

論文 高圧水により処理したコンクリート接合面のせん断耐力に関する研究

古市耕輔^{*1}・青木一二三^{*2}・宮越雄幸^{*3}・平陽兵^{*4}

要旨：地下連続壁を本体利用する一体壁において、コンクリート接合面のせん断耐力を評価するため主に高圧水による接合面処理を対象に、処理深さ、ジベル筋量、接合面に垂直に作用させた面応力などをパラメータとした 19 ケースの一面せん断実験を実施した。その結果、高圧水により接合面処理をした場合、従来の機械式処理に比べて大きなせん断耐力が得られ、その場合の最大せん断応力はジベル筋量にほとんど影響を受けず、面応力と処理深さに影響されることが確認された。また、最大値に達した後の最小せん断応力は接合面の処理方法によらず、ジベル筋量とその降伏応力との積と面応力との和に比例することが確認された。

キーワード：せん断耐力、ウォータージェット、接合面、一面せん断実験

1. はじめに

近年、構造物の合理化の一環として土留壁として先行構築された部材と後打ちの本体構造部材を一体化して想定外力に抵抗する一体壁構造が数多く建設されつつある。この一体壁に外力が作用した場合に新旧部材間に生じるせん断力は、基本的に接合面における摩擦と各部材間に配置するジベル筋による抵抗により伝達することを想定し、実験結果をもとに上記の機構を反映した式により、設計・照査がなされている。

一方、建設現場においては、接合面処理の省力化、品質の安定、環境対策などを目的として、従来の機械式の接合面処理に代えて高圧水（ウォータージェット）を採用するケースが増えてきている。接合面処理にウォータージェットを用いた場合、その接合面で付着強度の増加が見込まれ、ある特定条件下での実験結果も既に報告されている。

本研究では、今後接合面処理方法の主流となるウォータージェット工法を用いた場合のコンクリート接合面のせん断耐力を評価するために、処理深さ、ジベル筋量、接合面に垂直に作用させた面応力（以下、面応力）をパラメータとした 16 体と比較用の機械式処理 2 体、接合面の無い一体打ち

1 体の合計 19 体の試験体を用いて一面せん断実験を実施した。

2. 実験概要

図-1 に試験体形状を表-1 に試験体一覧を示す。

2. 1 実験パラメータ

P シリーズは高圧水により接合面処理をしたものであり、このうち 1 から 8 までは浅めの処理（粗度で 1 ～ 2 mm）をしたもので、9 から 16 が深め

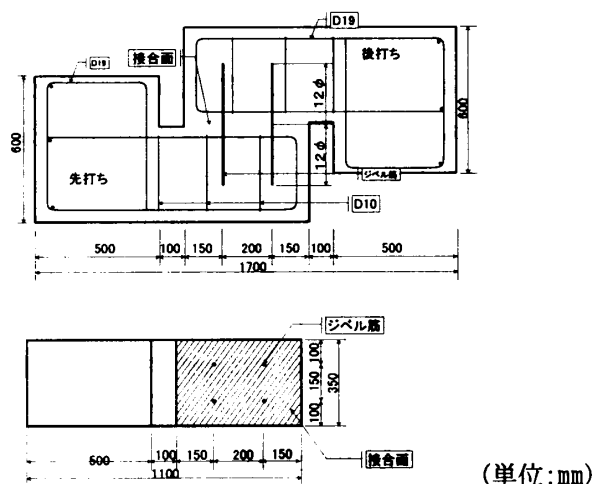


図-1 試験体形状

*1 鹿島建設（株）技術研究所 土木技術研究部 主任研究員 工修（正会員）

*2 日本鉄道建設公団 設計技術室 主任技師

*3 日本鉄道建設公団 東京支社 品川鉄道建設所

*4 鹿島建設（株）技術研究所 土木技術研究部 研究員 工修（正会員）

の処理(粗度で2～3mm)をしたものである。また、Bシリーズは機械式処理を行ったものでB-1は接合面全体を浅くハンドチッパーによりはつり落とし、B-2は5cmメッシュ内に一個所7mm程度の深さの円錐状の穴をハンドチッパーにより成形した。また、C-0については、新旧部材のコンクリートを同時に打設して接合面を有しない一体ものとした。Pシリーズにおいては、ジベル筋量を0%, 0.16%, 0.29%, 0.45%の4段階とし、また接合面に垂直に作用する面応力 σ_N を0.2N/mm²と0.6N/mm²の2ケースとした。B、Cシリーズについては、ジベル筋量0.29%, 面応力 σ_N を0.2N/mm²とした。

