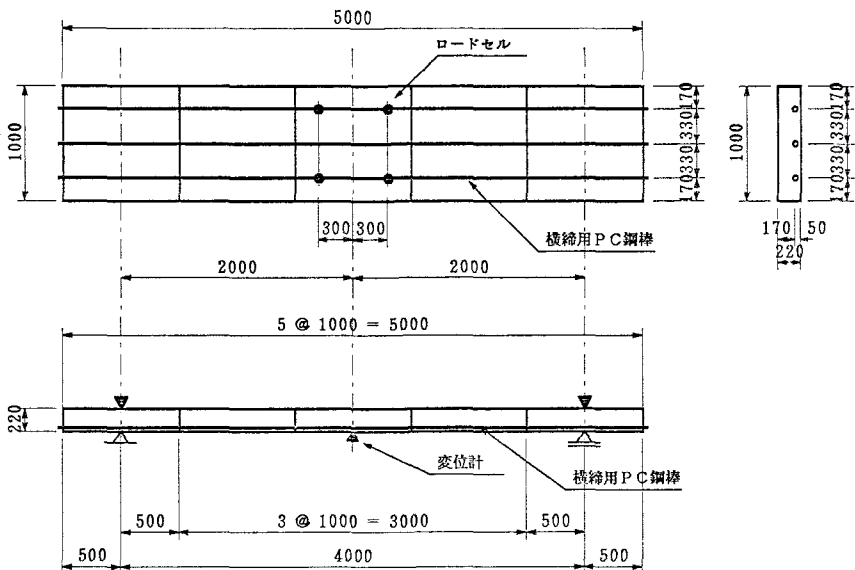


図-4 曲げばね定数の検討用供試体

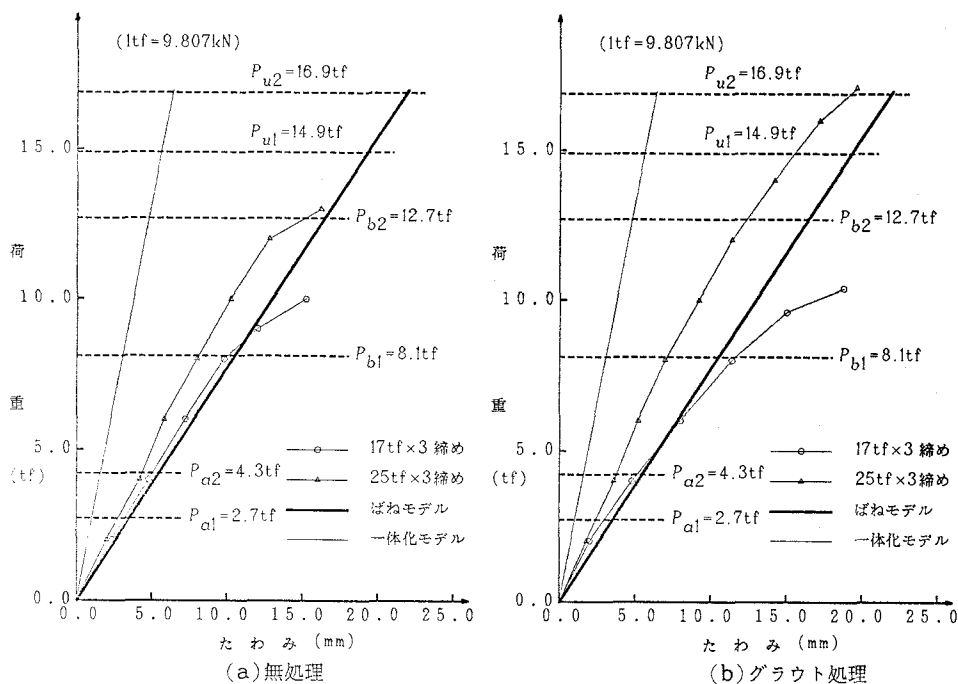


図-5 荷重-たわみ関係

い間は横締によるプレストレスにより版と版は互いに密着しており、全体が一体化していると考えられるが、荷重が次第に大きくなると、版と版の接合面の下縁に隙間が発生し、非線形の挙動をすると思われる。このような試験体の荷重-たわみ関係を調べるために、電気的変位計を取り付けた。

