

PIP柱列くいとコンクリートによる合成壁工法の研究 (その2)

—PIPくいとコンクリートによる合成はりの実物大実験—

岡田 武二

小 粥 庸 夫

§ 1. 序 論

現在、PIPくいは構造物の基礎くいとして、あるいは柱列状に施工した土留天板として、多く利用されている。

昭和43年12月までの施工実績は、延べ約 1,800,000m におよぶ。

土留矢板として打設したPIPくいの出来映えを根切底まで掘削して数多く確認した結果ならびに実物曲げ実験の結果から、PIP柱列くいを仮設材としての利用のみにとどめず、これを地下構造物の一部としても利用することが強く要望されている。

PIP柱列くいとコンクリートによる合成壁工法はPIP柱列くいを土留矢板として利用した後に、これにコンクリートを打ち継いで合成壁を形成し、PIP柱列くいを構造計算に組み込み、地下構造物の一部としても利用するものである。

本工法の実施にあたっては、設計施工上の種々の問題を解明する必要があるが、その内設計上特に問題となる点は、打ち継ぎ面のせん断抵抗に關した事柄である。

すなわち合成壁を一体構造として設計するには、打ち継ぎ面の許容せん断応力度をいかなる値とすればよいかということが1つの問題となる。

打ち継ぎ面のせん断抵抗は、打ち継ぎ面の処理、ジベル鉄筋等による補強、打ち継ぎ面の位置（圧縮側にあるか引張側にあるか）、作用荷重条件あるいは材料の条件（ヤング係数、クリープ、乾燥収縮等の差異）等の要因によって異なるものと考えられる。

これらの要因がせん断抵抗におよぼす影響を理論的に解明することは極めて難しい。現時点では、まず実験によって打ち継ぎ面のずれ変形特性、あるいはせん断強度等を把握する必要がある。

今回実施した実験は、PIPくい体の圧縮強度試験、曲げ試験、PIPくいとコンクリートの押し抜きせん断実験、引き抜きせん断実験およびPIPくい ($\phi 30$

cm, $l = 6$ m) にコンクリート ($b \times d = 30 \times 15$ cm, $l = 6$ m) を打ち継いだ合成はりの実物大曲げ実験で合成壁の設計施工指針の一資料を得ることを目的としたものである。その打ち継ぎ方法は、PIPくいの表面に付着した土をディスクサンダで取り除き、PIPくいの主鉄筋にあらかじめ溶接したスターラップ兼用のジベル鉄筋をはつり起こして、後打ちコンクリートの主鉄筋に結合し、後打ちコンクリートを鉛直打設する方法である。

本報告は、上記実験結果をまとめたものであり、PIPくいの強度、打ち継ぎ面のせん断強度、打ち継ぎ面のずれ変形および合成はりの曲げせん断耐力等の実験結果から、プレパクトモルタルのヤング係数、許容曲げ圧縮応力度および合成はり打ち継ぎ面の許容せん断応力度について検討したものである。

これによってPIPくいを地下壁の一部として構造計算に組み込む時の一指針を得たことになり、本実験のごとき打ち継ぎ方法によるPIP合成壁の設計がほぼ可能となった。

なお、本実験は、早稲田大学土木学科神山一教授の指導のもとに西松建設(株)との共同研究として昭和43年6月～10月に実施したものである。

§ 2. 実験概要

2.1 実験目的

本工法の実施にあたっては、版として設計するのであるから、実験においてもPIP合成版の曲げ性状を把握すべきであろうが、打ち継ぎ面のせん断抵抗を調べる便宜上、また理論解析を明確にする便宜上、第1段階としてはPIP合成はりの曲げ性状を把握することが先決問題であると考えられる。

本実験はPIP合成はりの曲げ性状を把握するに必要な一連の実験を行ない、PIP合成壁の設計施工指針の一資料を得るために行なったものである。すなわち、本

実験の目的は下記の点を明確にすることである。

- ① PIPくいモルタルの許容曲げ圧縮応力度をいかなる値とするか
- ② PIPくいモルタルのヤング係数をいかなる値とするか
- ③ PIP合成はりを一体はりとして設計する場合には、打ち継ぎ面の許容せん断応力度をいかなる値とするか
- ④ PIP合成はりを実際に施工した場合の信頼性ならびに施工上の問題点はいかなるものか

2.2 実験項目ならびに試験体

実験項目ならびに試験体一覧表を表-1に示す。

2.3 モルタルならびにコンクリートの配合

2.3.1 プレパクトモルタルの配合

PIPくいに用いたプレパクトモルタルの配合は表-2の通りである。

2.3.2 コンクリートの配合

後打ちコンクリートの配合は表-3の通りである。

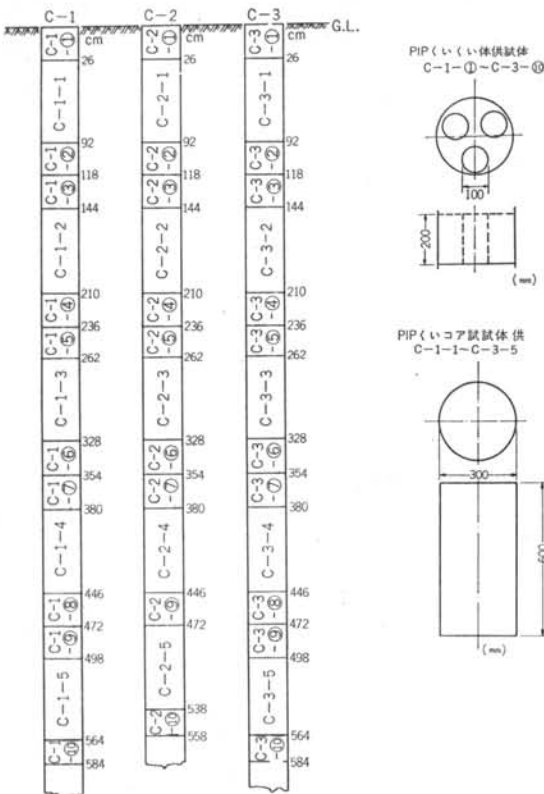


図-1 PIPくいコア、くい体の供試体寸法ならびに採取位置(Cテスト)

C	F	S	W	W/C+F	イントルー ジョンエイ ド
100kg	40kg	150kg	67.9kg	48.5%	1.2kg

注) 1バッチ当りの重量

設計基準強度 $\sigma_{mk}=240\text{kg/cm}^2$ (材令28日)

フロー値 20±3秒

C: セメント(アサノ普通ポルトランド, $\rho=3.16$)

F: フライアッシュ(東電フライアッシュ, $\rho=2.19$)

S: 細骨材(鬼怒川産, 粒大0.6mm以下, $\rho=2.50$, F.M. 1.70)

混和剤(イントルージョンエイド, 日本コンクリートケミカルズ社製)

W: 水(水道水)

表-2 プレパクトモルタルの配合

C	W	S	G	W/C	AE剤
324kg	186kg	803kg	1,000kg	57.5kg	97.2cc

注) 1m³ 当りの重量

設計基準強度 $\sigma_{ck}=180\text{kg/cm}^2$ (材令28日)

スランプ 20±2cm

C: セメント(アサノ普通ポルトランド, $\rho=3.16$)

S: 細骨材(鬼怒川産, 粒大5mm以下, $\rho=2.63$, F.M. 2.68)

G: 粗骨材(鬼怒川産, 最大寸法25mm, $\rho=2.65$, F.M. 6.77)

AE剤(ビソール)

W: 水(水道水)

表-3 コンクリートの配合

2.4 試験体寸法ならびに配筋

Cテスト (PIPくいのコアの圧縮強度試験, PIPくいの圧縮強度, 静弾性係数試験) の供試体は無筋 PIPくい($\phi 30\text{cm}$, $\ell 600\text{cm}$) 3本から採取したもので、その寸法ならびに採取位置は図-1に示す通りである。

σ_c テスト, σ_t テスト (押し抜きせん断実験, 引き抜きせん断実験) の試験体は打設した PIPくいから所定の長さ($\ell=40\text{cm}$)の切断片を採取し、コンクリートを後打ちしたもので、その寸法ならびに配筋は図-2に示す通りである。

Pテスト (PIPくいの曲げ実験) の試験体は現場打設した PIPくいを掘り出したもので、その寸法ならびに配筋は図-3に示す通りである。

G_p テスト, G_n テスト (PIP合成はりの曲げ実験) の試験体は現場打設した PIPくいにコンクリートを後打ちしたもので、その寸法ならびに配筋は図-4に示す通りである。

PIPくいの主鉄筋は従来の円形配筋とはせず、矩形配筋とした。これは今回の実験では主鉄筋にスターラップを兼ねたジベル鉄筋をを接合する方法を採用したため

実験項目	記号		供試体および試験体の仕様	供試体および試験体の個数	①目的 ②測定事項 ③載荷	PIPくい(本)	
	テスト	シリーズ					
PIPくいモルタル標準供試体の圧縮強度試験	—	—	φ5×10 ³ cm	456個	① PIPくいモルタルの品質調査 ② σ _{mu} ③ JIS	38	
コンクリート標準供試体の圧縮、引張、曲げ強度試験および静弾性係数試験	—	—	圧縮 φ15×30 ³ cm 引張 φ15×15 ³ cm 曲げ 15×15×53cm 静弾性 φ15×30 ³ cm	48個 6個 6個 6個	① コンクリートの品質調査 ② σ _{cu} , σ _{tu} , σ _{bu} , E _c (W.S. 使用) ③ JIS	—	
PIPくいコアの圧縮強度試験	C	C _c -1 C _c -2 C _c -3	φ10×20 ³ cm	90個	① コア強度と標準供試体強度の比較 ② σ _{mu} ③ JIS	3	
PIPくいくいの体の圧縮強度静弾性係数試験	C	C _p -1 C _p -2 C _p -3	φ30×60 ³ cm	各シリーズ5個 合計15個	① くい体強度と標準供試体強度の比較 ② σ _{mu} , E _m (W.S. 使用) ③ JIS	3	
直接せん断実験	押し抜き せん断実験	S _c	S _c -1 S _c -2 S _c -3	φ30×40 ³ cm PIPくいの表面に付着した土をディスクサンダで取り除きコンクリートを打ち継ぐ	各シリーズ3個 合計9個	① 打ち継ぎ面のせん断抵抗とジベル鉄筋比との関係を求める。 ② 打ち継ぎ面のずれ変形、最大耐力 ③ 押し抜きせん断	3
		S _i	S _i -1 S _i -2 S _i -3	同上	各シリーズ3個 合計9個	① 打ち継ぎ面のせん断抵抗とジベル鉄筋比との関係を求める。 ② 打ち継ぎ面のずれ変形、最大耐力 ③ 引き抜きせん断	3
PIPくいの曲げ実験	P	—	主筋 8-φ19mm スターラップ筋 φ300 φ12mm l=600cm φ=30cm	3体	① PIPくい曲げ性状を把握する。 ② 中央点のたわみ、モルタルのひずみ、曲げ耐力 ③ 中央2点对称荷重単純はり l=400cm	3	
PIP合成はりの曲げ実験	G _p	G _p 100 G _p 200 G _p 300	G _p 100:P _t =0% G _p 200:P _t =0.3% G _p 300:P _t =0.63%	φ30×600lcm PIPくいの表面に付着した土をディスクサンダで取り除きコンクリートを打ち継ぐ。後打ちコンクリートの主鉄筋4-φ19mm d=15cm	各シリーズ3体 合計9体	① PIP合成はりの曲げ性状を把握する。 ② 打ち継ぎ面のずれ変形、中央点のたわみ、モルタルのひずみ、曲げ耐力 ③ 中央2点对称荷重単純はり l=400cm a/d=3.3	9
		G _a	G _a 100 G _a 200 G _a 300	G _a 100:P _t =0% G _a 200:P _t =0.3% G _a 300:P _t =0.63%	同上	各シリーズ3体 合計9体	① PIP合成はりの曲げ性状を把握する。 ② 打ち継ぎ面のずれ変形、中央点のたわみ、モルタルのひずみ、曲げ耐力 ③ 中央2点对称荷重単純はり l=400cm a/d=3.5

ここに P_z : ジベル鉄筋比 $\frac{A_{zs}}{b \cdot s} \times 100(\%)$

b : くい径(cm)

s : ジベル鉄筋の間隔(cm)

A_{zs} : ジベル鉄筋断面積(cm²)

表-1 試験体一覧表

に、鉄筋かご挿入にあたって主筋の設置位置を限定するので、設計算上有利となる矩形配筋としたのである。

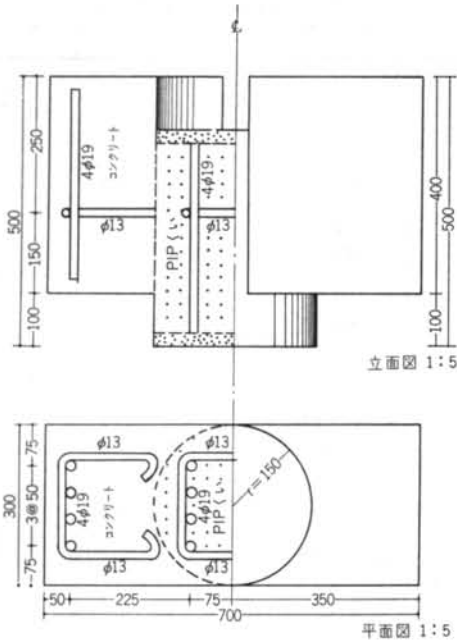


図-2(a) 押し抜きせん断実験試験体寸法ならびに配筋 (Sc-1 シリーズ)

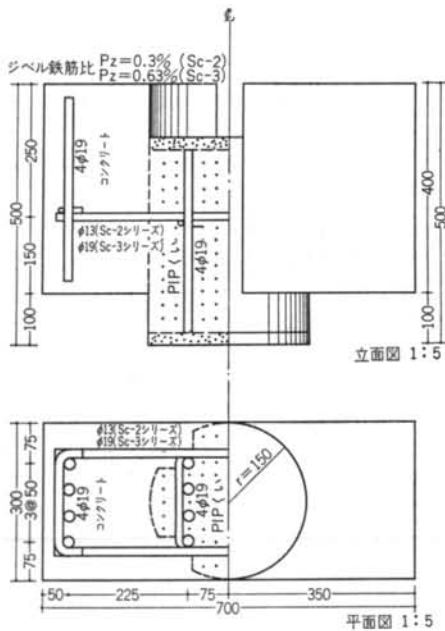


図-2(b) 押し抜きせん断実験試験体寸法ならびに配筋 (Sc-2, Sc-3 シリーズ)

2.5 試験体の製作

2.5.1 製作場所ならびに地盤条件

PIPくいは千葉県市川市清水建設プレキャスト工場の敷地内に打設したものである。その地盤柱状図は図-5の通りである。

2.5.2 製作工程

試験体の製作工程を図示すれば図-6の通りである。

2.5.3 PIPくいの施工

実験PIPくいを打設した後に、くいを地上に掘り出すために鋼矢板にて掘削ブロックをあらかじめ用意した。掘削ブロックは3.6m×4mまたは3.6m×2.8mの側面を深さ8mの鋼矢板で囲んだものである。1ブロック内には2~3本のPIPくい(くい長6m)を1日で打設した。