2. 2 試験体

試験体の大きさは、せん断面が500mm×350mmと最大骨材寸法20mmに比べて十分に大きくなるように決定し、せん断面の延長上に載荷位置がくるようにL字型を重ねた形とした。試験体には実構造物に対応する鉄筋を配置する他、載荷部分は接合面のずれ発生に先立って試験体が破壊しないよう十分な補強を施した。ジベル筋は配置を一定として鉄筋径をD10, 13, 16と変化させた。ジベル筋の定着長は、全長で鉄筋径の24倍とした。

ジベル筋の材料試験結果を表-2に示す。試験体に用いた鉄筋の材質はSD345で、その降伏強度はD10が383N/mm²、D13が377N/mm²、D16が383N/mm²であった。また、コンクリートの配合は先行、後打ちともに同一とし、早強セメント、Gmax=20mm、実験時圧縮強度が24N/mm²以上となるように設計した。実験時におけるコンクリートの圧縮強度は実験結果とともに表-4に示すが、Pシリーズでは先行部材で約32N/mm²、後打ち部材で約30N/mm²となっていた。

2. 3 試験体の製作と管理

試験体の製作は、まずジベル筋を配置して連続土留壁に対応する先行部材を打設した。コンクリートの打設は接合面の側方から行い、養生の後、接合面処理を施した。高圧水による処理では、事前に試験体と同時に打設したダミー部材を用いて施工試験を行い、表-3に示す仕様を決定した。

表-1 試験体一覧

試験体	接合面の処理		ジベル筋		面応力 σ_N (N/mm ²)
	方法	粗度	ジベル筋	ジベル筋比(%)	
P-1	高圧水	1～2mm	なし	0	0.2
P-2	"	1～2mm	なし	0	0.6
P-3	"	1～2mm	D10-4本	0.16	0.2
P-4	"	1～2mm	D10-4本	0.16	0.6
P-5	"	1～2mm	D13-4本	0.29	0.2
P-6	"	1～2mm	D13-4本	0.29	0.6
P-7	"	1～2mm	D16-4本	0.45	0.2
P-8	"	1～2mm	D16-4本	0.45	0.6
P-9	"	2～3mm	なし	0	0.2
P-10	"	2～3mm	なし	0	0.6
P-11	"	2～3mm	D10-4本	0.16	0.2
P-12	"	2～3mm	D10-4本	0.16	0.6
P-13	"	2～3mm	D13-4本	0.29	0.2
P-14	"	2～3mm	D13-4本	0.29	0.6
P-15	"	2～3mm	D16-4本	0.45	0.2
P-16	"	2～3mm	D16-4本	0.45	0.6
B-1	チッピング	全面浅め	D13-4本	0.29	0.2
B-2	"	5cm ² 1ヶ	D13-4本	0.29	0.2
C-0	なし		D13-4本	0.29	0.2

表-2 ジベル筋材料試験結果

種類	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	伸び率 (%)
D10	383	544	21
D13	377	546	25
D16	383	597	23

表-3 高圧水の仕様

	粗度1～2mm	粗度2～3mm
ノズルの種類	回転式	回転式
吐出角度	30°	30°
吐出圧力	100MPa	140MPa
吐出流量	19.0 l/min	22.5 l/min
移動速度	0.9m/min	0.9m/min
ノズル壁間距離	30mm	30mm
回転数	500rpm	500rpm
パス	1回	1回
目粗し幅	200mm幅×3列	200mm幅×3列