(3) 実験方法

緊張の方法は2.で述べた通りである。実験はシースとPC鋼棒の隙間をモルタルで充填しない無処理のもと、モルタルを充填したグラウト処理のものの2種について行った。

①緊張力：緊張は、まず、グラウト処理しない無処理の場合について、3本のPC鋼棒に各々17tfおよび25tfの2通りとした。グラウト処理しない場合の載荷試験終了後、無処理の場合と同様の2種の緊張力に対してグラウト処理を行い載荷試験を行った。

②荷重：荷重の載荷方法および測定方法は2.と同様である。ロードセルの配置を図-4に示した。

③変位：スパン中点のたわみおよび供試体の正方形版と版の接合部下縁の間隔の測定のために、電気的変位計（東京測器研究所製 CDP-50, CDP-10）をそれぞれ3個および4個使用した。

荷重は徐々に上げて行き、供試体の正方形版と版の接合部下縁の間隔が5mmとなるまで荷重を増加させた。

無処理の場合は、2種の緊張力に対し、各々3回ずつ実験を行い、グラウト処理された供試体では、2種の緊張力に対して各々2回ずつ実験を行った。

(3) 実験結果

前述の通り、無処理の場合は2種の緊張力に対し、それぞれ、3回ずつ実験を行ったが、第2回目と3回目の実験では、全く同一の荷重-たわみ関係が得られた。第1回目の荷重-たわみ関係は、その後のものよりわずかに勾配が急であったが、荷重の繰返しにより、荷重-たわみ関係が安定したものと考えられる。図-5 (a)は、緊張力がそれぞれ、17×3tfおよび25×3tfで、グラウト処理されていない場合の安定した荷重とたわみの関係を示したもので、縦軸に荷重を、横軸にたわみを採っている。

図-5 (b) は、それぞれ、緊張力が $17 \times 3 \text{tf}$ および $25 \times 3 \text{tf}$ で、グラウト処理されている場合の荷重とたわみの関係を同様に示したものである。

これらの図より、緊張力が大きいと勾配が急になること、緊張力が大きい場合にグラウト処理の影響が認められること等が明らかとなった。

4. 横締めされた版の静的載荷実験（実験-C）

横締めされたプレキャスト版上に、静的荷重を作用させた場合の挙動を調べるために、プレキャスト版5板を並置し、横締めることにより一体化し、その上の各種の位置にオイルジャッキで荷重を作用させ、各点のたわみおよびひずみを測定する静的載荷試験を行った。

このように、横締プレストレスが導入されて互いに密着している版に、荷重を作用させたときの挙動を究明するための模型実験について述べる。

（1）供試体

供試体用プレキャスト版は、図-6に示すように、長さ 450cm、幅 80cm、スラブ厚さ 12cm、全厚さ 22cm で逆U字型断面を有しており、横ばりは 80cm 間隔に設けられており、その横ばり内の上下縁より、それぞれ 6cm の位置に横締用のシース（ $\phi 32 \text{mm}$ ）が通されている。

この供試体は、アンボンドPC鋼棒を用いてプレストレスが導入されており、2等橋に対応するT荷重に対して安全ように設計されている。この部材軸方向のアンボンドPC鋼棒の締結による応力集中を考慮して、供試体の端部で版厚を 27cm とした。

このプレキャスト版を5枚並置し、スパン 400cm で単純支持し、横締用のシースに $\phi 23 \text{mm}$ のアンボンドPC鋼棒を通し、その後、グラウトした。

プレキャスト版のコンクリートの標準圧縮試験供試体の実験時の圧縮試験結果より、平均圧縮強度 $\sigma_u = 88 \text{kg/cm}^2$ および平均ヤング率 $E_c = 4.33 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ を得た。

（3）実験方法

①横締緊張量：横締にはアンボンドPC鋼棒を用いたので、グラウトされているが、任意の横締力を与えることができる。本実験では、両端部の2箇所およびスパン中間の横ばり部の4箇所、計6箇所に配置された、それぞれ、2本のアンボンドPC鋼棒に、上部のPC鋼棒のみに 8tf、下部のPC鋼棒のみに 8tf および上下のPC鋼棒共に 8tf（以下、それぞれ、上締め、下締め