PIPくいの施工方法は従来と同様であるが、鉄筋挿入に関しては従来と異なる条件(短形配筋であるこ

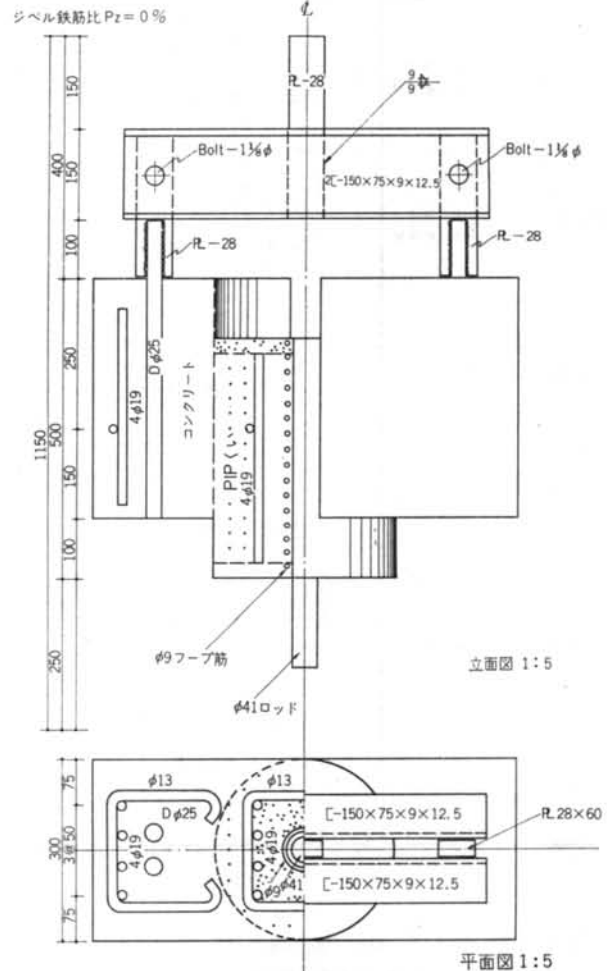


図-2(c) 引き抜きせん断実験試験体寸法ならびに配筋 (St-1 シリーズ)

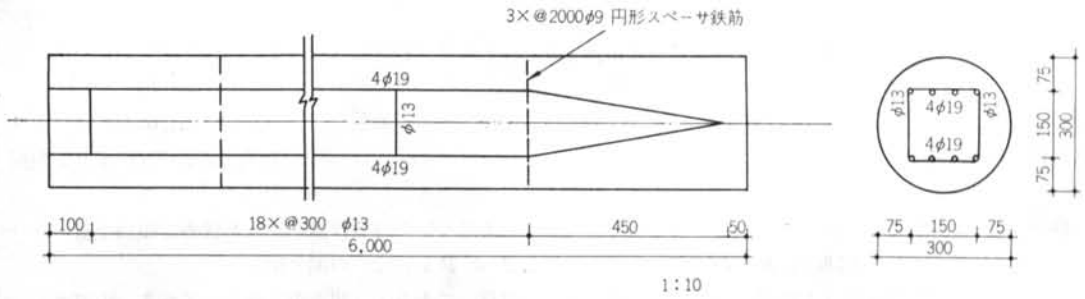


図-3 PIPくいの曲げ実験試験体寸法ならびに配筋

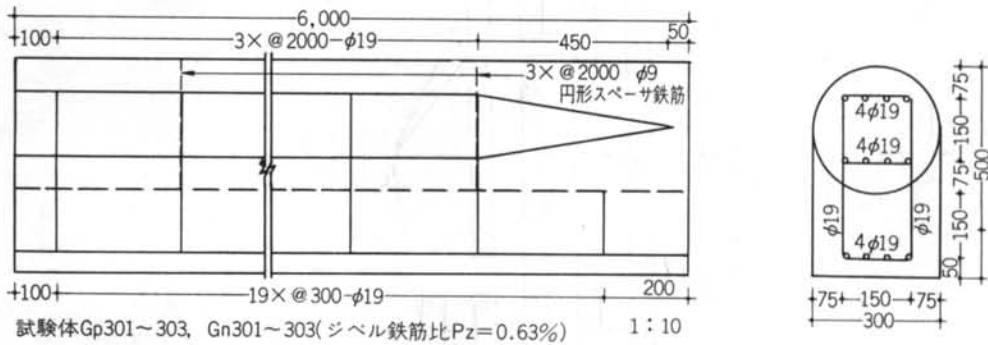
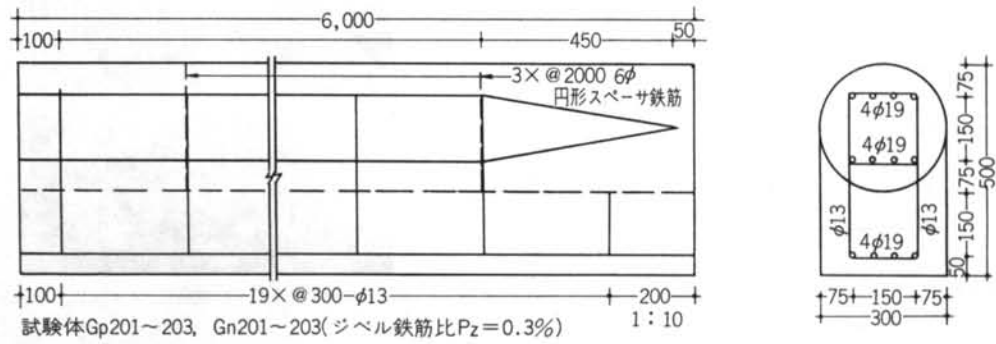
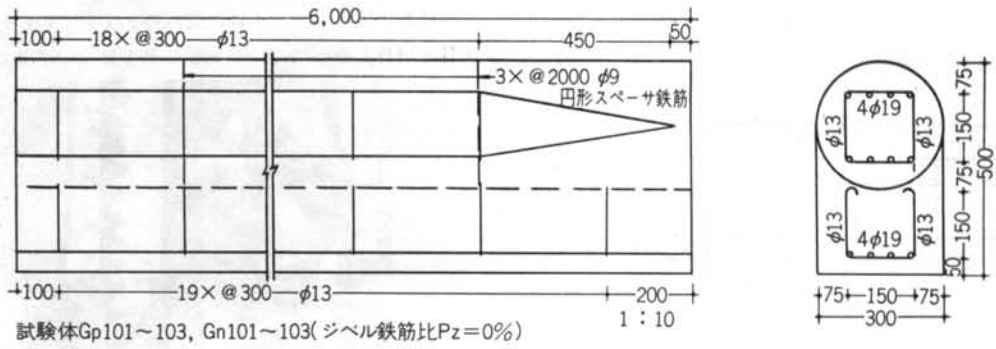


図-4 PIP合成はりの曲げ実験試験体寸法ならびに配筋(Gpテスト, Gnテスト)

と、円形スペーサー鉄筋を有すること、ならびに発泡スチロール付きジベル鉄筋を有すること）となるため特に注意して行なった。（写—1）

PIPくい打設時の施工管理は、下記の要領で実施した。

- 砂の表面水量：表面水量計，くい打設前に1回測定，配合の調整
- くいの鉛直性：PIP機槽に設置したさげぶり，適時
- モルタルのフロー値：Pロート（1,725cc），各パッチ1回

モルタルの圧縮強度：φ5×10cm 型わく，第2パッチより12個採取

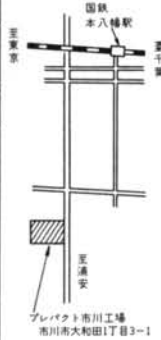
モルタルの膨張，ブリージング：1,000cc メスシリンダ，第2パッチより2個採取

PIPくいの打設は鉄筋挿入も含めて順調であった。

2.5.4 PIPくいの掘り出し

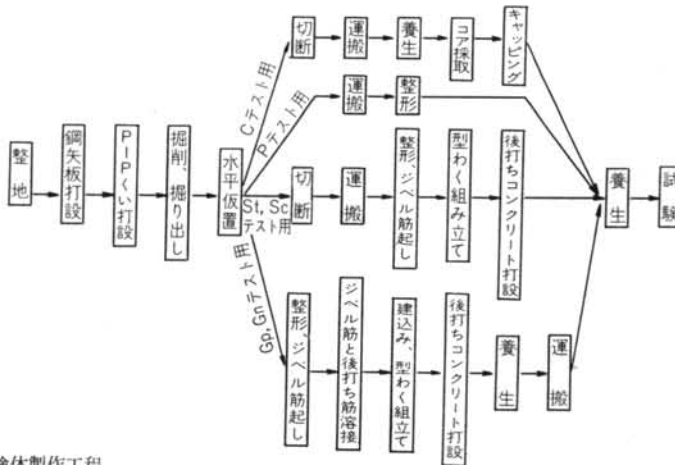
打設してから7日間土中に養生しておき，周辺の土をクラムシエルパケットで4m掘削し，ジェットポンプでG.L.-6mまでの縁を切り，クローラークレーンで地上につりあげた。地上につり上げた時点のPIPくいの材令は10日～14日であった。つりあげたPIPくいは2点支

標尺	深度	層厚	土質等	土質名	色調	備考
m	m	m				
	0.40	0.40	シルト混り砂	暗褐色	埋め土	
	1.00	0.80	シルト混り粘土	茶褐色	含水比約90%の腐植物混り軟弱粘土	
	2.00	1.00	シルト混り粘土	暗灰色	同上	
	2.20	1.00	シルト質砂	暗灰色	貝殻を多く混入	
	3.00	2.70	シルト質砂	暗灰色	含水比約90%比較的締っている。	
	4.00	4.00	シルト質砂	暗灰色	含水比約90%比較的締っている。	
	5.00	4.00	シルト質砂	暗灰色	含水比約90%比較的締っている。	
	6.00	6.70	シルト質砂	暗灰色	やや固い	
	7.00	4.00	シルト質砂	暗灰色	やや固い	



図—5 PIPくい打設場所ならびに地盤柱状図

写真—1 Stテスト用PIPくい鉄筋挿入



図—6 試験体製作工程

持で地上に仮置きし、こも養生した。

2.5.5 P I P くいコアならびにくい体供試体 (C テスト用)

無筋 P I P くい 3 本 (C-1, C-2, C-3) より図-1 に示すように 30 ヲ所の切断片 ($\phi 30 \times 20 \text{cm}$) を取り、1 断面から 3 個のコア ($\phi 10 \times 20 \text{cm}$) を採取し、試験 3 日前まで水中養生 ($20 \pm 2^\circ \text{C}$) した。コア採取時の材令は 38 日 ~ 40 日であった。

くい体供試体は上記 3 本の P I P くいから各々 5 体ずつ切断片 ($\phi 30 \times 60 \text{cm}$) を取り、キャッピングしたものである。くい体の養生は試験日まで室内こも養生とした。

2.5.6 直接せん断実験試験体 (S_t , S_c テスト用)

直接せん断試験体は表-1 に示したように、大別して S_t テスト用と S_c テスト用との 2 つに分けられる。 S_c テスト (押し抜きせん断) 用試験体の製作順序は次の通りである。地上に仮置した S_c 用 P I P くい の所定の位置から 3 個の切断片 ($\phi 30 \times 40 \text{cm}$) を取り出し、打ち継ぐ面の土をディスクサンダで除去した後、その両側面に型わくを組んで、所定の鉄筋を配置して、後打ちコンクリートを打ち継ぐ。ジベル鉄筋のある場合には、あらかじめ P I P くに埋設してある発泡スチロールを除去し、ジベル鉄筋を起こすと同時にジベル鉄筋埋設個所のモルタルをタガネ仕上げした。

S_t テスト (引き抜きせん断) 用試験体の製作順序も S_c テスト用と同一であるが、コンクリートとモルタルに引張力を与えるように、コンクリートには引張用の鉄筋 ($D\phi 25$, 2 本) をあらかじめ設置しておき、P I P くいには、断面中央にあらかじめ埋設してあるらせん筋 ($\phi 9 \text{mm}$ 使用、径 60mm) の内部モルタルに $\phi 50 \text{mm}$ の穴をあけ、 $\phi 41 \text{mm}$ の丸鋼を接着剤で固結した。 S_t 用試験体に設置したらせん鉄筋はボアソン効果による打ち継ぎ面への圧縮ひずみを抑制するためのものである。

なお、P I P くい の材令が 24 日 ~ 25 日の時点で後打ちコンクリートを打設した。

2.5.7 P I P くい試験体 (P テスト用)

P I P くい の表面に付着した土をディスクサンダで取り除き、水洗いした。

2.5.8 P I P 合成はり試験体 (G_p , G_n テスト用)

本実験に採用した打ち継ぎ方法は下記の通りである。

方法 1. $G_p 100$, $G_n 100$ シリーズ ($P_z = 0\%$)

P I P くい の表面に付着した土をディスクサンダで除去して、水洗いした後、後打ちコンクリートを打ち継ぐ。後打ちコンクリートの打設方法は、鉛直打設すなわち打ち継ぎ線に平行な方向から打設する。

方法 2. $G_p 200 \sim 300$, $G_n 200 \sim 300$ シリーズ ($P_z = 0.3, 0.63\%$)

P I P くい の主鉄筋 (短形配置) に図-7 に示す形状のスターラップ筋を溶接し、有孔発泡スチロールを取り付けておく。打設した P I P くい の表面に現われた発泡スチロールを除去して、スターラップ筋の一部を曲げ起こしジベル鉄筋とする。同時に P I P くい の表面に付着した土をディスクサンダで除去し、ジベル鉄筋埋設個所のモルタルをタガネ仕上げして水洗いする。(写-2) 曲げ起こしたジベル鉄筋に後打ちコンクリートの主鉄筋を溶接し、後打ちコンクリート型わくを設置して、コンクリートを打設する。後打ちコンクリートの打設方法は鉛直打設すなわち打ち継ぎ線に平行な方向から打設する。(写-3, 写-4)

本実験の試験体製作にあたっては、表面の整形、ジベル鉄筋の曲げ起こし、ジベル鉄筋と後打ちコンクリートの主鉄筋との溶接等の作業は便宜上、P I P くい を地上に水平仮置した状態で行ない、型わくの設置ならびにコンクリート打設作業は、掘削ブロック内に P I P くい を建込んで行なった。コンクリート打設は 6 m の縦打ちとし、上部より長竹によって突き固めると同時に、側方より木づちで振動を与える方法を採用した。

ジベル鉄筋の曲げ起こし時点における P I P くい の材令は 10 日 ~ 14 日であり、建込みは材令 14 日 ~ 20 日で行ない、コンクリート打設は材令 19 日 ~ 26 日の時点で行なった。また合成はりのつり上げは後打ちコンクリートの材令が 5 日 ~ 9 日の時点で型わく脱型後クローラークレーンで行なった。その後地上に水平仮置きし、こも養生した。

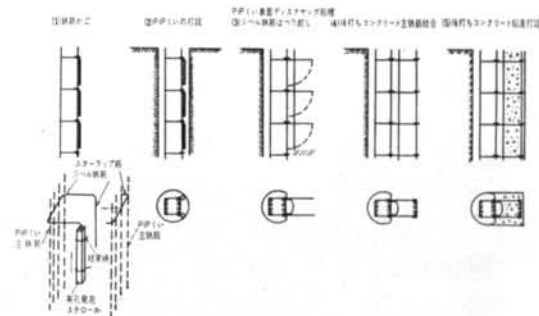
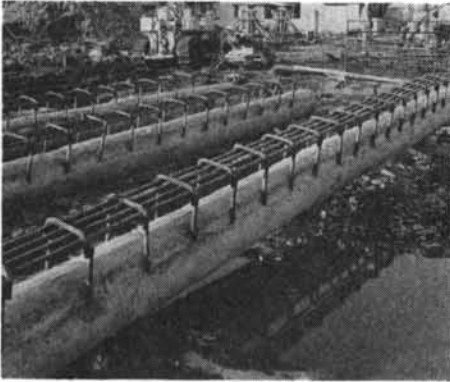


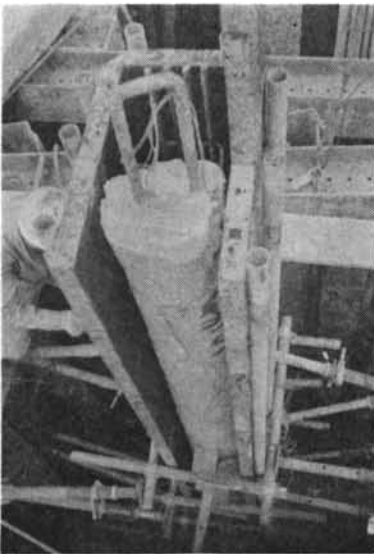
図-7 打ち継ぎ方法 (ジベル鉄筋を入れる場合)