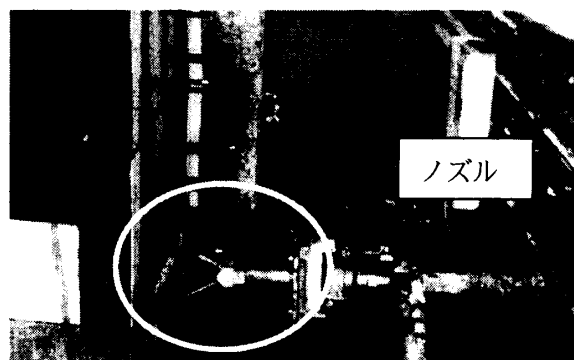


写真-1 接合面処理状況

処理深さの違いは、吐出圧力と流量を変化させることで対応した。施工の状況を写真－1に示す。

処理が終了した接合面の管理は、レーザー変位計により 0.05mm 間隔で計測長 $L=200\text{mm}$ にわたり 4,000 点のコンクリート表面高さを測定、データをコンピューターに取り込み、高さの平均値を 0 とした関数 $f(x)$ を仮定し、式 (1) に示す粗度 S を仮定した。(図－2 参照)

$$S = (1/L) \int_0^L |f(x)| dx \quad \text{式 (1)}$$

処理後の接合面の状況を写真－2に示す。

接合面処理後、後打ち部材の鉄筋を配置し先行部材の場合と同じ方向からコンクリートの打設を行い、実験まで 2 週間以上の養生を行った。

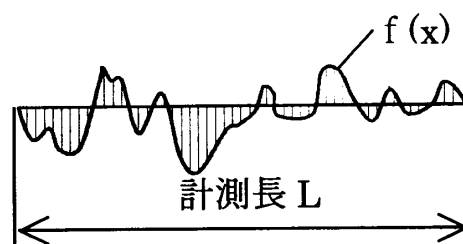
2. 4 実験方法

実験状況を写真－3に示す。載荷は鉛直ジャッキにより新旧部材の接合面に所定の面応力を作用させた状態で、水平ジャッキにより接合面にせん断力を発生させた。この時、鉛直ジャッキの力による摩擦力で試験体の横移動や弾性変形が妨げられないよう、先行部材(写真－3下側部材)の下にはテフロンを配置し、また後打ち部材と鉛直荷重装置の間にはベアリングプレートを配置した。実験中、面応力は計画値の $\pm 5\%$ 以内を許容値として制御し、水平載荷はずれ量が 20mm に達するまで行った。

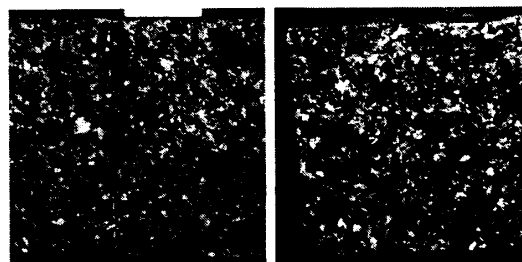
計測は、鉛直・水平の荷重 2 点と、新旧部材間の相対ずれ量 2 点、接合面の目開き量 2 点、及びジベル筋 2 本のひずみ 2 点とした。

3. 実験結果

図－3に実験結果の代表例としてジベル筋量 0.29%, 面応力 0.2N/mm^2 のせん断応力とずれ量の関係を、写真－4に P－5 の実験終了時を示す。いずれの場合も、せん断応力はずれが 1 mm 以下の時に最大となり、急激なずれとともに低下、その後せん断応力に大きな変化はなく、ずれのみが進行した。また、破壊は接合面処理の方法によらず、接合面で生じた。図－4にせん断応力とジベル筋の軸ひずみ関係の一例を示す。ジベル筋のひずみ