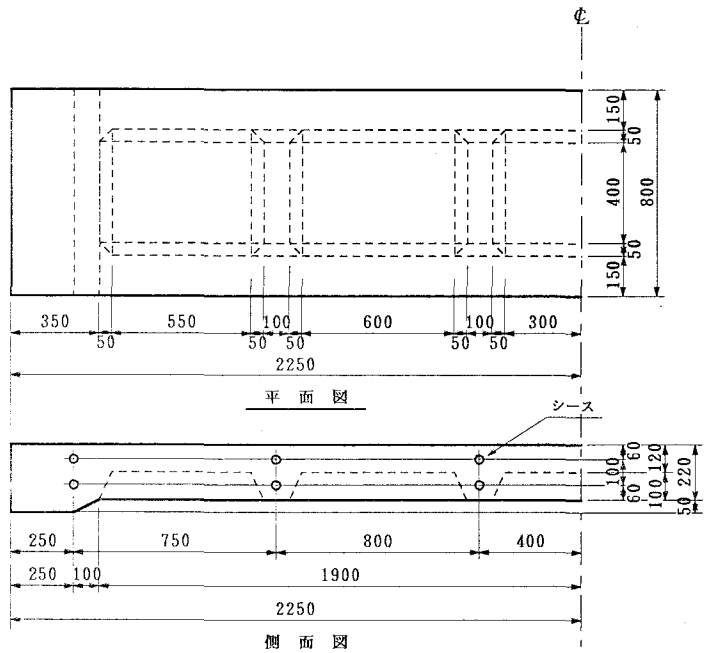


図-6 模型実験供試体用版

および上下締めと言う)の緊張力を与える3通りの横締方法を用いた。

②荷重：横締されたプレキャストPC版上の各種の位置に載荷できるように、載荷用のフレームを設置した。この載荷用のフレームはボルトで実験室の床に固定できるようになっており、また、移動も可能である。そのSet-upを図-7に示す。荷重はロードセルを介してオイルジャッキで、横締されたPC版の中央、およびスパン中央で最も端の版の中央の2つのケース(以後、中央載荷および端載荷と言う)に対して作用させた。

③変位：横締された5枚のプレキャストPC版のスパン中点のたわみを測定するために、スパン中点に5点、左右の単純支持端にそれぞれ5点、計15点の電気的変位計(東京測器研究所製 CDP-50, CDP-10)を設置した。