写真一2 打ち継ぎ面の表面処理状況とジベル鉄筋 (Gp300 シリーズ) $P_z=0.63\%$



写真一3 ジベル鉄筋と後打ちコンクリートの主鉄筋との結合 (Gp300 シリーズ)



写真一4 後打ちコンクリート型わく設置

2.6 実験方法

2.6.1 直接せん断実験 (S_c , S_t テスト)

200 t 万能試験機 (油圧電動, 高津KK製) を用いて
 載荷した。

実験方法は 図-8 に示す押し抜きせん断方法および
 引き抜きせん断方法の 2 種類である。

荷重階は押し抜きせん断では 4 t, 引き抜きせん断で
 は 1 t とした。

測定項目は各荷重段階における P I P くいとコンクリ
 ートの打ち継ぎ面のずれ変形, 初期亀裂荷重, 亀裂の進
 展状況および破壊荷重とした。ずれ変形の測定は, 図-
 8 に示す測定箇所について, コンタクトゲージ(測定間隔
 200mm) を用いて行なった。

実験時における P I P くいモルタルの材令は, 55~62
 日, コンクリートの材令は 28~37 日である。試験体数は,
 押し抜きせん断実験 9 個, 引き抜きせん断実験 9 個であ
 る。

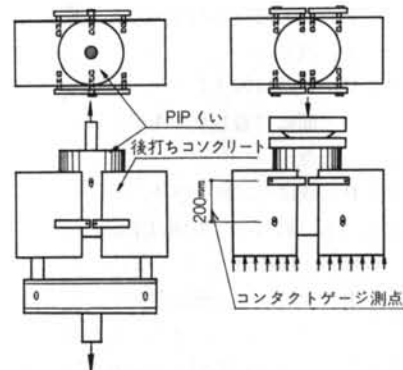
2.6.2 P I P くいの曲げ実験 (P テスト)

200 t 構造物試験機 (油圧手動 100 t ジャッキ使用) を
 用いて載荷した。荷重の読みは 50 t ロードセル (0.1 t 読
 み) を用いて行なった。載荷条件は中央対称 2 点荷重
 (スパン 400cm, せん断スパン 150cm, せん断スパン比
 6.7) とした。荷重階は載荷荷重 3 t までは 0.5 t, 載荷
 荷重 3 t 以上最大荷重までは 1 t とした。

測定項目は各荷重段階における亀裂進展状況, たわ
 み, モルタルのひずみ, および初期亀裂荷重, 破壊荷重
 である。たわみの測定はダイヤルゲージ ($1/100\text{mm}$) を用
 い, モルタルのひずみはストレインゲージ ($l=67\text{mm}$) を
 用いて, 図-9 に示す測定位置について行なった。

試験材令は 63~65 日である。試験体数は 3 体である。

2.6.3 P I P 合成はりの曲げ実験 (G_p テスト, G_n テ スト)



a. 引き抜きせん断法 b. 押し抜きせん断法

図-8 直接せん断実験載荷方法

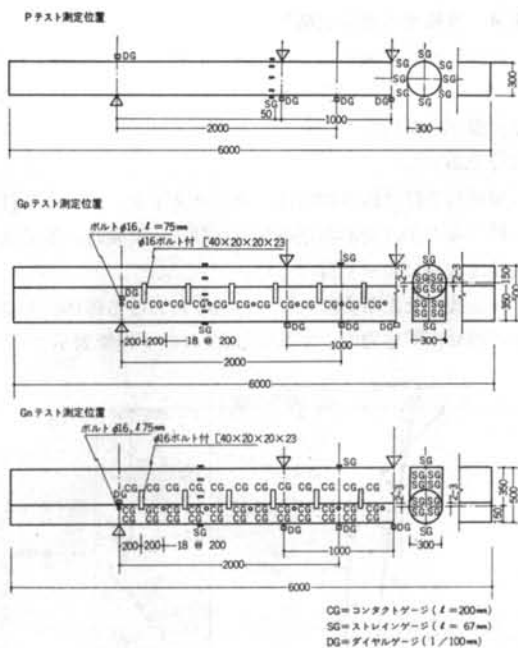


図-9 PIPくい、PIP合成はりの測定位置
(Pテスト、Gpテスト、Gnテスト)

200 t 構造物試験機 (200 t 油圧電動ジャッキ使用) を用いて載荷した。(写-5)

載荷条件は中央対称 2 点荷重 (スパン400cm, セン断スパン150cm, セン断スパン比 $G_p : 3.3$, $G_n : 3.5$) とした。(図-10) 荷重階は G_p テストでは 2 t, G_n テストでは 4 t を原則とし, 曲げ亀裂荷重ならびにずれ亀裂荷重近傍では 1 t とした。

測定項目は各荷重段階におけるたわみ, モルタルならびにコンクリートのひずみ, PIPくいとコンクリートの打ち継ぎ面のずれ変形, 亀裂の進展状況および初期亀裂荷重, 最大荷重である。

たわみの測定はダイヤルゲージ (1/100mm) を使い, ひずみの測定はストレインゲージ ($l = 67\text{mm}$) を使い, ずれ変形の測定はコンタクトゲージ (測定間隔200mm) を用いて図-9 に示す測定位置について行なった。亀裂の測定は目測によって行なった。

実験は PIPくいモルタルの材令が G_p テストで 57~63 日, G_n テストで 52~57 日で, コンクリートの材令が 32~36 日の時点で実施した。

試験体数は G_p テスト 9 体, G_n テスト 9 体である。

G_p テストは PIPくいが圧縮側となる載荷方法であり, G_n テストは PIPくいが引張側となる載荷方法である。

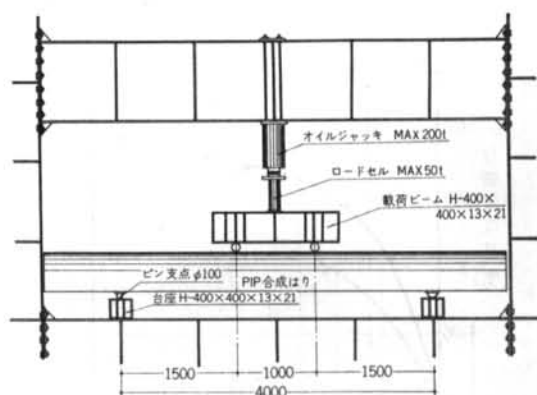


図-10 PIP合成はりの載荷条件 (G_p , G_n テスト)

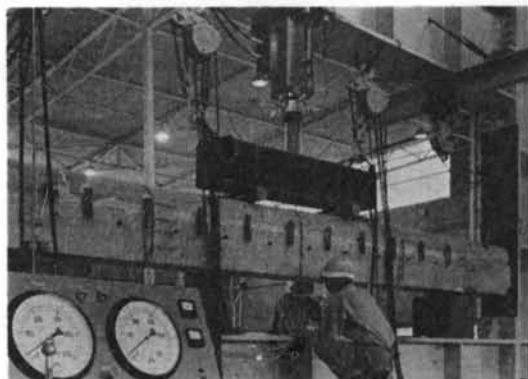


写真-5 PIP合成はり曲げ実験 (G_p テスト)

§ 3. 実験結果

3.1 PIPくいモルタル標準供試体試験結果

PIPくいに用いたモルタルの標準供試体の各材令の平均圧縮強度ならびに変動係数は表-4 の値となる。

平均圧縮強度と材令との関係を図示すると図-11 のようになる。

	14日	28日	49日	56日	91日
平均圧縮強度 (kg/cm ²)	216	289	332	341	386
変動係数 (%)	10.7	10.7	11.4	12.2	10.7
σ/σ_{28} (%)	75	100	115	118	134

φ5×10 水中養生(20±2℃)

表-4 モルタル標準供試体の圧縮強度

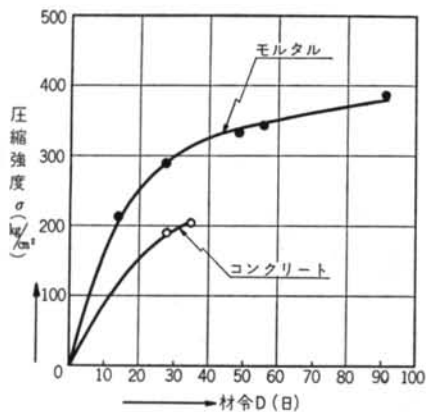


図-11 モルタル、コンクリートの圧縮強度と材令との関係

3.2 コンクリート標準供試体試験結果

Gp, Gn テスト用試験体に使用したコンクリートの圧縮強度、引張強度、ならびに曲げ強度の平均値ならびに変動係数は表-5の値となる。

φ15×30cm 供試体による $\frac{1}{3}\sigma_{max}$ 時のヤング係数Eは、材令28日で、 $E=2.5 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ 、材令35日で $E=2.5 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ である。

	圧 縮		引 張		曲 げ	
	σ_{c28}	σ_{c35}	σ_{t28}	σ_{t35}	σ_{b28}	σ_{b35}
平均強度 (kg/cm ²)	189	203	21.4	21.1	28.3	30.7
変動係数 (%)	14.0	10.6	—	—	—	—
供試体寸法	圧縮 φ15×30cm		標準養生			
	引張 φ15×15cm					
	曲げ φ15×15×48cm					

表-5 コンクリート標準供試体の強度

3.3 PIPくいコアならびにくい体の圧縮強度試験結果 (Cテスト)

無筋PIPくいより採取したコア供試体 (φ10×20cm) ならびにくい体 (φ30×60cm) の圧縮試験結果を図示すると図-12のようになる。G.L. 0～-1m の部分を除けば、これらの強度は標準供試体強度より大となっている。全平均強度はコアが 450kg/cm² (材令49日)、くい体が 369kg/cm² (材令49日) であり、その変動係数は、各々22%、10%である。

くい体の圧縮強度試験時に測定した $\frac{1}{3}\sigma_{max}$ 時のヤング係数Eは全平均値で $E=2.5 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$ である。

3.4 直接せん断実験結果 (Sc, St テスト)

直接せん断実験の結果は、表-6の通りであった。実験は2面せん断方式をとっているが、各々せん断面の荷重分担割合が均等にならず、1断面で破壊したものが大部分であった。

破壊打ち継ぎ面の判定は、コンタクトゲージによる打ち継ぎ面のずれ変形測定結果ならびに、実験時の亀裂進展状況観察によって行なった。

押し抜きせん断実験 (Sc テスト) における破壊打ち継ぎ面のせん断応力度とずれ変形 (ずれひずみで表示する)

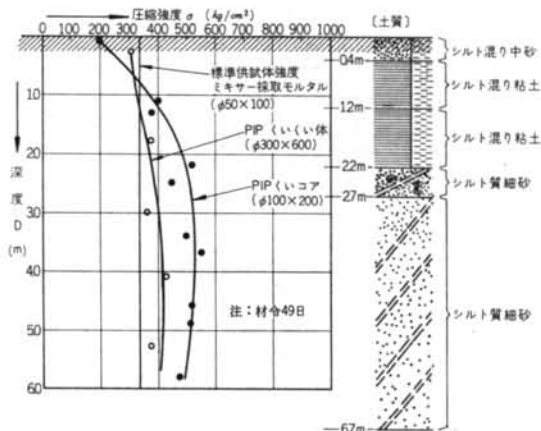


図-12 PIPくいくい体、PIPくいコアの圧縮強度と深度の関係図

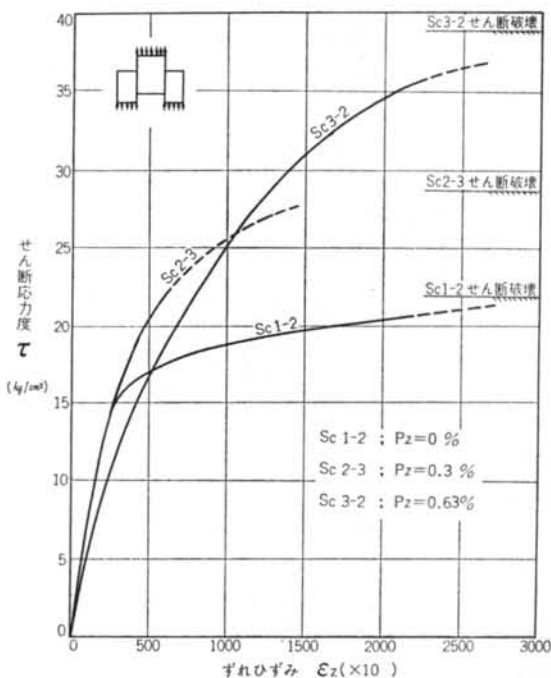
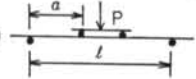


図-13 せん断応力度とずれひずみとの関係

との関係は図-13の通りであった。引き抜きせん断実験 (Stテスト)のずれ変形は破壊荷重までほぼ零であった。

$$EI = \frac{P \cdot a}{48 \delta} (3 \ell^2 - 4a^2) \dots (1)$$


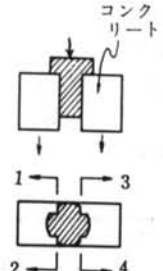
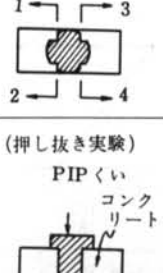
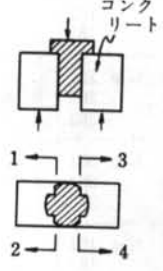
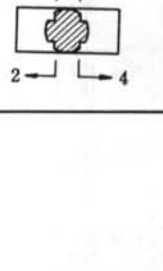
3.5 PIPくいの曲げ実験結果

PIPくいの曲げ実験結果は表-7の通りであった。破壊モーメントは自重を考慮して6.5~7.3 t・m, 平均6.8 t・mである。PIPくいの破壊は曲げ破壊であった。

載荷荷重とスパン中央点のたわみ, 曲げ剛性との関係は図-14の通りであった。図-14に示す曲げ剛性 EI はスパン中央点のたわみ測定値 δ を用いて式(1)によって求めた値である。

くいの名	亀裂荷重 t	亀裂モーメント t・m	破壊荷重 t	破壊モーメント t・m	破壊せん断力 t
P ₁	2.0	1.5	9.3	7.0	4.7
P ₂	1.5	1.1	8.3	6.2	4.2
P ₃	2.0	1.5	8.3	6.2	4.2
平均	1.8	1.4	8.6	6.5	4.4
自重によるモーメントを考慮した場合	-	1.7	-	6.8	-

表-7 PIPくいの曲げ試験結果 (Pテスト)

試験体記号	ジベル鉄筋比 (%)	最大荷重 (ton)	付着面積 (cm ²)		せん断強度 (kg/cm ²)	せん断強度平均値 (kg/cm ²)	備考
			1-2断面	3-4断面			
St-1-1	0	5.50	1220	* 1212	4.53	3.57	(引き抜き実験) PIPくい コンクリート
" 2		3.74	1212	* 1295	2.89		
" 3		3.58	1202	* 1092	3.28		
St-2-1	0.30	10.40	1269	* 1308	7.95	8.47	
" 2		11.96	* 1299	1341	9.20		
" 3		11.56	1281	* 1403	8.25		
St-3-1	0.63	11.08	* 1262	1421	8.77	8.04	
" 2		11.12	1379	* 1318	8.45		
" 3		8.60	1291	* 1247	6.91		
Sc-1-1	0	25.0	* 1326	1286	18.9	19.8	(押し抜き実験) PIPくい コンクリート
" 2		33.5	* 1484	1390	22.6		
" 3		48.5	* 1373	* 1322	18.0		
Sc-2-1	0.30	56.0	* 1200	* 1170	23.6	30.4	
" 2		43.2	* 1110	1140	38.9		
" 3		32.0	1170	* 1110	28.8		
Sc-3-1	0.63	60.0	* 1202	1196	49.9	42.0	
" 2		44.1	* 1125	1095	39.2		
" 3		88.2	* 1202	* 1190	36.9		

注) 材令 { PIPくい 56日
コンクリート 28日

St-2~St-3, Sc-2~Sc-3 の PIPくいとコンクリートの打ち継ぎ面は, サンダーとたがね仕上げの併用
* 破壊側の打ち継ぎ面を示す

表-6 直接せん断実験結果 (Sc, St テスト)