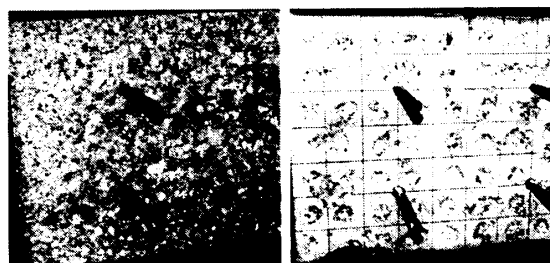


図－2 粗度の概念図



P-1~8

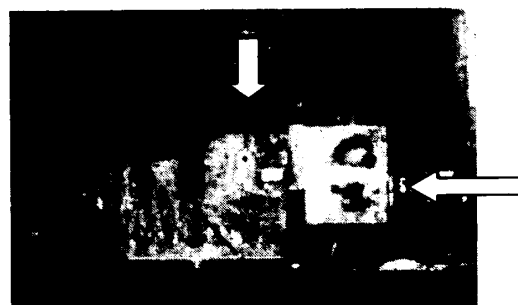
P-9~16



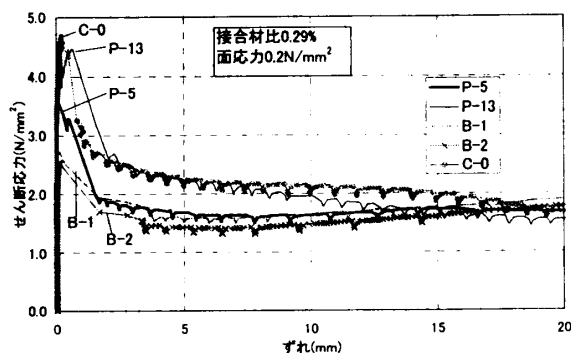
B-1

B-2

写真－2 接合面処理後状況



写真－3 実験状況



図－3 せん断応力－ずれ関係



写真-4 実験終了時状況 (P-5)

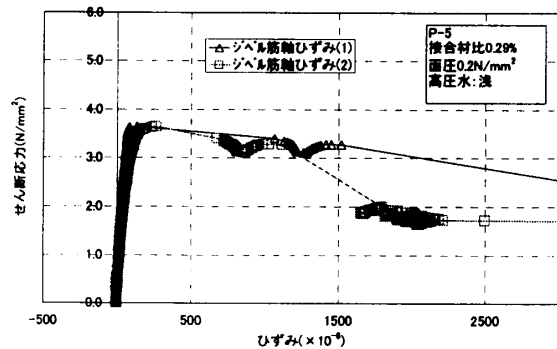


図-4 せん断応力-ひずみ関係

は、最大せん断応力までの増加は微増で、最大せん断応力時には降伏ひずみに達しておらず、ずれが生じるとともにひずみも急増し降伏に至った。

表-4に全実験結果の一覧を示す。ここで、最大せん断応力は実験時の最大水平荷重を接合面積で除した値とし、最小せん断応力は最大荷重後ずれ量が20mmに達するまでに最小を示した水平荷重を接合面積で除した値として定義した。

3. 1 接合面処理方法及び粗度の影響

表-5にジベル筋比0.29%, 面応力0.2N/mm², 接合面処理方法のみが異なる試験体の実験結果一覧を示す。最大せん断応力は、実験時のコンクリート強度が若干異なるが、表に示す順番であった。

高圧水(粗度2.2mm)による試験体の最大せん断応力は、接合面のない一体の試験体と比べて5%低いだけであり、十分な付着力を有していた。

チップング(粗度1.7と2.0mm)による試験体の最大せん断応力は、接合面の無い一体の試験体と比べて半分強の値で、粗度が小さい(1.4mm)高圧水(P-5)と比べても小さい値であった。