④測定方法：ロードセルによる荷重、変位計によるたわみ等の測定は、静ひずみ測定器を介してマイクロコンピューターで行った。

荷重は、0.5tfから7.5tfまで、0.5tf間隔で増加させ、各ステップごとに各種の測定を行い、その後、

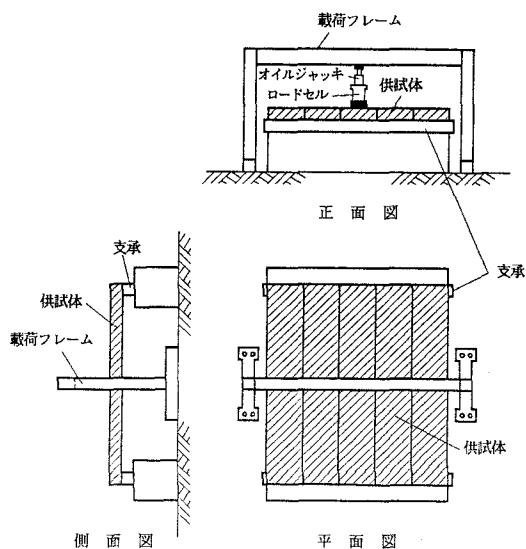
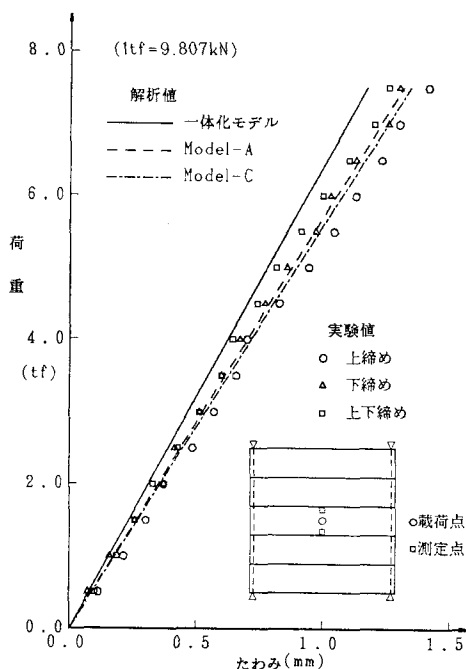
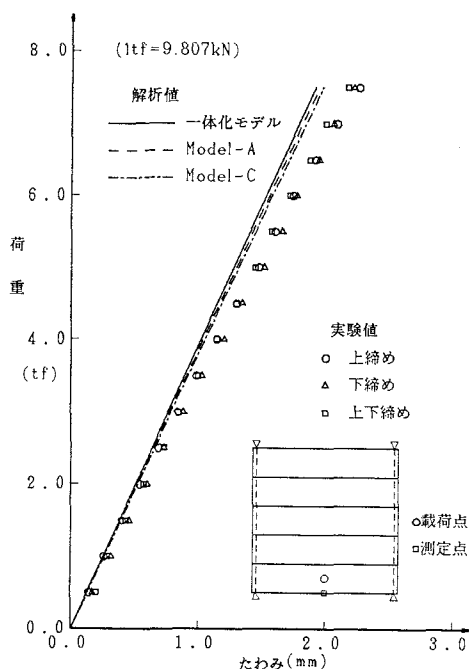


図-7 模型実験供試体および載荷装置



(a)中央載荷



(b)端載荷

図-8 一体化された版の荷重-たわみ関係

除荷しながら測定を繰り返した。

(3) 実験結果および考察

図-8 (a) および (b) は、横締により一体化されたPC版の中央載荷および端載荷に対する荷重および載荷点でのたわみの関係をプロットしたものである。図中、○印は上締め、△印は下締め、□印は上下締めにたいする実験値である。また、図中の実線は、版が完全に一体化しているとした場合の理論値を示している。

図-9 (a) および (b) は、中央載荷および端載荷で、荷重値が7.5tfの時のスパン中央断面でのたわみをプロットしたものである。ここでも、図-8と同様に、上締め、下締めおよび上下締めの3種の横締に対して区別されて示されている。図中の実線は、版が完全に一体化しているとした場合の理論値を示している。

これらの図より、上締め、下締めおよび上下締めの実験値には、わずかの差異しか認められず、横締の方法および横締力の影響は、本実験では極めて少なかった。

5. 実験結果の検討およびモデル化

(1) 接合面のせん断ばね特性

実験-Aより得られた荷重と接合面のスリップ量の関係(図-3)より、図-10に示すような理想

化した特性を有するせん断ばねを仮定することができる。ここに、縦軸は荷重であり、その単位は接触面に作用する力(全横締量、 T_p)であり、横軸は接触面の相対変位である。 k_1 はスリップが発生する以前の弾性的な荷重-変位関係を示すばね定数であり、 k_2 はスリップ発生後の荷重-変位関係の勾配を示しており、また、 P_s はスリップ発生荷重である。