図-14 P I P くい の 曲げ 剛性

3.6 P I P 合成 は り の 曲げ 実験 結果

P I P 合成 は り の 曲げ 実験 結果 は 表-8 の 通り で あ っ た 。 破 壊 モーメント は ジベル 鉄筋 の 有 無 な ら び に G_p テスト (P I P くい が 圧縮 側 と なる 載荷 条件) と G_n テスト (P I P くい が 引張 側 と なる 載荷 条件) と で 異 な っ て い る 。 自重 による モーメント を 考慮 し た 破 壊 モーメント は , G_p テスト の 場 合 に は ジベル 鉄筋 比 0% で 平均 17.7 t · m , ジベル 鉄筋 比 0.3~0.63% で 平均 19.0 t · m で あ り , G_n テスト の 場 合 に は , ジベル 鉄筋 比 0% で 平均 14.0 t · m , ジベル 鉄筋 比 0.3~0.63% で 平均 24.1 t ·

m である。P I P 合成 は り の 破 壊 は , ジベル 鉄筋 を 入 れ ない 場 合 に は , 打ち 継ぎ 面 で の ずれ 破 壊 が 起 こ り , 重ね ば り と し て の 破 壊 と な り , ジベル 鉄筋 を 0.3~0.63% 入 れ た 場 合 に は 曲げ 破 壊 で あ っ た 。 試験 体 の 亀 裂 進 展 状 況 を 図-15 に 示 す 。

ジベル 鉄筋 比 0% の は り の 亀 裂 は , スパン 中央 近 傍 の 下 縁 から 曲げ 亀 裂 を 生 じ , こ れ ら が 打ち 継ぎ 面 に 到達 す る と 部分的 に 水平 方向 の ずれ 亀 裂 に 進 展 す る 。 以後 打ち 継ぎ 面 から 新 た な 曲げ 亀 裂 を 生 じ , ずれ 亀 裂 の 進 展 が 著 し く な り スパン 全 体 に わ た っ て ずれ 破 壊 に 至 る 。

一 方 ジベル 鉄筋 比 0.3~0.63% 入 れ た は り の 亀 裂 は , スパン 中央 近 傍 の 下 縁 から 曲げ 亀 裂 を 生 じ , 打ち 継ぎ 面 に 到達 し た 亀 裂 の 一 部 が 水平 方向 に 進 展 す る 。 以後 , 部分的 に 生 じ た ずれ 亀 裂 は ほ と ん ど 進 展 せ ず , 曲げ 亀 裂 は 打ち 継ぎ 面 が ない か の ご と く 進 展 し て , 一 体 は り と 同 等 の 亀 裂 状 況 を 示 す 。

載荷 荷 重 と スパン 中央 点 の た わ み , 曲げ 剛 性 と の 関 係 は 図-16 の 通り で あ っ た 。 図-16 に 示 す 曲げ 剛 性 EI は スパン 中央 点 の た わ み 測定 値 δ を 用 い て 式 (1) に よ っ て 求 め た 値 で あり 。

G_p テスト な ら び に G_n テスト の 各 試験 体 の 打ち 継ぎ 面 に お け る み かけ の せん 断 応 力 度 と , 平均 ずれ ひ ず み と の 関 係 を 図 示 す る と 図-17 の 通り で あり 。

こ こ に 平均 ずれ ひ ず み と は , コンタ クト ゲージ に よ っ て 測定 し た 打ち 継ぎ 面 の ずれ 変 形 を スパン 全 長 に わ た っ て 平均 し , ひ ず み と し て 求 め た も の で あり 。

	シベル鉄筋比 (%)	曲げ亀裂荷重 (t)	目測によるずれ荷重 (t)	破壊荷重 (t)	破壊モーメント (t·m)	自重による曲げモーメント (t·m)	自重によるモーメントを考慮した破壊モーメント (t·m)	備考
G_p 101 102 103	0	5.0 } 4.0 } 4.5 (2.0)	11.0 } 12.0 } 11.0 (10.0)	23.4 } 21.7 } 22.5 (30.0)	17.6 } 16.3 } 17.0	0.73	17.7	ずれせん断破壊
G_p 201 202 203	0.30	2.0 } 2.0 } 1.7 1.0	10.0 } 12.0 } 11.3 12.0	23.7 } 25.0 } 24.4 24.6	17.8 } 18.8 } 18.4 18.5	0.74	19.1	曲げ破壊
G_p 301 302 303	0.63	2.0 } 1.0 } 1.0 0.0	12.0 } 14.0 } 11.3 8.0	24.5 } 22.7 } 24.4 26.0	18.4 } 17.0 } 18.3 19.5	0.75	19.1	曲げ破壊
G_n 101 102 103	0	1.0 } 4.0 } 2.3 2.0	7.0 } 12.0 } 10.7 13.0	21.2 } 13.8 } 17.7 18.2	15.9 } 10.4 } 13.3 13.6	0.73	14.0	ずれせん断破壊
G_n 201 202 203	0.30	1.0 } 1.0 } 1.0 1.0	10.0 } 6.0 } 7.3 6.0	31.8 } 29.1 } 31.4 33.4	23.9 } 21.8 } 23.6 25.1	0.74	24.3	曲げ破壊
G_n 301 302 303	0.63	2.0 } 2.0 } 1.7 1.0	10.0 } 18.0 } 11.3 6.0	29.6 } 31.6 } 31.2 32.5	22.2 } 23.7 } 23.4 24.4	0.75	24.2	曲げ破壊

表-8 P I P 合成 は り の 曲げ 実験 結果

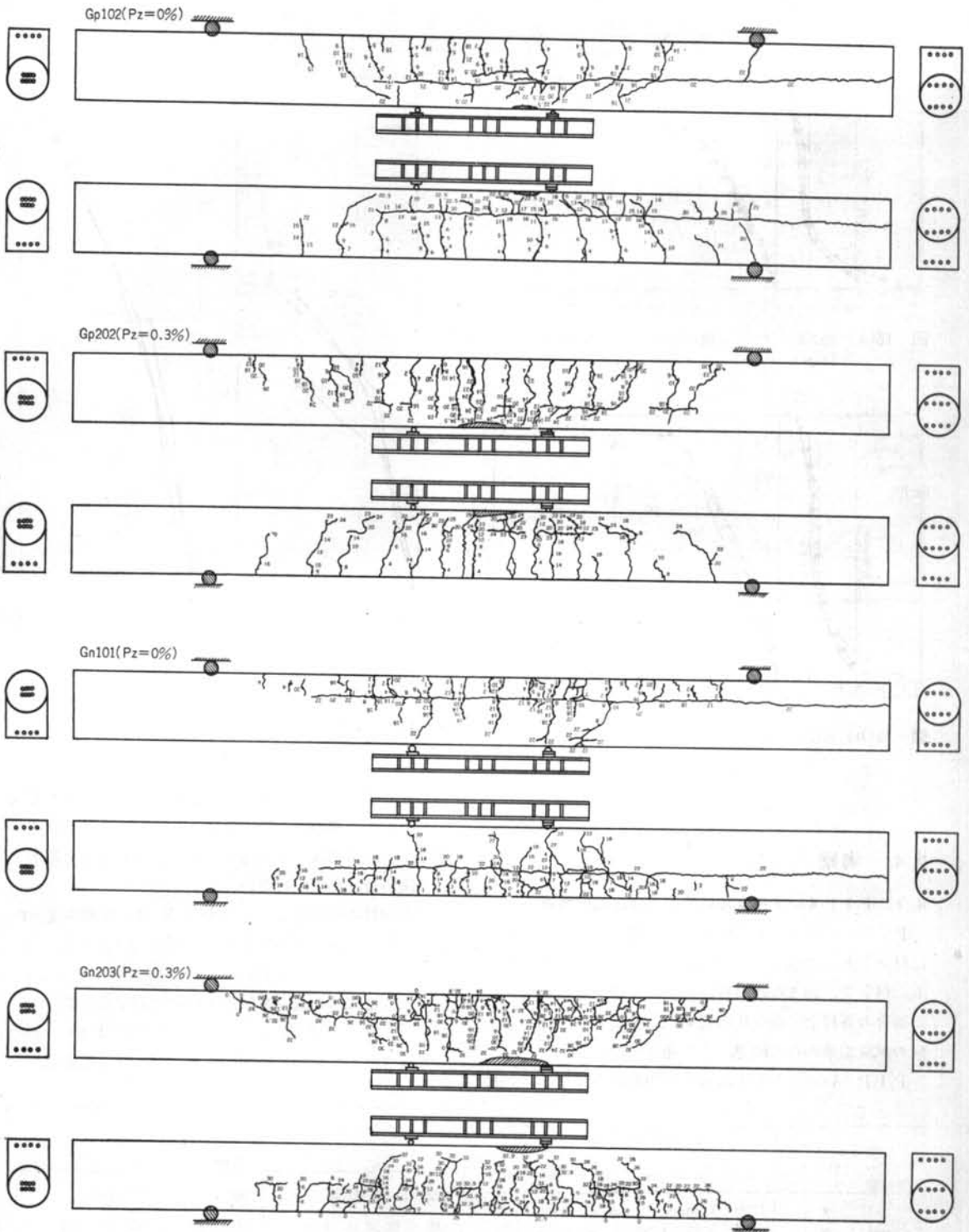


図-15 PIP合成はりの亀裂進展状況

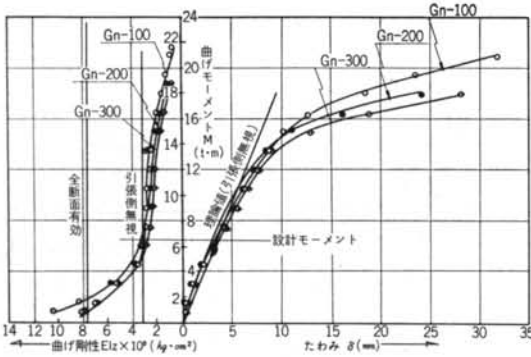


図-16(a) 曲げモーメントと曲げ剛性、たわみ関係図 (Gp テスト)

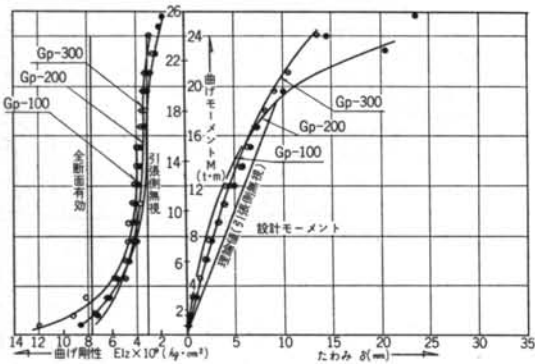


図-16(b) 曲げモーメントと曲げ剛性、たわみ関係図 (Gn テスト)

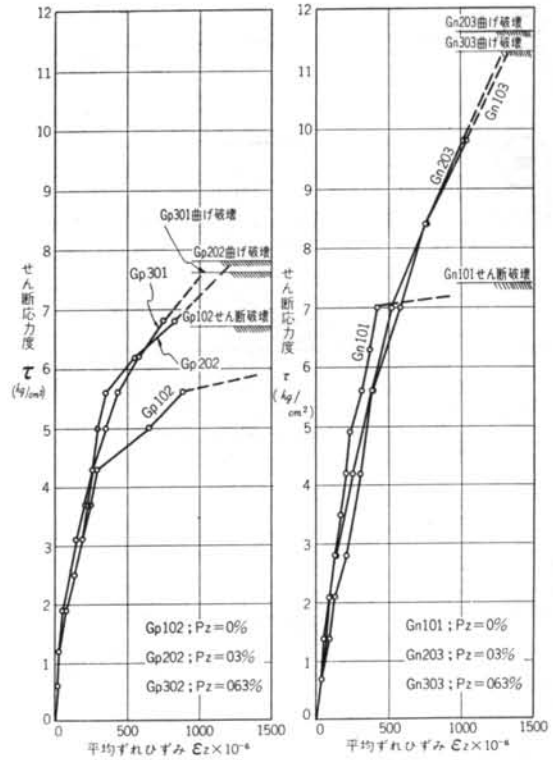


図-17 PIP合成はりのせん断応力度と平均ずれひずみとの関係

§ 4. 考察

4.1 PIPくいモルタルの許容曲げ圧縮応力度

PIPくいモルタルの圧縮強度は図-11に示したように材令とともに増加し、材令91日ではほぼ最終強度に達する。材令7, 28または91日における圧縮強度を基準とした場合の各材令の強度比は従来の試験結果ならびに本実験の試験結果から大略表-9の通りとなる。

PIPくいモルタルの許容曲げ圧縮応力度は、材令91

材令 (日)	圧縮強度比					
	7	14	28	49	56	91
基準材令						
7日 z	1.00	1.55	2.15	2.55	2.65	3.00
28日 ψ	0.50	0.75	1.00	1.20	1.25	1.40
91日 φ	0.35	0.55	0.70	0.85	0.90	1.00

ただし 20±2℃水中養生 F/C+F=28.6% W/C+F=48.5%

表-9 材令と強度比

日における圧縮強度を基準として決めるのが強度上有利であるが、工期の関係で91日より若い材令で設計荷重が作用する場合には、その材令における圧縮強度を基準として決めなければならない。

材令28日の圧縮強度 σ_{28} と材令 T 日の圧縮強度 σ_T との関係は、表-9の値を用いれば式(2)となる。

$$\sigma_T = \psi \sigma_{28} \quad \dots (2)$$

ここに ψ : 表-9に示す材令に関する定数

(材令7日で0.5, 材令91日で1.4)

モルタルの許容曲げ圧縮応力度として設計基準強度の

	平均標準強度 (kg/cm ²)	標準偏差 (kg/cm ²)	変動係数 (%)	備考
設計基準強度 σ_{mk}	288	—	—	材令49日
標準供試体強度 σ_{rm}	332	37.8	11.4	φ5×10 114ヶ
PIPくいコア強度 σ_{rc}	450	98.1	21.8	G.L.—0.1~5.8m φ10×20 76ヶ
くい体強度 σ_{rb}	369	37.6	10.0	G.L.—0.3~5.3m φ30×60 11ヶ

表-10 強度の比較

1/3を採るものとすれば、材令T日における許容曲げ圧縮応力度は式(3)で与えられる。

$$\sigma_{Tma} \leq \frac{1}{3} \psi \sigma_{28mk} \quad \dots (3)$$

ここに σ_{Tma} : 材令T日における許容曲げ圧縮応力度(kg/cm²)

σ_{28mk} : 材令28日設計基準強度(kg/cm²)

ψ : 表-9に示す材令に関する定数
(材令7日で0.5, 材令91日で1.4)

本実験に用いたモルタルの材令28日設計基準強度 σ_{28mk} は240kg/cm²である。実験の荷重材令は49日ならびに56日であるから、各々の材令の設計基準強度は、式(2)を用いて $\sigma_{49mk} = 288\text{kg/cm}^2$ ならびに $\sigma_{56mk} = 300\text{kg/cm}^2$ である。

材令49日の設計基準強度とミキサから採取した標準供試体強度ならびにコア強度、くい体強度との関係を整理すると表-10の通りである。

土木学会コンクリート標準示方書によれば、標準供試体の試験値は、次の条件を満足しなければならない。

a) 試験値は設計基準強度 σ_{mk} の80%を1/20の確率で下がってはならない。

b) 試験値は設計基準強度 σ_{mk} を1/4以上の確率で下がってはならない。

上記2条件を満足する試験値は変動係数を安全側に、15%とすれば

$$\alpha \cdot \sigma_{mk} = 1.1 \times 288 = 317\text{kg/cm}^2$$

であり、本実験の試験値は332kg/cm²であるから設計基準強度 $\sigma_{49mk} = 288\text{kg/cm}^2$ は十分安全側にある値である。

またくい体強度は平均値で369kg/cm²、標準偏差37.6kg/cm²であり、試験値の約110%、設計基準強度の約130%に相当する値であり、十分安全側にある。