表-4 実験結果一覧

試験体	最大 せん断応力 N/mm²	最小 せん断応力 N/mm²	コンクリート強度	
			先 N/mm²	後 N/mm²
P-1	3.52	0.27	32.1	29.5
P-2	3.88	0.65	32.3	29.9
P-3	3.23	1.06	32.1	29.5
P-4	4.16	1.42	32.3	29.9
P-5	3.64	1.61	32.1	29.4
P-6	4.15	1.88	32.2	29.7
P-7	3.66	2.14	32.0	29.3
P-8	4.30	2.43	32.2	29.7
P-9	3.67	0.22	32.4	30.2
P-10	4.36	0.61	32.5	30.4
P-11	3.65	0.76	32.4	30.2
P-12	4.44	1.35	32.5	30.4
P-13	4.47	1.55	32.3	30.0
P-14	4.57	2.14	32.4	30.3
P-15	4.45	2.61	32.3	30.0
P-16	4.64	2.92	32.4	30.3
B-1	2.73	1.57	35.7	34.3
B-2	2.55	1.41	33.4	31.0
C-0	4.70	1.68	33.4	31.0

表-5 実験結果

試験体	目粗し方法	粗度 mm	最大せん断応力 N/mm²	C-0に対する比率	最小せん断応力 N/mm²
C-0	接合面無し	—	4.70	1.00	1.68
P-13	高圧水	2.2	4.47	0.95	1.55
P-5	高圧水	1.4	3.64	0.77	1.61
B-1	チップング全面	1.7	2.73	0.58	1.57
B-2	チップング5cm間隔	2.0	2.55	0.54	1.41

表-6 せん断応力の比率

試験体	接合材比 %	面応力 N/mm²	最大せん断応力		最小せん断応力	
			比率 ^{*1}	平均	比率	平均
P-1, 9	0	0.2	1.04	1.15	0.79	0.92
P-3, 11	0.16		1.13		0.71	
P-5, 13	0.29		1.23		0.96	
P-7, 15	0.45		1.22		1.22	
P-2, 10	0	0.6	1.12	1.09	0.94	1.06
P-4, 12	0.16		1.10		0.95	
P-6, 14	0.29		1.10		1.14	
P-8, 16	0.45		1.10		1.20	

*1 比率=深い/浅い
試験体 P-1, 9 の場合、比率=(P-9)/(P-1)

以上より、接合面処理方法が異なる場合は、粗度よりも処理方法の違いによる影響が大きいと考えられ、粗度の大きさと最大せん断応力の大きさとに関係は見られなかった。また、今回のチップングの方法においても粗度が2.0mmと大きい方の最大せん断応力が小さく、チップングの場合も処理面パターンによる影響が大きかった。

次に、高圧水を対象として接合面処理の程度(粗度)だけが異なる試験体ごと(例えばP-1

とP-9)の、最大及び最小せん断応力の比率を表-6に示す。

最大せん断応力は、すべてのパターンにおいて粗度2.2mm (P-9~16)の方が1.4mm (P-1~8)の場合よりも大きく、その比率は平均すると約1.12であった。一方、最小せん断応力は、増加した場合と減少した場合とがあり、処理程度の影響は見られなかった。

3.2 ジベル筋比の影響

図-5にジベル筋量だけが異なる試験体ごとの、最大及び最小せん断応力とジベル筋比の関係を示す。

最大せん断応力は、多少ばらつきがあるもののほぼ一定の値を示しており、ジベル筋比の影響は見られなかった。

最小せん断応力は、ジベル筋比に比例して増加する傾向を示しており、その相関係数は0.99であった。

3.3 面応力の影響

表-7に面応力だけが異なる試験体ごと(例えばP-1とP-2)の、最大及び最小せん断応力の比率を示す。

最大せん断応力は、すべての試験体において面応力の増加に伴い増加し、その比率は平均すると約1.15であった。

また、最小せん断応力も最大せん断応力と同様にすべての試験体において面応力の増加に伴い増加しており、その比率は1.5以上であった。

4. 考察

接合面のせん断応力を計算する方法は、実験式、設計式を含めて数多く提案されている¹⁾²⁾³⁾⁴⁾。

これらと今回の実験結果を比較したものを図-6に示す。

図より、 $(P_s \cdot \sigma_{sy} + \sigma_n)$ をパラメータとした比較では高圧水を用いた処理(図中の○, △)を行った場合、最大せん断応力は⑤を除いたすべての式を上回った。特に、「深い掘削土留工設計指針(平成5年1月)」で用いられている次式で示される③式と比較して、最大せん断応力は③式を十分に上回