表-2~4より、接触面の全横締量に関係なく、無処理の場合、

$$P_{st}=0.7T_p \quad (1)$$

モルタル・グラウト処理の場合、

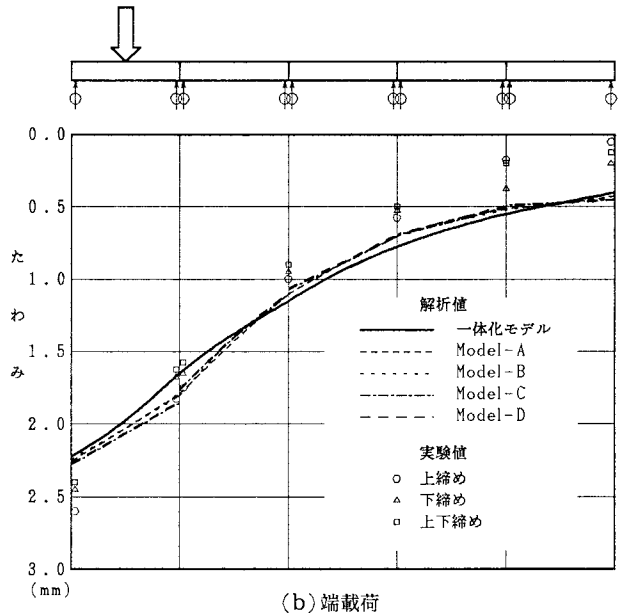
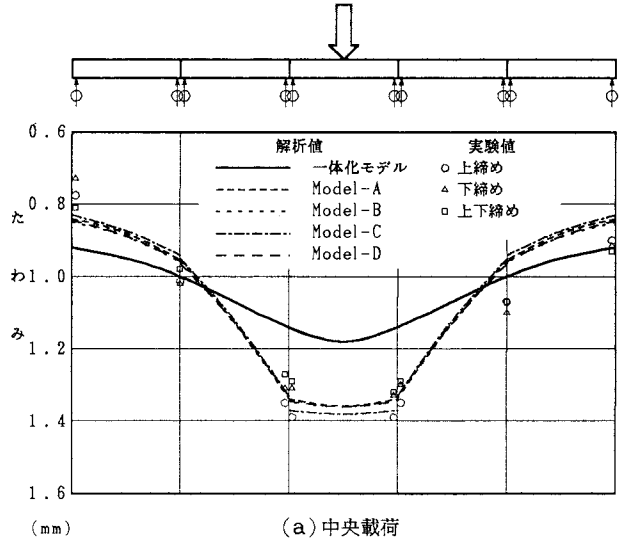


図-9 一体化された版のスパン中央のたわみ形状

$$P_{s2} = 2.5T_p \quad (2)$$

で与えられる。

また、 k_1 は、接合面の処理状態に関係なく、相対変位が約 $\delta_s = 0.1\text{mm}$ となると、急激にスリップが発生していることから、

$$k_1 = \frac{P_s}{\delta_s} \quad (3)$$

にて与えられる。接合面が無処理の場合、スリップ発生後は荷重が一定のまま相対変位が増加しており、

$$k_2 = 0 \quad (4)$$

となる。また、モルタル・グラウト処理の場合のスリップ発生後の相対変位は、横締用 P C 鋼棒のせん断変形および P C 鋼棒に接触する上下のコンクリートの変形の和となる。このような場合に対するばね定数の決定には、コンクリート舗装目地部のスリップバーの解¹⁾を用いることができる。

図-11に示すように、接合面の間隔 e を有する 2 枚のコンクリート版にせん断力 P が作用する場合の相対変位は、

$$\Delta = \Delta_s + 2\Delta_c \quad (5)$$

で与えられる。ここに、 Δ_s は P C 鋼棒のせん断変形であり、 Δ_c は P C 鋼棒によるコンクリートの変形である。文献¹⁾によると、P C 鋼棒の上下のコンクリートの変形は、

$$\Delta_c = \frac{P}{4\beta^3 EI} (2 + \beta e) \quad (6)$$

により与えられる。ここに、 $\beta = \{Kb/(4EI)\}^{1/4}$ であり²⁾、 K はコンクリートの支圧係数で、一般に $8300\text{kg/cm}^3 \sim 41500\text{kg/cm}^3$ の範囲であるとされている。また、 b は P C 鋼棒の直径、 E および I は P C 鋼棒のヤング係数および断面 2 次モーメントである。

通常、 $\Delta_s \ll \Delta_c$ であるため、P C 鋼棒に接触する上下のコンクリートの変形のみを考慮すれば、ばね定数は次式により与えられる。

$$k_2 = \frac{2\beta^3 EI}{2 + \beta d} \quad (7)$$

実験-A の供試体に式 (7) を適用すると、 $k_2 = 42.3 \sim 135.3\text{tf/cm}$ となる。モルタル・グラウト処理された供試体の実験 (図-3) より得られたばね定数は、おおよそ、 $k_2 = 21\text{tf/cm}$ であり、式 (7) の最小値の約 2 分の 1 となっている。この原因としては、式 (6) は完全な弾性的挙動を仮定して導かれていること、コンクリートの支圧係数の不確かさ、接触面のモルタルの影響、グラウトの不完全性などが考えられる。