実験合成はりの荷重材令は52~62日であるから、PIPくいモルタルの許容曲げ圧縮応力度 σ_{56ma} は、式(3)の ψ を1.25とし下記の値となる。

$$\sigma_{56ma} = \frac{1}{3} \times 1.25 \times 240 = 100\text{kg/cm}^2$$

4.2 ヤング係数比

PIPくいならびにPIP合成はりの許容応力度計算には、鉄筋とモルタルあるいは鉄筋とコンクリートとの応力分担率を仮定しなければならない。応力分担率は鉄筋のヤング係数ならびにコンクリート(モルタル)のヤ

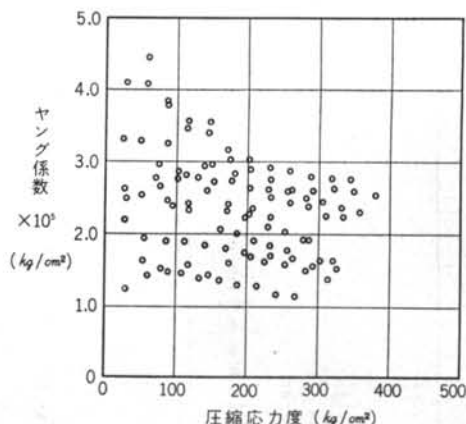


図-18 圧縮応力度とヤング係数との関係

材 料	ヤング係数 kg/cm ²	σ_{ck}
鉄 筋	21.0 × 10 ⁵	—
コンクリート	弾性変形の計算	2.4 × 10 ⁵
	部材の応力度計算	1.4 × 10 ⁵
モルタル	弾性変形の計算	2.5 × 10 ⁵
	部材の応力度計算	2.1 × 10 ⁵

表-11 ヤング係数

ング係数を仮定することによって決まる。PIPくいくい体によるヤング係数測定結果から、圧縮応力度とヤング係数との関係を求めると図-18となる。モルタルのヤング係数のばらつきはかなり大きく、圧縮強度の1/3点のヤング係数は平均2.5 × 10⁵、標準偏差0.6 × 10⁵kg/cm²であった。

本考察における応力度の計算には、各材料のヤング係数を表-11のごとく仮定するものとする。

したがって、鉄筋とコンクリートまたはモルタルとのヤング係数比は下記の値となる。

$$\text{弾性変形の計算では } n_c = 8.8 \quad n_m = 8.4$$

$$\text{部材の応力度計算では } n_c = 15 \quad n_m = 10$$

ここに n_c : 鉄筋とコンクリートとのヤング係数比

n_m : 鉄筋とモルタルとのヤング係数比

4.3 PIPくい、PIP合成はり、ならびにPIP重ねはりの応力度計算式

4.3.1 応力度計算上の仮定

① 維ひずみは直線分布をなし、その大きさは中立軸からの距離に比例する。

② 圧縮側コンクリート(モルタル)応力は直線分布をなし、引張側コンクリート(モルタル)の応力は

注1) 土木学会鉄筋コンクリート標準示方書
(昭和42年版)30条図-1参照

断面ならびに外力	中立軸の位置 X ならびに断面二次モーメント I	応力計算式
	$2r_c - d' > X > d'$ $\sin \alpha_c (2 + \cos^2 \alpha_c) - 3 \alpha_c \cos \alpha_c - 3 \pi n_m P_p \cos \alpha_c + \frac{3}{r_c^2} (r - d') n_m (A_i - A_{jP}) = 0$ $X = r_c (1 - \cos \alpha_c)$ $I = \beta_1 r_c^4 + \beta_2 n_m A_i + \beta_3 n_m A_{jP}$ <p>ここに $P_p = \frac{A_i + A_{jP}}{\pi r_c^2}$ $k = 1 - \cos \alpha_c$</p> $\beta_1 = \alpha_c \left(\frac{1}{4} + \cos^2 \alpha_c \right) - \sin \alpha_c \cos \alpha_c \left(\frac{5}{4} - \frac{1}{6} \sin^2 \alpha_c \right)$ $\beta_2 = (kr_c - d')^2$ $\beta_3 = (2r_c - kr_c - d')^2$	$\sigma_m = \frac{M}{I} kr_c$ $\sigma'_s = n_m \frac{M}{I} (kr_c - d')$ $\sigma_s = n_m \frac{M}{I} (2r_c - kr_c - d')$ $\tau_{max} = -\frac{r_c^2 S}{I} \left(\frac{1}{3} \sin^2 \alpha_c + \frac{1}{2} \cos^2 \alpha_c - \frac{1}{2} \alpha_c \cot \alpha_c \right)$
	$X > d' \quad \alpha_c \leq 90^\circ$ $\sin \alpha_c (2 + \cos^2 \alpha_c) - 3 \alpha_c \cos \alpha_c - 3 n_m (\pi P_p + 2tP_c) \cos \alpha_c + \frac{3}{r_c^2} n_m \{ (r_c - d') (A_i - A_{jP}) - (d - r_c) A_{jC} \} = 0$ $X = r_c (1 - \cos \alpha_c)$ $I = \beta_1 r_c^4 + \beta_2 n_m A_i + \beta_3 n_m A_{jP} + \beta_4 n_m A_{jC}$ <p>ここに $P_p = \frac{A_i + A_{jP}}{\pi r_c^2}$, $P_c = \frac{A_{jC}}{2tr_c^2}$, $t = \frac{d}{r_c} - 2$, $k = 1 - \cos \alpha_c$</p> $\beta_1 = \alpha_c \left(\frac{1}{4} + \cos^2 \alpha_c \right) - \sin \alpha_c \cos \alpha_c \left(\frac{5}{4} - \frac{1}{6} \sin^2 \alpha_c \right)$ $\beta_2 = (kr_c - d')^2 \quad \beta_3 = (2r_c - kr_c - d')^2 \quad \beta_4 = (d - kr_c)^2$	$\sigma_m = \frac{M}{I} kr_c$ $\sigma'_s = n_m \frac{M}{I} (kr_c - d')$ $\sigma_s = n_m \frac{M}{I} (d - kr_c)$ $\tau_{max} = -\frac{r_c^2 S}{I} \left(\frac{1}{3} \sin^2 \alpha_c + \frac{1}{2} \cos^2 \alpha_c - \frac{1}{2} \alpha_c \cot \alpha_c \right)$
	$X > d' \quad \alpha_c > 90^\circ$ $3 \cos^2 \alpha_c - \frac{3}{2} \pi \cos \alpha_c + 2 - 3 n_m (\pi P_p + 2tP_c) \cos \alpha_c + \frac{3}{r_c^2} n_m \{ (r_c - d') (A_i - A_{jP}) - (d - r_c) A_{jC} \} = 0$ $X = r_c (1 - \cos \alpha_c) \quad I = \beta_1 r_c^4 + \beta_2 n_m A_i + \beta_3 n_m A_{jP} + \beta_4 n_m A_{jC}$ <p>ここに $P_p = \frac{A_i + A_{jP}}{\pi r_c^2}$, $P_c = \frac{A_{jC}}{2tr_c^2}$, $t = \frac{d}{r_c} - 2$, $k = 1 - \cos \alpha_c$</p> $\beta_1 = 0.393 - \frac{4}{3} \cos \alpha_c + \frac{1}{2} \pi \cos^2 \alpha_c - \frac{2}{3} \cos^3 \alpha_c$ $\beta_2 = (kr_c - d')^2 \quad \beta_3 = (2r_c - kr_c - d')^2 \quad \beta_4 = (d - kr_c)^2$	$\sigma_m = \frac{M}{I} kr_c$ $\sigma'_s = n_m \frac{M}{I} (kr_c - d')$ $\sigma_s = n_m \frac{M}{I} (d - kr_c)$ $\tau_{max} = -\frac{r_c^2 S}{I} \left(\frac{1}{3} - \frac{\pi}{4} \cos \alpha_c - \frac{3}{2} \cos^2 d_c \right)$
	$d' < X < d + d' - 2r_c$ $X = \frac{-K_1 + \sqrt{K_1^2 + 4r_c K_2}}{2r_c}$ $I = \frac{2}{3} r_c X^3 + n_c \{ (d - X)^2 A_i + (d_p - X)^2 A_{jP} + (X - d')^2 A_{jC} \}$ <p>ここに $K_1 = n_c (A_i + A_{jP} + A_{jC})$</p> $K_2 = n_c (A_i d + A_{jP} d_p + A_{jC} d')$ $d_p = d + 2d' - 2r_c$	$\sigma_c = \frac{M}{I} X$ $\sigma'_s = n_c \frac{M}{I} (d_p - X)$ $\sigma_s = n_c \frac{M}{I} (d - X)$ $\tau_{max} = -\frac{X^2}{2I} S$

表-12 許容応力度設計—応力度の計算式(矩形配筋の場合) 式(4)

断面ならびに外力	中立軸の位置 x	応力中心距離 j ならびに曲げ破壊強度 Mu
	$\alpha_r \leq 90^\circ$ $\frac{\delta_r (1 - \cos \alpha_r) - d}{r_c (1 - \cos \alpha_r)} - \frac{\sigma_{ys}}{E_s} \geq 0 \text{ なら } \alpha_r - \sin \alpha_r \cos \alpha_r + (\lambda_s - \lambda_{sP}) \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{sP} r_c^2} = 0$ $\alpha_r - \sin \alpha_r \cos \alpha_r + \left\{ \frac{E_s \delta_r}{\sigma_{sP}} \times \frac{r_c (1 - \cos \alpha_r) - d}{r_c (1 - \cos \alpha_r)} - \lambda_s - \lambda_{sP} \right\} \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{sP} r_c^2} = 0$ $x = r_c (1 - \cos \alpha_r)$	$\alpha_r \leq 90^\circ$ $j = 2r_c - d - \frac{1}{c_m + c_r} d' c_r + y_m c_m $ <p>ここに $c_m = r_c^2 (\alpha_r - \sin \alpha_r \cos \alpha_r) / \sigma_{ys}$</p> $y_m = \left\{ 1 - \frac{2}{3} \frac{\sin \alpha_r (1 - \cos^2 \alpha_r)}{\alpha_r - \sin \alpha_r \cos \alpha_r} \right\} r_c$ $c_r = \lambda_s k_r \sigma_{ys} \quad k_r: \frac{\delta_r (r_c (1 - \cos \alpha_r) - d)}{r_c (1 - \cos \alpha_r)} - \frac{\sigma_{ys}}{E_s} \geq 0 \text{ なら } k_r = 1$ $ \phantom{\frac{\delta_r (r_c (1 - \cos \alpha_r) - d)}{r_c (1 - \cos \alpha_r)} - \frac{\sigma_{ys}}{E_s}} \leq 0 \text{ なら } k_r = \frac{E_s \delta_r}{\sigma_{ys}} \times \frac{r_c (1 - \cos \alpha_r) - d}{r_c (1 - \cos \alpha_r)} \lambda_s$ $M_u = j A_{sP} \sigma_{ys} = j (c_m + c_r)$
	$\alpha_r \leq 90^\circ$ $\frac{\delta_r (1 - \cos \alpha_r) - d}{r_c (1 - \cos \alpha_r)} - \frac{\sigma_{ys}}{E_s} \geq 0 \text{ なら } \alpha_r - \sin \alpha_r \cos \alpha_r + (\lambda_s - \lambda_{sP} - \lambda_{sP}) \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{sP} r_c^2} = 0$ $\alpha_r - \sin \alpha_r \cos \alpha_r + \left\{ \frac{E_s \delta_r}{\sigma_{sP}} \times \frac{r_c (1 - \cos \alpha_r) - d}{r_c (1 - \cos \alpha_r)} - \lambda_s - \lambda_{sP} - \lambda_{sP} \right\} \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{sP} r_c^2} = 0$ $x = r_c (1 - \cos \alpha_r)$	$\alpha_r \leq 90^\circ$ $j = \frac{1}{A_{sP} + A_{sP}} [(2r_c - d) A_{sP} + d A_{sP}] - \frac{1}{c_m + c_r} d' c_r + y_m c_m $ <p>ここに $c_m = r_c^2 (\alpha_r - \sin \alpha_r \cos \alpha_r) / \sigma_{ys}$</p> $y_m = \left\{ 1 - \frac{2}{3} \frac{\sin \alpha_r (1 - \cos^2 \alpha_r)}{\alpha_r - \sin \alpha_r \cos \alpha_r} \right\} r_c$ $c_r = \lambda_s k_r \sigma_{ys} \quad k_r: \frac{\delta_r (r_c (1 - \cos \alpha_r) - d)}{r_c (1 - \cos \alpha_r)} - \frac{\sigma_{ys}}{E_s} \geq 0 \text{ なら } k_r = 1$ $ \phantom{\frac{\delta_r (r_c (1 - \cos \alpha_r) - d)}{r_c (1 - \cos \alpha_r)} - \frac{\sigma_{ys}}{E_s}} \leq 0 \text{ なら } k_r = \frac{E_s \delta_r}{\sigma_{ys}} \times \frac{r_c (1 - \cos \alpha_r) - d}{r_c (1 - \cos \alpha_r)} \lambda_s$ $M_u = j (A_{sP} + A_{sP}) \sigma_{ys} = j (c_m + c_r)$
	$\alpha_r > 90^\circ$ $\frac{\delta_r (1 - \cos \alpha_r) - d}{r_c (1 - \cos \alpha_r)} - \frac{\sigma_{ys}}{E_s} \geq 0 \text{ なら } -\cos \alpha_r + \frac{1}{4} \pi + (\lambda_s - \lambda_{sP} - \lambda_{sP}) \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{sP} 2r_c^2} = 0$ $-\cos \alpha_r + \frac{1}{4} \pi + \left\{ \frac{E_s \delta_r}{\sigma_{sP}} \times \frac{r_c (1 - \cos \alpha_r) - d}{r_c (1 - \cos \alpha_r)} - \lambda_s - \lambda_{sP} - \lambda_{sP} \right\} \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{sP} 2r_c^2} = 0$ $x = r_c (1 - \cos \alpha_r)$	$\alpha_r > 90^\circ$ $j = \frac{1}{A_{sP} + A_{sP}} [(2r_c - d) A_{sP} + d A_{sP}] = \frac{1}{c_r + c_m + c_{m2}} (d c_r + y_m c_m + y_{m2} c_{m2})$ <p>ここに $c_m = \frac{1}{2} \pi r_c^2 \sigma_{ys}$ $y_m = \frac{3\pi - 4}{3\pi} r_c = 0.576 r_c$</p> $c_{m2} = -2r_c^2 \cos \alpha_r \sigma_{ys} \quad y_{m2} = r_c (1 - \frac{1}{2} \cos \alpha_r)$ $c_r = k_r \lambda_s \sigma_{ys} \quad k_r: \frac{\delta_r (r_c (1 - \cos \alpha_r) - d)}{r_c (1 - \cos \alpha_r)} - \frac{\sigma_{ys}}{E_s} \geq 0 \text{ なら } k_r = 1$ $ \phantom{\frac{\delta_r (r_c (1 - \cos \alpha_r) - d)}{r_c (1 - \cos \alpha_r)} - \frac{\sigma_{ys}}{E_s}} \leq 0 \text{ なら } k_r = \frac{E_s \delta_r}{\sigma_{ys}} \times \frac{r_c (1 - \cos \alpha_r) - d}{r_c (1 - \cos \alpha_r)} \lambda_s$ $M_u = j (A_{sP} + A_{sP}) \sigma_{ys} = j (c_r + c_m + c_{m2})$
	$\frac{\delta_r x - d}{x} - \frac{\sigma_{ys}}{E_s} \geq 0 \text{ なら } x = \frac{A_{sP} + A_s - A_{sP}}{2r_c} \times \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{sP}}$ $x = \frac{1}{2} \left[\frac{A_{sP} + A_s}{2r_c} \times \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{sP}} + \frac{A_{sP} E_s \delta_r}{2r_c \sigma_{sP}} + \sqrt{\left(\frac{A_{sP} + A_s}{2r_c} \times \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{sP}} + \frac{A_{sP} E_s \delta_r}{2r_c \sigma_{sP}} \right)^2 + \frac{2A_{sP} E_s \delta_r d}{r_c \sigma_{sP}}} \right]$ $ \phantom{\frac{1}{2} \left[\frac{A_{sP} + A_s}{2r_c} \times \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{sP}} + \frac{A_{sP} E_s \delta_r}{2r_c \sigma_{sP}} + \sqrt{\left(\frac{A_{sP} + A_s}{2r_c} \times \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{sP}} + \frac{A_{sP} E_s \delta_r}{2r_c \sigma_{sP}} \right)^2 + \frac{2A_{sP} E_s \delta_r d}{r_c \sigma_{sP}}}} \leq 0 \text{ なら } x = \frac{1}{2} \left[\frac{A_{sP} + A_s}{2r_c} \times \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{sP}} + \frac{A_{sP} E_s \delta_r}{2r_c \sigma_{sP}} \right]$ $ \phantom{\frac{1}{2} \left[\frac{A_{sP} + A_s}{2r_c} \times \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{sP}} + \frac{A_{sP} E_s \delta_r}{2r_c \sigma_{sP}} + \sqrt{\left(\frac{A_{sP} + A_s}{2r_c} \times \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{sP}} + \frac{A_{sP} E_s \delta_r}{2r_c \sigma_{sP}} \right)^2 + \frac{2A_{sP} E_s \delta_r d}{r_c \sigma_{sP}}}} \leq 0 \text{ なら } k_r = \frac{E_s \delta_r}{\sigma_{ys}} \times \frac{x - d}{x}$ $M_u = j (A_{sP} + A_s) \sigma_{ys} = j (2r_c x \sigma_{ys} + k_r A_s \sigma_{ys})$	$j = \frac{A_{sP} d + A_s d}{A_{sP} + A_s} - \frac{1}{2r_c x \sigma_{ys} + k_r A_s \sigma_{ys}} (k_r A_s d \sigma_{ys} + r_c x^2 \sigma_{ys})$ <p>ここに $d = d + 2d' - 2r_c$</p> $k_r: \frac{\delta_r x - d}{x} - \frac{\sigma_{ys}}{E_s} \geq 0 \text{ なら } k_r = 1$ $ \phantom{\frac{\delta_r x - d}{x} - \frac{\sigma_{ys}}{E_s}} \leq 0 \text{ なら } k_r = \frac{E_s \delta_r}{\sigma_{ys}} \times \frac{x - d}{x}$ $M_u = j (A_{sP} + A_s) \sigma_{ys} = j (2r_c x \sigma_{ys} + k_r A_s \sigma_{ys})$

表-13 曲げ破壊モーメント計算式(矩形配筋の場合) 式(6)

無視する。

- ③ 鉄筋とコンクリート（モルタル）とは一体となって変形する。
- ④ PIP合成はりの打ち継ぎ面のせん断抵抗は一体はりのせん断抵抗と同一とする。
- ⑤ PIP重ねはりの打ち継ぎ面のせん断抵抗は無視する。

4.3.2 PIPくいならびにPIP合成はりの応力度計算式

応力度は4.3.1の仮定によって導いた表-12式(4)の計算式で算定する。

4.3.3 PIP重ねはりの応力度計算式

PIPくいと後打ちコンクリートが作用モーメントを分担する割合は、PIPくいと後打ちコンクリートの変位が等しいという条件から決定する。すなわち重ねはりの断面を図-19のように仮定して、PIPくいならびに後打ちコンクリートの断面二次モーメントを求め、式(5)によって各々の分担モーメントを求める。

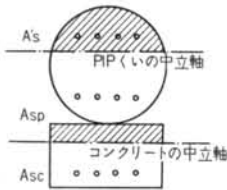


図-19 PIP重ねはりの仮定断面

$$\text{PIPくいの分担モーメント: } Mp = \frac{E_p I_p}{E_p I_p + E_c I_c} M \quad \dots (5)$$

後打ちコンクリートの分担モーメント:

$$Mc = \frac{E_c I_c}{E_p I_p + E_c I_c} M$$

ここにM: 作用モーメント

I_p : PIPくいの断面二次モーメント

I_c : 後打ちコンクリートの断面二次モーメント

PIP重ねはりの応力度は、式(5)で求めた分担モーメントに対して、PIPくいの計算式(4)ならびに注2)の長方形断面の計算法によって求められる。

4.4 PIPくい、PIP合成はりならびにPIP重ねはりの曲げ破壊モーメント計算式

4.4.1 破壊モーメント計算上の仮定

- ① 平面保持の法則が成立する。

注2) 例えば神山一著鉄筋コンクリート(コロナ社)第4章参照

② 引張側のコンクリート(モルタル)の応力を無視する。

③ 鉄筋は降伏点をもつものとする。

④ 曲げ圧縮応力度分布は等値換算ブロックとする。

⑤ コンクリート(モルタル)のクリープなどによる応力の時間的変化は考えない。

⑥ PIP合成はりの打ち継ぎ面のせん断強度は一体はりのせん断強度と同一とする。

⑦ PIP重ねはりの打ち継ぎ面のせん断強度は無視する。

4.4.2 PIPくいならびにPIP合成はりの曲げ破壊モーメント計算式

曲げ破壊モーメントは4.4.1の仮定によって導いた表-13式(6)の計算式で算定する。

4.4.3 PIP重ねはりの曲げ破壊モーメント計算式

PIP重ねはりの曲げ破壊モーメントは、PIPくいの曲げ破壊モーメントと後打ちコンクリートの曲げ破壊モーメントとの和に等しいものと仮定して計算する。

4.5 PIPくいの設計モーメントならびに曲げ破壊モーメント理論値

4.5.1 設計モーメント

実験くいの設計モーメント Mk は下記の設計定数を用いて式(4)によって算定すると表-14の値となる。

設計定数

$$\begin{aligned} \sigma_{mk} &= 300 \text{ kg/cm}^2 & E_s &= 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2 & r_c &= 15.0 \text{ cm} \\ \sigma_{ma} &= 100 \text{ " } & E_m &= 2.1 \times 10^5 \text{ " } & A_s' &= 11.34 \text{ cm}^2 \\ \sigma_{sa} &= 1,400 \text{ " } & n_m &= 10 & A_{sp} &= 11.34 \text{ cm}^2 \\ & & & & d' &= 7.5 \text{ cm} \end{aligned}$$

4.5.2 曲げ破壊モーメント理論値

実験PIPくいの曲げ破壊モーメント Msk は下記の定数を用いて式(6)によって算定すると表-15の値となる。定数 $\sigma_{mk} = 300 \text{ kg/cm}^2$ $r_c = 15.0 \text{ cm}$ $\sigma_{mn} = 0.85 \times 300 = 255 \text{ kg/cm}^2$ $A_s' = 11.34 \text{ cm}^2$ $\sigma_{sy} = 3,270 \text{ kg/cm}^2$ $A_{sp} = 11.34 \text{ cm}^2$ $\epsilon_{mn} = 3 \times 10^{-3}$ $d' = 7.5 \text{ cm}$ $E_s = 2.1 \times 10^6 \text{ kg/cm}^2$

α_c (°)	x (cm)	I (cm ⁴)	Mk (t·m)	Mk 作用時の部材応力度 (kg/cm ²)			
				σ_m	σ_s'	σ_s	τ_{max}
76	11.4	3.13×10^4	2.20	100	293	1123	2.2

表-14 PIPくいの設計モーメント Mk

α_c (°)	x (cm)	C_m (kg)	C_s (kg)	Y_m (cm)	K_c	j (cm)	Muk (t·m)
60°30'	7.6	3.58×10^4	1.11×10^3	4.4	0.03	18.0	6.60

表-15 PIPくいの曲げ破壊モーメント Muk

4.6 PIPくいの曲げ剛性

実験PIPくいの換算断面二次モーメントは、モルタル全断面を有効とした場合と、引張側モルタルを無視した場合とに分けて計算すると表-16の値となる。また設計荷重時の載荷荷重によるスパン中央点たわみの理論値は表-16の通りである。

計算断面	E_m ($\times 10^9 \text{kg/cm}^2$)	I ($\times 10^6 \text{cm}^4$)	EI ($\times 10^9 \text{kgcm}^3$)	載荷荷重 M_L (t-m)	δ (mm)	0.9δ (mm)
	2.5	5.05	12.6	1.95	2.5	2.3
	2.5	2.05	5.12	1.95	6.2	5.6

表-16 PIPくいの曲げ剛性

載荷荷重による中央点のたわみ測定値ならびにスパン中央点のたわみ測定値から求めた曲げ剛性および理論値を図示すれば図-14となる。ここに中央点のたわみ理論値は引張側モルタルを無視した換算断面二次モーメントを用いて求めたたわみに補正係数 0.9^1 をかけた値である。設計モーメント近傍のたわみならびに曲げ剛性の理論値と実験値はほぼ一致する。

以上のことから、PIPくいのたわみを計算する場合には、モルタルのヤング係数を $2.5 \times 10^9 \text{kg/cm}^2$ と仮定し、引張側モルタルを無視した換算断面二次モーメントを用いて行なえば良い。

4.7 PIPくいの許容モーメントならびに破壊安全度

モルタルのヤング係数を種々仮定して実験くいのスパン中央の縁圧縮応力度を算定すると図-20の実線で表わせる。ひずみ測定結果より求めたスパン中央の縁圧縮応力度は図-16の●印となる。図-20より明らかなように実験値は $n_m=10$ とした理論値とほぼ一致している。許容応力度近傍の応力度の計算はモルタルのヤング係数 E_m を $2.1 \times 10^9 \text{kg/cm}^2$ とし、ヤング係数比 n_m を10と仮定して行なえば良い。

実験PIPくいの破壊は載荷点における曲げ破壊であり、3本の平均曲げ破壊モーメントは $6.75 \text{ t} \cdot \text{m}$ であった。この値は理論値と良く一致しており、理論値の102%に相当する。

モルタルの許容曲げ圧縮応力度を 100kg/cm^2 、鉄筋の許容引張応力度を $1,400 \text{kg/cm}^2$ 、ならびに n_m を10として

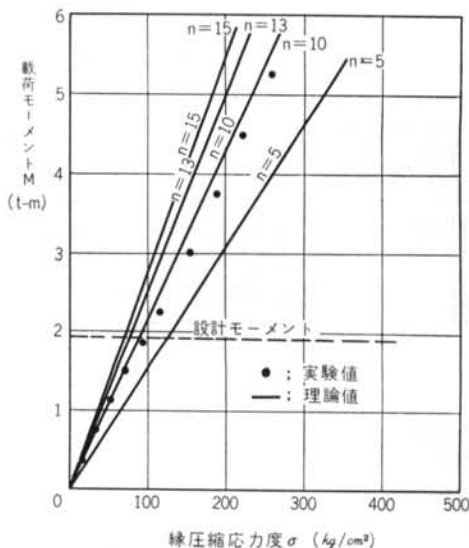


図-20 スパン中央点の縁圧応力度

算定した設計モーメント M_k の破壊に対する安全度 f は次のようになる。

$$f = \frac{Mu}{Mk} = \frac{6.75}{2.20} = 3.1$$

以上のことから実験PIPくいの許容モーメント ($\sigma_{sa} = 100 \text{kg/cm}^2$, $\sigma_{sa} = 1,400 \text{kg/cm}^2$, $n_m = 10$) は $2.20 \text{ t} \cdot \text{m}$ であり、この値は曲げ破壊安全度3を確保している。

4.8 PIP合成はりの設計モーメントならびに曲げ破壊モーメント理論値

4.8.1 一体はりとしての設計モーメントならびに曲げ破壊モーメント理論値

実験合成はりの一体はりとしての設計モーメント M_k を下記の設計定数を用いて式(4)によって算定すると表-17の通りである。

設計定数	
$\sigma_{mk} = 300 (\text{kg/cm}^2)$	$\sigma_{ck} = 180 (\text{kg/cm}^2)$
$\sigma_{ma} = 100 (\text{kg/cm}^2)$	$\sigma_{ca} = 60 (\text{kg/cm}^2)$
$\sigma_{sa} = 1,400 (\text{kg/cm}^2)$	$E_s = 21.0 \times 10^9 (\text{kg/cm}^2)$
$E_m = 2.1 \times 10^9 (\text{kg/cm}^2)$	$E_c = 1.4 \times 10^9 (\text{kg/cm}^2)$
$n_m = 10$	$n_c = 15$
$r_o = 15.0 (\text{cm})$	$d' = 7.5 (\text{cm})$
$d = \begin{cases} 45.0 \text{ Gpテスト} \\ 42.5 \text{ Gnテスト} \end{cases} (\text{cm})$	$d' = \begin{cases} 7.5 \text{ Gpテスト} \\ 5.0 \text{ Gnテスト} \end{cases} (\text{cm})$
$A_{sc} = A_{s'} = A_{sp} = 11.34 (\text{cm}^2)$	

	α_c (度)	X (cm)	I (cm ⁴)	Mk (t·m)	Mk作用時の作用応力度(kg/cm ²)			
					σ_m または σ_c	σ_s'	σ_s	τ_{max}
Gp	96°	16.6	13.3 ×10 ⁴	6.54	82	447	1400	2.7
Gn	—	16.7	20.3 ×10 ⁴	7.34	60	586	1400	3.4

表一七 PIP合成はりの設計モーメント Mk

実験合成はりの一体はりとしての曲げ破壊モーメント Muk を、下記の定数を用いて式(6)によって算定すると表一八の通りである。

定数

$$\sigma_{mk} = 300(\text{kg/cm}^2) \quad \sigma_{ck} = 180(\text{kg/cm}^2)$$

$$\sigma_{mu} = 0.85 \times 300 = 255(\text{kg/cm}^2) \quad \sigma_{cu} = 0.85 \times 180 = 153(\text{kg/cm}^2)$$

$$\sigma_{sy} = 3,270(\text{kg/cm}^2) \quad \epsilon_{cu} = 3.0 \times 10^{-3}$$

$$d = \begin{cases} 45.0 & \text{Gpテスト (mm)} \\ 42.5 & \text{Gnテスト (mm)} \end{cases} \quad d' = \begin{cases} 7.5 & \text{Gpテスト (cm)} \\ 5.0 & \text{Gnテスト (cm)} \end{cases}$$

$$d'' = 7.5(\text{cm})$$

	α_c (度)	X (cm)	Cm (kg)	Cs (kg)	Ym (cm)	Kc	J (cm)	Muk (t·m)
Gp	71°50'	10.3	5.46×10 ⁴	1.97×10 ⁴	5.9	0.53	27.4	20.3
Gn	—	9.1	—	—	—	0.87	30.2	23.4

表一八 PIP合成はりの曲げ破壊モーメント Muk

4.8.2 重ねはりとしての設計モーメントならびに曲げ破壊モーメント

Gp テストの重ねはりとしての設計モーメントならびに曲げ破壊モーメントを4.8.1の定数を用いて4.3.3ならびに4.4.3の方法によって算定すると表一九ならびに表二〇の通りである。

断面二次モーメント(cm ⁴)		Mpk (t·m)	Mck (t·m)	Mk (t·m)
Ip	Ic			
2.05×10 ⁴	0.98×10 ⁴	1.94	0.93	2.87

ただし Ip, Ic の計算では、 $n_m = 8.4$ $n_c = 8.8$ とした。
ここに Mpk: PIPくいの分担モーメント
Mck: 後打ちコンクリートの分担モーメント
Mk: PIP重ねはりの設計モーメント