(2) プレキャスト部材間のばね特性

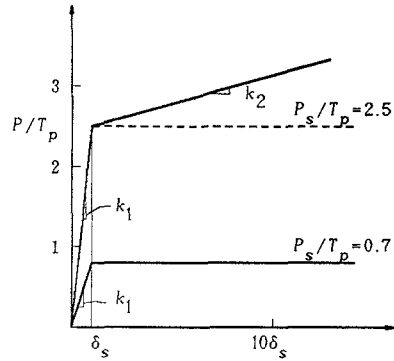


図-10 モデル化されたせん断ばね特性

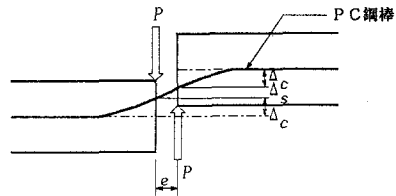


図-11 舗装目地部のせん断変形

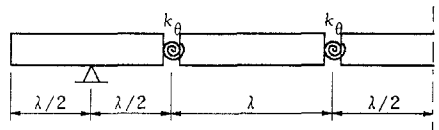


図-12 実験-Bの供試体のモデル化

実験-Bにおける供試体の挙動は、極めて複雑である。すなわち、無処理の場合、導入されているプレストレスにより、荷重がある値に達するまでは付着のないPCはりとしての挙動をする。また、無処理の場合およびモルタル・グラウト処理の場合共、供試体の下縁の応力が零となる荷重値 (P_a) を越えると、中央の版と隣接する版の接触面の下側に間隙が生ずようになる。この断面でのこのような状態は、PCはりの破壊に近い状態となっている。さらに荷重を増加させると (P_b)、支点上の版とそれに隣接する版の間でも、同様な状態となる。このような挙動を正確に追跡することは可能であるが、本研究の目的ではないので、ここでは省略した。完全に一体化された付着のないPCはりの破壊荷重 (P_u)^{3,4)} と間隙が発生する荷重 (P_a) および (P_b) が、それぞれ、横撓力が $17 \times 3 \text{tf}$ および $25 \times 3 \text{tf}$ に対して添字 1 および 2 を付けて図-5に示されている。また、供試体が完全に一体化されていると仮定した時の荷重-たわみ関係が細い実線で示されている。

実験-Bの供試体を図-12に示すように、版と版の間にばねを有しており、曲げモーメントに比例した回転を生ずるものと仮定する。この場合のばね定数を、

(1) 版は剛体である。

(2) 版と版の接触面上縁がヒンジとなる。

(3) 接触面の開角 $\Delta\theta_1$ および $\Delta\theta_2$ は、曲げモーメントに比例する。

の仮定のもとに算定すると、実験-Bの供試体では次式のようになる。

$$k_\theta = \frac{64E_p A_p d^2}{25\lambda} \quad (8)$$

ここに、 E_p および A_p はPC鋼棒のヤング係数および断面積であり、 d は版の上縁からPC鋼棒までの距離であり、 λ は1枚の版の長さである。また、中央点のたわみは、

$$\Delta = \frac{125P\lambda^3}{128E_p A_p d^2} \quad (9)$$

にて与えられる。ここに、 P は荷重である。

式(9)より計算した荷重-たわみ関係が、図-5に太線で示されている。式(8)および(9)は、PC鋼棒に付着がない場合に対するものであるが、図-5(b)よりグラウトによる付着の影響はほとんど認められない。