表一九 PIP重ねはりの設計モーメント Mk

Mpk (t·m)	Mck (t·m)	Mk (t·m)
6.60	4.07	10.67

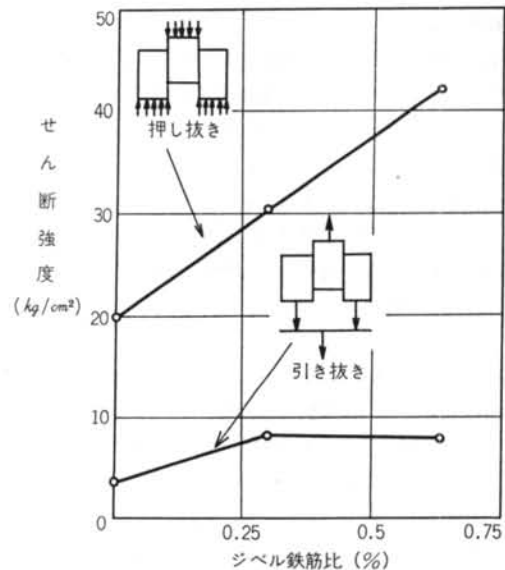
ここに Mpk: PIPくいの破壊モーメント
Mck: 後打ちコンクリートの破壊モーメント
Mk: PIP重ねはりの破壊モーメント

表二〇 PIP重ねはりの曲げ破壊モーメント

4.9 PIPくいとコンクリートとの打ち継ぎ面のせん断抵抗

PIPくいとコンクリートとの打ち継ぎ面のせん断抵抗は、打ち継ぎ面の処理状態、ジベル鉄筋量ならびに外力の作用状態等によって異なるものと考えられる。

本実験における打ち継ぎ面の表面処理は、2.5.8 で記したように、PIPくいの表面に付着した土をディスクサンダで取り除き、水洗いしたもので、ジベル鉄筋を有する場合には、打ち継ぎ面の一部をはつてたがね仕上げしてある。直接せん断実験の結果を整理すると図二一のようになる。



図二一 ジベル鉄筋比とせん断強度との関係(Sr, Scテスト)

ジベル鉄筋比 Pz(%)	せん断強度 τ_u (kg/cm ²)	
	押し抜き	引き抜き
0	20	4
0.3	30	8
0.63	40	13

表二一 ジベル鉄筋比とせん断強度

図-21から明らかなように、打ち継ぎ面のせん断強度はジベル鉄筋量ならびに外力の作用状態すなわち押し抜きせん断と引き抜きせん断の相異なる影響を受ける。

打ち継ぎ面のせん断強度は大略表-21の値であった。打ち継ぎ面のせん断強度はジベル鉄筋を入れることによって増加する。 $Pz=0.3\%$ による効果は、押し抜きせん断では $Pz=0\%$ の50%増し、引き抜きせん断では100%増しのせん断強度となっている。

ジベル鉄筋を $Pz=0.65\%$ と増した場合にはさらにせん断強度が増加する傾向にある。

打ち継ぎ面のせん断強度は引き抜きせん断の場合より押し抜きせん断の場合の方が大きい。これは引き抜きせん断の場合には打ち継ぎ面にポアソン効果による引張ひずみが作用しており、押し抜きせん断の場合には圧縮ひずみが作用していることに起因するものと考えられる。したがって、合成はりが曲げを受ける場合には、PIPくいとコンクリートとの打ち継ぎ面が圧縮側にあるか、引張側にあるかでせん断抵抗に相異を生ずるものと予想される。実験合成はりの打ち継ぎ面は Gp 、 Gn テストとも設計モーメント近傍ならびに破壊モーメント近傍で引張側にあるので、実験結果は打ち継ぎ面が圧縮側にある場合に比べて、不利な条件下でのせん断抵抗を表わすことになるものと思われる。

直接せん断実験における打ち継ぎ面のせん断応力度とずれひずみとの関係を要約すると図-22の通りである。ジベル鉄筋を入れない場合($Pz=0\%$)には、ずれひずみが 300×10^{-6} に達するとひずみの増加割合は大きく変化しはじめ、 $1,000 \times 10^{-6}$ に達すると急激に大きくなり、破壊に至る。これに比べ、ジベル鉄筋を 0.3% 入れた場合には、ずれひずみが 300×10^{-6} 近傍で増加割合は変化しはじめるが、その増加割合の変化は $Pz=0\%$ の

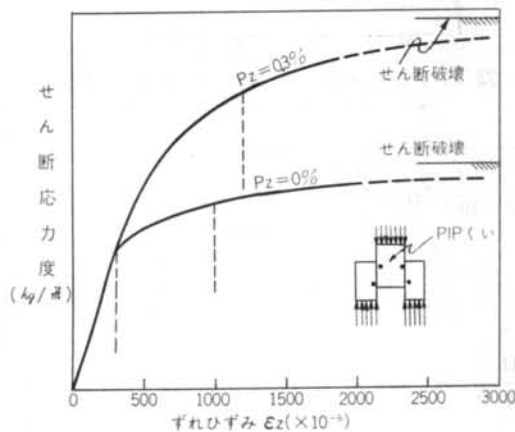


図-22 せん断応力度とずれひずみとの関係(Sc テスト)

場合ほど大きくはならない。以後ずれひずみが $1,200 \times 10^{-6}$ に達するまで徐々に増加してゆき、 $1,200 \times 10^{-6}$ に達すると急激に大きくなり、破壊に至る。ずれひずみはジベル鉄筋を 0.63% 入れた場合にも 0.3% 入れた場合とほぼ同様の傾向にある。

実験PIP合成はりの破壊は、ジベル鉄筋を入れない場合には、PIPくいとコンクリートとの打ち継ぎ面がずれ破壊を起こし、曲げ破壊に先行してせん断破壊となった。ジベル鉄筋を 0.3 、 0.63% 入れた場合には、打ち継ぎ面はずれ破壊に至らず、PIP合成はりではせん断破壊に先行して曲げ破壊となった。

合成はり破壊時のせん断応力度は表-22の通りである。ジベル鉄筋を入れない場合($Pz=0\%$)の打ち継ぎ面のせん断強度は Gp テストおよび Gn テストとともに約 7 kg/cm^2 であった。ジベル鉄筋を入れた場合($Pz=0.3$ 、 0.63%)には Gp テストで約 8 kg/cm^2 、 Gn テストで約 11 kg/cm^2 であった。ジベル鉄筋を入れた場合($Pz=0.3\%$ ならびに 0.63%)の値は曲げ破壊時のものであるから、打ち継ぎ面のせん断強度は各々 8 kg/cm^2 以上、ならびに 11 kg/cm^2 以上であるといえる。

	目測によるずれ発見時		破 壊 時			
	載荷荷重 (t)	せん断応力度 (kg/cm ²)	載荷荷重 (t)	せん断応力度 (kg/cm ²)		
Gp	101	11	3.4	23.4	7.3	
	102	12	3.7	21.7	22.5	6.7
	103	10	3.1	(30.0)	(9.3)	7.0
Gp	201	12	3.7	23.7	7.4	
	202	12	3.7	25.0	24.4	7.8
	203	12	3.7	24.6	7.6	(7.6)
Gp	301	14	4.3	24.5	7.6	
	302	14	4.3	22.7	24.5	7.0
	303	12	3.7	26.0	8.1	(7.6)
Gn	101	7	2.4	21.2	7.4	
	102	12	4.2	(13.8)	19.7	(4.8)
	103	11	3.8	18.2	6.3	6.9
Gn	201	10	3.5	31.8	11.0	
	202	6	2.1	29.1	31.4	10.1
	203	6	2.1	33.4	11.6	(10.9)
Gn	301	10	3.5	29.6	10.3	
	302	18	6.3	31.6	31.2	11.0
	303	6	2.1	32.5	11.3	(10.9)

() は曲げ破壊時の値

表-22 ずれ発見時ならびに破壊時のせん断応力度

PIP合成はりの打ち継ぎ面のせん断応力度とスパン全長の平均ずれひずみとの関係を要約すると図-23の通りである。ジベル鉄筋を入れない場合 ($Gp100$, $Gn100$) には、平均ずれひずみが $300 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$ に達するとひずみの増加割合は変化しはじめ、以後ずれひずみが急激に増大して、せん断破壊に至る。一方、ジベル鉄筋を入れた場合 ($Gp200, 300$, $Gn200, 300$) には、平均ずれひずみが $300 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6}$ に達してもひずみの増加割合は、ジベル鉄筋を入れない場合に比べて小であり、平均ずれひずみは徐々に増加して曲げ破壊に至るまで急激に大きくなってはいない。曲げ破壊時の平均ずれひずみは約 $1,200 \times 10^{-6}$ となっている。なお、平均ずれひずみの増加過程はジベル鉄筋比が 0.3, 0.63, と異なってもほぼ同一である。

平均ずれひずみが $\varepsilon_x = 300 \times 10^{-6}$ および $\varepsilon_x = 1,200 \times 10^{-6}$ における打ち継ぎ面のせん断応力度を図-23から求めると表-23となる。

PIPくいとコンクリートとの打ち継ぎ面の亀裂は、

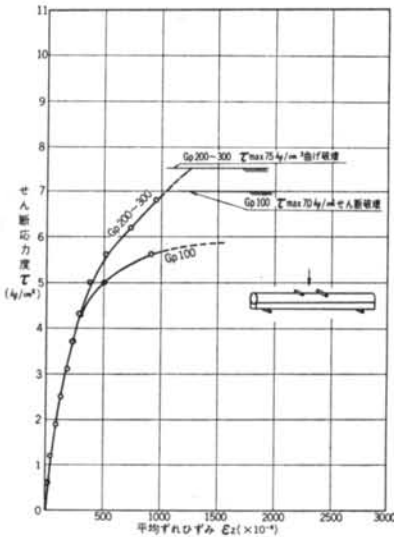


図-23(a) PIP合成はりのせん断応力度と平均ずれひずみとの関係 (Gp シリーズ)

部分的に発生し始め、打ち継ぎ線にそって水平方向に進展する。目測によるずれ開始を判定した時のせん断応力度は表-23に示すごとく $3 \sim 4 \text{ kg/cm}^2$ であった。

ジベル鉄筋を入れない場合には、打ち継ぎ線にそった水平方向の亀裂 (以下ずれ亀裂と略称する) の進展は、急激に進みほぼスパン全体にわたって進展した時に、打ち継ぎ面のずれ破壊を起こした。この場合の曲げ亀裂の性状は、ずれ亀裂が発生するまでは一体はりと同等であるが、それ以後は打ち継ぎ線で中断されたかたちとなり重ねはりに近いものとなる。

ジベル鉄筋を入れた場合 ($Px=0.3, 0.63\%$) には、ずれ亀裂はスパン全体には進展せず、曲げ破壊時でも部分的に発生しているにすぎない。曲げ亀裂の性状は、曲げ破壊にいたるまで一体はりと同等である。

以上、平均ずれひずみ、亀裂進展状況から本実験のごとき表面処理をした場合に、打ち継ぎ面のせん断抵抗について次のように考えられる。

打ち継ぎ面のせん断抵抗は載荷初期 (せん断応力度で

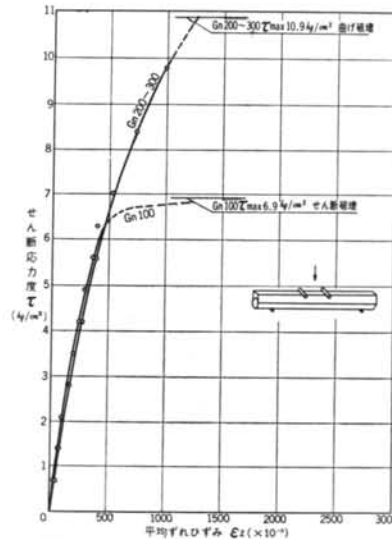


図-23(b) PIP合成はりのせん断応力度と平均ずれひずみとの関係 (Gn シリーズ)

ジベル鉄筋比 (%)	記号	せん断応力度 τ (kg/cm^2)			
		$\varepsilon = 300 \times 10^{-6}$	$\varepsilon = 1,200 \times 10^{-6}$	目測による ずれ発見時	破壊時
0	$Gp 100$	4	6	3	7
	$Gn 100$	5	7	4	7
0.3~0.63	$Gp 200 \sim 300$	4	7	4	(8)
	$Gn 200 \sim 300$	5	11	4	(11)

τ : 1体はりとして計算した値, 小数点1位を4捨5入
() は曲げ破壊時の値

表-23 PIP合成はりのせん断応力度

3~4 kg/cm² 以前)においては、一体はりのそれと同程度であり、載荷初期以後においては、ジベル鉄筋量によって異なる。ジベル鉄筋を入れない場合には載荷初期以降急激に低下し、ジベル鉄筋を0.3%入れた場合には打ち継ぎ面のせん断応力度が10kg/cm²に達しても、一体はりのそれとほぼ同程度であるものとみなせる。

4.10 P I P合成はりの曲げ剛性

実験合成はりの一体はりとしての換算断面二次モーメントは、全断面有効とした場合と引張側コンクリート(モルタル)を無視した場合とをわけて計算すると、表-24の値となる。




計算断面	E (kg/cm ²)	I (cm ⁴)	E I (kg·cm ²)
Gp Gn 	2.5×10 ⁵	3.1×10 ⁵	7.7×10 ¹⁰
Gp 	2.5×10 ⁵	1.1×10 ⁵	2.75×10 ¹⁰
Gn 	2.4×10 ⁵	1.3×10 ⁵	3.12×10 ¹⁰

表-24 P I P合成はりの曲げ剛性理論値

載荷荷重による中央点のたわみ測定値ならびに中央点のたわみ測定値から求めた曲げ剛性および理論値を図示すれば図-16の通りとなる。

設計モーメント近傍のたわみならびに曲げ剛性の実験値は、引張側のコンクリート(モルタル)を無視した一体はりとしての理論値とほぼ一致する。

4.11 P I P合成はりの許容モーメントと破壊安全度

P I Pの表面に付着した土をディスクサンダで取り除き、水洗いしてコンクリートを打ち継いだP I P合成はりの許容モーメントと、破壊安全度は下記の通りである。

4.11.1 ジベル鉄筋を入れない場合の打ち継ぎ面の許容せん断応力度

実験合成はりの破壊は打ち継ぎ面のずれ破壊となっている。

破壊荷重時のせん断応力度および平均ずれひずみ 300×10^{-6} を基準として、安全度3を確保するように応力およびひずみの両面から許容せん断応力度 τ_a を決めると

次の値となる。

$$\text{応力から} \quad 7 \times \frac{1}{3} = 2.3(\text{kg/cm}^2)$$

$$\text{ひずみから} \quad 300 \times 10^{-6} \times \frac{1}{3} = 100 \times 10^{-6} \text{ 時のせん}$$

断応力度 = 2 (kg/cm²) 故に $\tau_a = 2$ (kg/cm²) とする。

4.11.2 ジベル鉄筋比 $0.3\% \leq P_x \leq 0.63\%$ の場合の打ち継ぎ面の許容せん断応力度

実験合成はりの破壊は打ち継ぎ面のずれ破壊に先行して曲げ破壊となっている。

平均ずれひずみ $1,200 \times 10^{-6}$ を基準として、安全度3を確保するようにひずみの面から許容せん断応力度 τ_a を決めると次の値となる。

$$\text{ひずみから} \quad 1,200 \times 10^{-6} \times \frac{1}{3} = 400 \times 10^{-6} \text{ 時のせん}$$

断応力度 = 5 kg/cm²

曲げ破壊時のせん断応力度は平均 9.3kg/cm²(表-22)であるから、上記せん断応力度は応力の面からは1.9以上の安全度を確保していることになる。

故に $\tau_a = 5$ kg/cm² とする。

4.11.3 ジベル鉄筋比 $0\% < P_x < 0.3\%$ の場合の打ち継ぎ面の許容せん断応力度

ジベル鉄筋比 $0\% < P_x < 0.3\%$ の場合についての実験結果は本実験では得ていない。

ここでジベル鉄筋のせん断抵抗におよぼす効果が $0 \leq P_x \leq 0.3\%$ で、ジベル鉄筋量に一次比例するものと仮定すれば²⁾、許容せん断応力度 τ_a は下記の値としてよいものと考えられる。

$$\tau_a = 2 + 10P_x \quad (0 < P_x < 0.3\%)$$

$$P_x: \text{ジベル鉄筋比} \quad (\%)$$

$$\tau_a: \text{許容せん断応力度} \quad (\text{kg/cm}^2)$$

4.11.4 実験P I P合成はりの許容モーメント

一般に鉄筋コンクリートはりのせん断耐力は、せん断スパン比が $a/d = 2.5 \sim 3.0$ の載荷条件で最小値に近づく^{3),4)}。また、本実験結果から予測されるように、打ち継ぎ面が引張側にある場合にはせん断抵抗が小となるものと考えられる。本実験の載荷条件は $a/d = 3.3$ または 3.5 である。また、打ち継ぎ面は引張側に位置している。したがって、4.11.1, 4.11.2に示した許容せん断応力度は a/d が2.5以下の場合あるいは打ち継ぎ面が圧縮側に位置する場合には安全側の値となるものと考えられる。下記に示す式(7)の許容せん断応力度を用いて実験P I P合成はりの許容モーメントを求めると表-25の値となる。

$$\tau_a \leq 2 + 10P_x \quad (0 \leq P_x \leq 0.3)$$

$$\tau_a = 5 \quad (0.3 \leq P_x) \quad \dots(7)$$

ここに τ_a : 打ち継ぎ面の許容せん断応力度(kg/cm²)

Pz : ジベル鉄筋比(%)

	許容モーメント Ma (t・m)	作用応力度 (kg/cm ²)			
		σ_m	σ_s'	σ_s	τ
Gp 100	4.84	61	331	1,039	2.0
Gn 100	4.31	35	345	824	2.0
Gp 200~300	6.54	82	447	1,400	2.7
Gn 200~300	7.34	60	586	1,400	2.4

$\sigma_{ma}=100\text{kg/cm}^2$, $\sigma_{ca}=60\text{kg/cm}^2$, $\sigma_{sa}=1,400\text{kg/cm}^2$
 $Gp100$, $Gn100$: $\tau_a = 2\text{kg/cm}^2$, $Gp200\sim 300$, $Gn200\sim 300$: $\tau_a = 5\text{kg/cm}^2$

表—25 P I P合成はりの許容モーメント Ma

	Pz (%)	Ma (t・m)	Mu (t・m)	$f=Mu/Ma$	破壊性状
Gp 100	0	4.84	17.1	3.7	せん断
Gp 200	0.3	6.54	19.1	2.9	曲げ
Gp 300	0.63	6.54	19.1	2.9	〃
Gn 100	0	4.31	14.0	3.3	せん断
Gn 200	0.3	7.34	24.3	3.3	曲げ
Gn 300	0.63	7.34	24.2	3.3	〃

表—27 破壊安全度

表—25の許容モーメントは、P I P合成はりを一体はりとして設計した場合の値である。式(7)の許容せん断応力度を超過するような設計モーメントが作用する場合には、設計断面を変更するかあるいは重ねはりとして設計するものとする。

$Gp100$, $Gp200$ ならびに重ねはりと同等の許容モーメントを有する後打ちコンクリート($\sigma_{ck}=180\text{kg/cm}^2$, $b=30\text{cm}$, $As=4\phi 19$ 単鉄筋)の有効高さを算定すると表—26の通りである。ジベル鉄筋を0.3%入れたはり($Gp200$)は有効高さ47.5cmの後打ちコンクリートと同等の許容モーメントを有し、ジベル鉄筋を入れないはり($Gp100$)は有効高さ40cmの後打ちコンクリートと同等の許容モーメントを有する。また重ねはりとして設計したはりは有効高さ30.5cmの後打ちコンクリートと同等の許容モーメントを有する。

本実験におけるP I P合成はりの後打ちコンクリートの有効高さは、いずれも15cmであるから、P I Pくいを設計上考慮した場合には、後打ちコンクリートの有効高さを各々32.5cm, 25cm, ならびに15.5cm減ずることができることになる。

4. 11. 5 実験P I P合成はりの破壊安全度

許容モーメント Ma の破壊に対する安全度は表—27の通りとなる。



図—24 許容モーメントと破壊モーメント

実験P I P合成はりを式(7)の許容せん断応力度を用いて設計した場合には、破壊に対する安全度は、実験値によれば曲げに対して2.9~3.3を確保し、せん断に対しては1.9~2.2以上を確保している。図—24は、許容モーメントと破壊モーメント理論値ならびに実験値との比較を表示したものである。 $Gn200$, 300 および $Gp200$, 300 の破壊モーメント実験値は、一体はりとしての曲げ破壊モーメント理論値の大略103%および94%であり、理論値とほぼ一致している。このことは、平均ずれひずみ増加割合が破壊時においても急激に増加していないことから推定できる。

以上のことから、P I Pくいの表面に付着した土をディスクサンダで取り除き、水洗いしてコンクリートを打ち継いだP I P合成はりを一体はりとして設計する場合には、P I Pくいモルタルの許容曲げ圧縮応力度および打ち継ぎ面の許容せん断応力度を、下記の値として許容モーメントを算定すればよい。

$$\sigma_{Tma} \leq \frac{1}{3} \cdot \psi \cdot \sigma_{28mk}$$

$$\tau_a \leq 2 + 10Pz \quad (0 \leq Pz \leq 0.3)$$

$$\tau_a = 5 \quad (0.3 \leq Pz)$$

ここに σ_{Tma} : モルタルの材令 T 日の許容曲げ圧縮応力度 (kg/cm²)

τ_a : 打ち継ぎ面の許容せん断応力度 (kg/cm²)

ジベル鉄筋比 (%)	0.3	0	0	(重ねはり)	0	0	0.3	0	0	0	0	0	
設計条件													
設計基準強度	$\sigma_{mk} = 300$ $\sigma_{ma} = 100$	$\sigma_{mk} = 300$ $\sigma_{ma} = 100$	$\sigma_{mk} = 300$ $\sigma_{ma} = 100$	$\sigma_{mk} = 300$ $\sigma_{ck} = 180$	$\sigma_{mk} = 300$ $\sigma_{ck} = 180$	$\sigma_{mk} = 300$ $\sigma_{ck} = 180$	$\sigma_{mk} = 300$ $\sigma_{ma} = 100$	$\sigma_{mk} = 300$ $\sigma_{ma} = 100$	$\sigma_{mk} = 300$ $\sigma_{ck} = 180$	$\sigma_{mk} = 300$ $\sigma_{ma} = 100$	$\sigma_{mk} = 300$ $\sigma_{ma} = 100$	$\sigma_{mk} = 300$ $\sigma_{ma} = 100$	
許容曲げ圧縮応力度	$\sigma_{ca} = 60$ $\tau_{ca} = 5$	$\sigma_{ca} = 60$ $\tau_{ca} = 6$	$\sigma_{ca} = 60$ $\tau_{ca} = 2$	$\sigma_{ca} = 60$ $\tau_{ca} = 6$	$\sigma_{ca} = 60$ $\tau_{ca} = 6$	$\sigma_{ca} = 60$ $\tau_{ca} = 6$	$\sigma_{ca} = 60$ $\tau_{ca} = 2$	$\sigma_{ca} = 60$ $\tau_{ca} = 6$	$\sigma_{ca} = 60$ $\tau_{ca} = 6$	$\sigma_{ca} = 60$ $\tau_{ca} = 6$	$\sigma_{ca} = 60$ $\tau_{ca} = 6$	$\sigma_{ca} = 60$ $\tau_{ca} = 6$	
打ち継ぎ面の 許容せん断応力度	τ_{za}												
鉄筋の許容引張応力度	σ_{sa}												
ヤング係数比	n_m												
コンクリート n_c	$n_m = 10$ $n_c = 15$	$n_m = 10$ $n_c = 15$	$n_m = 10$ $n_c = 15$	$n_m = 10$ $n_c = 15$	$n_m = 10$ $n_c = 15$	$n_m = 10$ $n_c = 15$	$n_m = 10$ $n_c = 15$	$n_m = 10$ $n_c = 15$	$n_m = 10$ $n_c = 15$	$n_m = 10$ $n_c = 15$	$n_m = 10$ $n_c = 15$	$n_m = 10$ $n_c = 15$	
許容モーメント (t·m) (比率%)	6.54 (100)	6.54 (100)	4.84 (74)	4.84 (74)	4.84 (74)	4.84 (74)	4.84 (74)	4.84 (74)	2.87 (44)	2.87 (44)	2.87 (44)	2.20 (34)	
設計断面 有効高さ 幅 鉄筋	$d = 47.5$ $b = 30$ $\phi 19 = 2.84$	$d = 47.5$ $b = 30$ $\phi 19 = 2.84$	$d = 47.5$ $b = 30$ $\phi 19 = 2.84$	$d = 47.5$ $b = 30$ $\phi 19 = 2.84$	$d = 47.5$ $b = 30$ $\phi 19 = 2.84$	$d = 47.5$ $b = 30$ $\phi 19 = 2.84$	$d = 47.5$ $b = 30$ $\phi 19 = 2.84$	$d = 47.5$ $b = 30$ $\phi 19 = 2.84$	$d = 22.5$ $b = 30$ $\phi 19 = 2.84$	$d = 30$ $b = 30$ $\phi 19 = 2.84$	$d = 30$ $b = 30$ $\phi 19 = 2.84$	$d = 30$ $b = 30$ $\phi 19 = 2.84$	
せん断応力度 (中立軸における値)	2.7 2.0 4.1	3.5 1.3 5.3	2.0 2.0 4.1	3.1 1.2 4.6	3.1 1.2 4.6	3.1 1.2 4.6	2.0 2.0 4.1	2.0 2.0 4.1	— — —	2.4 0.9 3.6	2.4 0.9 3.6	2.2 — —	5.2 — —

表-26 許容モーメントの比較

σ_{28mk} : モルタルの材令28日設計基準強度(kg/cm²)

ψ : 表-9の設計材令に関する定数

(材令7日で0.5, 材令28日で1.0, 材令91日
で1.4)

Pz : ジベル鉄筋比 $\frac{A_{zs}}{b \cdot s}$ (%)

d : P I P くの径(cm)

A_{zs} : ジベル鉄筋断面積(cm²)

s : ジベル鉄筋の間隔(cm)

上記許容モーメントはすくなくとも曲げ破壊に対して3, せん断破壊に対して2以上の安全度を有する値といえる。

4.12 P I P 合成はりの施工について

本実験の試験体製作にあたって得られた施工上の問題点および指針を列挙すると次の通りである。

4.12.1 鉄筋の挿入

本実験における鉄筋かごは、主鉄筋を矩形配筋としたこと、スターラップを兼ねたジベル鉄筋を配置してあること、ジベル鉄筋の一部に発泡スチールを取り付けたこと、ならびに円形スペーサ鉄筋($\phi 9$ mm筋2m間隔)を配置したこと等従来の鉄筋かごと相異なる点がある。

しかし鉄筋の挿入作業は、従来と同様の方法を採用してならん支障がなかった。これは、比較的地盤が良かったこと、ならびにくい長が短い($l = 6$ m)こと等によってにくい孔の鉛直性が良好であったこと、ならびに円形スペーサ鉄筋によって主鉄筋の位置が確保でき、ジベル鉄筋が孔壁に接するのを最少限にとどめていたこと等に起因するものと考えられる。

円形スペーサ鉄筋は上記長所を有するが、孔壁に接して土を削り、スペーサ鉄筋の周辺に土の混入をきたす短所を有する。

鉄筋の挿入を容易にし、土の混入を防止するためには、下記のようにすることが望ましい。

- ① いかなる地盤条件においても、にくい孔を鉛直に施工すること(特に長くないの場合)
- ② 円形スペーサ鉄筋は使用せず、これに代るスペーサを用いる

4.12.2 ジベル鉄筋のはつり起こし

ジベル鉄筋のはつり起こしにあたって発泡スチロールはジベル鉄筋の位置の確認ならびに、モルタルのはつり作業の簡略の役目を十分に果たした。

ジベル鉄筋の起こしで問題になるのは、ジベル鉄筋周辺のモルタルが破損することである。モルタルの破損は、ジベル鉄筋径が大なるほど、またはつり起こし時の

モルタルの材令が若いほど多くなる。これを防止するためには、ジベル鉄筋径を13mm以下とすることならびに鉄筋の起こしは、モルタルの材令が14日以降に行なうことが望ましい。

§ 5. 結 論

以上の一連の実験結果から、P I P 合成はりの設計施工に関して次の結論が得られる。

- ① P I P にくい体の強度は、標準供試体強度の110%を確保しており、その変動を考慮しても、標準供試体強度を十分に満足するものである。
- ② P I P にくいモルタルの許容曲げ圧縮応力度は、材令28日設計基準強度をもととして次式の値とすれば良い。

$$\sigma_{Tma} \leq \frac{1}{3} \cdot \psi \cdot \sigma_{28mk}$$

ここに σ_{Tma} : モルタルの材令T日 許容曲げ圧縮応力度(kg/cm²)

σ_{28mk} : モルタルの材令28日設計基準強度(kg/cm²)

ψ : 表-9の設計材令に関する定数(材令7日で0.5, 材令28日で1.0, 材令91日
で1.4)

- ③ P I P にくいモルタルのヤング係数は次のように仮定すれば良い。

弾性変形の計算 $E_m = 9.5 \times 10^5$ (kg/cm²) [$n_m = 8.4$]

部材応力度の計算 $E_m = 2.1 \times 10^5$ (") [$n_m = 10$]

- ④ P I P にくい表面に付着した土をディスクサンダーで取り除き、水洗いしてコンクリートを打ち継いだP I P 合成はりを設計するにあたり、打ち継ぎ面の許容せん断応力度を下記の値とするならば、一体はりとして設計したP I P 合成はりの許容モーメントは、すくなくとも曲げ破壊に対して3, せん断破壊に対して2以上の安全度を確保し得る。

$$\tau_a \leq 2 + 10Pz \quad (0 \leq Pz \leq 0.3)$$

$$\tau_a = 5 \quad (0.3 \leq Pz)$$

ここに τ_a : 打ち継ぎ面の許容せん断応力度(kg/cm²)

Pz : ジベル鉄筋比(%)

- ⑤ 本実験のごとき打ち継ぎ方法を採用し、上記②~④の条件を用いるならば、P I P にくいを本構造物の一部として構造計算に組み込み、P I P にくいを地下構造物の一部として利用出来る。特に、ジベル鉄筋を0.3%入れることによって、従来の設計によるコン

クリートの有効高さをPIPくいの径に相当する有効高さだけ減ずることが可能となる。

- ⑥ 施工上の問題点として、PIPくいの孔壁を鉛直に施工することおよび土の混入を最少限にするスペーサを用いること等があげられる。

§ 6. あとがき

§1. で述べたごとく本工法を実施するためには、設計施工上の種々の問題点を解決してゆかねばならない。このうち本実験では、現場において技術的に可能な、かつ最善な方法と考えられる表面処理を打ち継ぎ面に施し、PIPくい主鉄筋にあらかじめ溶接したジベル鉄筋で打ち継ぎ面を補強した場合について、PIP合成はりとしての曲げ性状を調べ、その設計方法ならびに施工上の問

題点を明らかにした。

これによってPIPくいを地下壁の一部として構造計算に組み込む時の一指針を得たことになり、本実験のごとき打ち継ぎ方法によるPIP合成壁の設計がほぼ可能となった。

本工法をさらに実用化して行くためには、PIPくいの鉛直方向施工精度の把握ならびに施工精度をさらに高める施工方法の開発、本工法を使用した種々の構造形式の比較設計およびより経済的な打ち継ぎ面の補強方法の開発等、今後の実験研究にまたなければならない点がある。

本実験は、早稲田大学土木工学科神山一教授の指導のもとに西松建設㈱と清水建設㈱の共同研究として昭和43年6月～10月に実施したものである。

末筆ながら、本実験にご助力くださったかたがたに謝意を表します。

<参考文献>

- 1) C. W. Dunham : "The Theory and Practice of Reinforced Concrete" 3rd Edition McGraw-Hill, 1953
- 2) 神山, 陳, 松島 : "プレキャストプレストレスト接合はりのせん断強度" 土木学会第23回年次学術講演会概要 第IV部門 1968.10
- 3) C. N. J. Kani : "The Riddle of Shear Failure and Its Solution" Journal of American Concrete Institute, April 1964
- 4) F. Leonhardt : "Die Verminderete Schubdeckung Beistahlbeton-Tragnerken" Der Bauingenieur, Januar 1965