(3) 横撓されたプレキャスト版のモデル化および検討

上記(1)および(2)で検討したせん断ばね定数および横モーメントばね定数を用いて、横撓されたプ

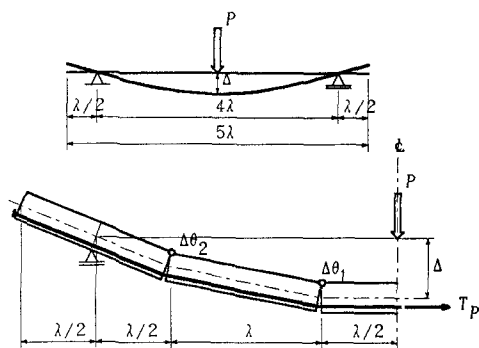


図-13 実験-Bの供試体の変形

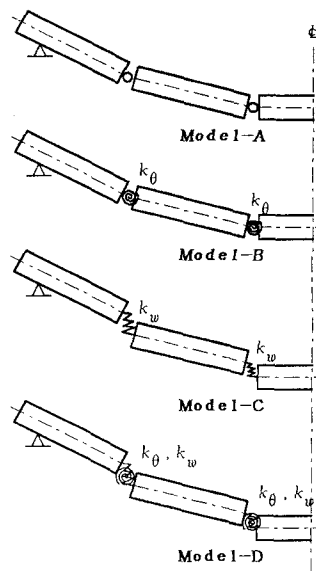


図-14 横撓されたプレキャスト版のモデル化

レキャスト版を図-14に示すように4種のモデル化を行った。すなわち、

Model-A：プレキャスト版の接合面の、横締用PC鋼棒が配置されている点で、左右の版の変位のみが一致すると仮定したモデル。

Model-B：プレキャスト版の接合面の、横締用PC鋼棒が配置されている点で、左右の版の変位が一致し、横曲げモーメントが、ばね定数 k_θ のばねを介して伝達されると仮定したモデル。

Model-C：プレキャスト版の接合面の、横締用PC鋼棒が配置されている点で、せん断力のみがばね定数 k_w のばねを介して伝達されると仮定したモデル。

Model-D：プレキャスト版の接合面の、横締用PC鋼棒が配置されている点で、横曲げモーメントが、ばね定数 k_θ のばねを介して伝達されると共に、せん断力がばね定数 k_w のばねを介して伝達されると仮定したモデル。

これら4種のモデルを用いて、図-6に示すプレキャスト版を直交異方性板と仮定して⁵⁾、横締されたプレキャスト版の中央載荷および端載荷に対しての計算を有限要素法^{6,7)}を用いて行った。その要素分割を図-15に示す。また、横締されたプレキャスト版が完全に一体化していると仮定した場合に対しても同様の分割を行った。いずれも、対称性を考慮して、中央載荷の場合は全体の4分の1で計算している。なお、数値計算に用いたばね定数は、接合面が無処理で、上下締めに対応するものである。これらの計算結果を図-8および9に示す。

これらの図より、以下のことが推論される。

(1) 横締されたプレキャスト版は、完全に一体化しているとは見なすことはできない。すなわち、完全に一体化していると仮定した計算結果と実験値には大きい差異が認められる。

(2) Model-AとModel-BおよびModel-CとModel-Dの計算値の間には、ほとんど差異は認められない。すなわち、本研究で対象とした程度の横締されたプレキャスト版においては、接合面での横曲げモーメントに対するばね剛度の影響は無視できると考えられる。

(3) PC鋼棒位置での接合面をヒンジと考えたModel-AおよびModel-Bの計算結果と、その位置にせん断ばねを挿入したModel-CおよびModel-Dの計算結果の間には、中央載荷の場合、載荷点の版のたわみに差異が認められる。これは、実験の荷重の範囲内では、スリップ発生前であり、接合面でのせん断力に対するばね剛度は非常に大きい、その影響が認められる。

(4) 実験の荷重の範囲内では、横締力に対して載荷荷重が小さく、数値計算上、接合面でのスリップは発生しなかった。

(5) 端載荷の場合、横締されたプレキャスト版が一体化していると仮定した場合とModel-A～Dの数値解析結果には、ほとんど差異は認められなかった。しかし、実験結果は、載荷点で数値解析値よりたわみが大きくなっており、逆に、載荷点の反対側では小さくなっている。これは、実験においては、載荷点と反対側の支点部が、荷重によりわずかであるが浮き上がったためと考えられる。

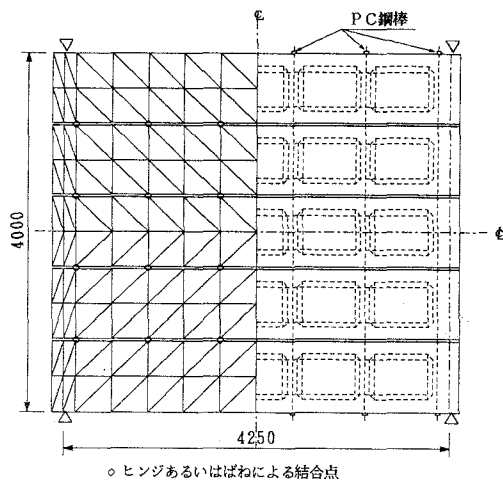


図-15 有限要素分割

6. 結 論

本研究においては、プレキャスト部材を横締して一体化し、構造物として使用する場合の横締方法およびその効果、妥当な解析法を究明するために、(1)プレキャスト部材間のせん断力によるスリップ試験、(2)横締によるプレキャスト部材間のばね定数の検討実験、(3)横締された版の静的載荷実験を行った。また、これらをモデル化した数値解析を行い、実験結果との比較を行った。

これらの実験および数値解析結果より、以下のことが明らかとなった。

(1) 接合面が無処理の場合、全横締力の約0.7倍のせん断力でスリップが発生する。スリップ発生後は、せん断力の増加なしに、スリップ量が増大する。モルタル処理した場合には、スリップが発生するせん断力は全横締力の約2.5倍に増大するが、スリップ発生後の挙動は無処理の場合とほぼ同様である。モルタル・グラウト処理した場合には、スリップが発生するせん断力はモルタル処理した場合とほぼ同じであるが、スリップ発生後、スリップ量が増大しても抵抗せん断力の増大が認められる。

(2) せん断力によるスリップ試験結果より、せん断ばね特性を図-10に示すようにモデル化することができる。せん断ばね剛性は、式(3)、(4)および(7)により評価でき、モルタル・グラウト処理された場合の、実験より得られたスリップ後のばね定数 k_2 は、式(7)の値の2分の1であった。

(3) プレキャスト部材間の横曲げモーメントに対するばね剛性は、実験に用いた供試体に対しては、式(8)により評価することができる。

(5) 横締されたプレキャスト版は、本研究の範囲内では、完全に一体化しているとは見なすことはできない。

(4) 横締されたプレキャスト版の静的挙動に及ぼす横曲げモーメントのばね剛度の影響は、本研究の範囲内では認められなかった。

(5) 横締されたプレキャスト版の静的挙動の解析には横締用P C鋼棒位置の接合面をヒンジとしてモデル化した解析で十分である。ただし、版の曲げ剛度、幅、スパン、横締量、横締間隔などによっては、せん断ばねを考慮した Model-C による解析が必要である。

謝 辞：本論文の数値計算は、金沢大学計算機センターの FACOM M-360AP によった。また、実験を手伝って頂いた金沢大学大学院生、同学部生に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 西沢辰男・松野三朗：コンクリート舗装の構造解析における有限要素法の適用性について，土木学会論文報告集，No.338，1983年10月
- 2) Timoshenko, S. and J.M. Lessels : Applied Elasticity, Westinghouse Technical Night School Press, Pittsburg, Pennsylvania, 1925
- 3) 六車・渡辺・西山：アンボンドP C部材の曲げ終局耐力に関する研究，プレストレストコンクリート，Vol.26, No.1, 1984年1月
- 4) 渡辺・藤井・小林：プレストレストコンクリートの力学，新体系土木工学 34，技報堂，1981年
- 5) チモシェンコ・グォアノスキー・ラー共著，長谷川節訳：板とシェルの理論，ブレイン図書，1983年，pp.342-355
- 6) Clough, R.W and J.L. Tocher : Finite Element Stiffness Matrices for Analysis of Plate Bending, Proc. Conference on Matrix Method in Structural Mechanics, Wright Patterson A. F. Base, Ohio, Oct. 1965
- 7) Felippa, C.A and R.W. Clough : A Refined Quadrilateral Element of Plate Bending, Proc. Conference on Matrix Method in Structural Mechanics, Wright Patterson A. F. Base, Ohio, Oct. 1968

(1985年10月18日受付)