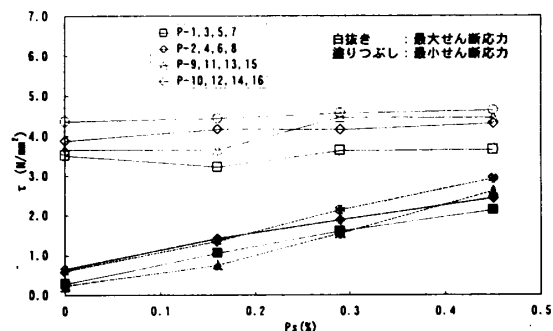


図-5 せん断応力とジベル筋比との関係

表-7 せん断応力の比率

試験体	接合材比 %	粗度 mm	最大せん断応力		最小せん断応力	
			比率 ^{*)}	平均	比率	平均
P-1, 2	0	1.4	1.1	1.18	2.36	1.5
P-3, 4	0.16		1.29		1.34	
P-5, 6	0.29		1.14		1.17	
P-7, 8	0.45		1.18		1.14	
P-9, 10	0	2.2	1.19	1.12	2.82	1.78
P-11, 12	0.16		1.21		1.79	
P-13, 14	0.29		1.02		1.38	
P-15, 16	0.45		1.04		1.12	

*) 比率=面応力大/面応力小
試験体 P-1, 2 の場合、比率= (P-2) / (P-1)

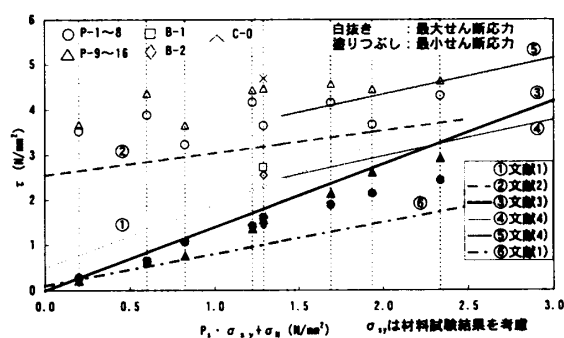


図-6 既往の式と実験結果との比較

った。

$$\tau_u = \mu (P_s \cdot \sigma_{sy} + \sigma_n) \quad \text{式 (2)}$$

τ_u : 接合面の最大せん断応力 (N/mm²)

μ : 摩擦係数 (1.4)

P_s : ジベル筋比

σ_{sy} : ジベル筋降伏強度 (N/mm²)

σ_n : 接合面の面応力 (N/mm²)

また、高圧水による処理は先に述べたように接合面の付着・かみ合わせ効果が大きくジベル筋の効果が小さいため、最大せん断応力と $(P_s \cdot \sigma_{sy} + \sigma_n)$ との間に比例の傾向は見られなかった。

最小せん断応力は、図に示すように $(P_s \cdot \sigma_{sy} + \sigma_n)$ に比例する傾向を示し、その傾きは③式の $\mu = 1.4$ より多少下回った。

4. 1 最大せん断応力度

以上から、接合面処理にウォータージェットを採用した場合には、最大せん断応力は、面応力と目粗し深さの影響が確認された。

そこで、最大せん断応力 τ_{max} を表す式として、
 $\tau_{max} = (\text{接合面の付着分}) + (\text{面応力の影響分})$
 と仮定することにより次式を得た。

$$\tau_{max} = 3.52 + 1.32 \sigma_n \quad \text{式 (3)}$$

τ_{max} : 接合面の最大せん断応力 (N/mm²)

σ_n : 接合面の面応力 (N/mm²) $0.2 \leq \sigma_n \leq 0.6$

図-7に今回の実験によるPシリーズの最大せん断応力の回帰直線と実験結果を示す。

4. 2 最小せん断応力度

最小せん断応力ではジベル筋比と面応力の影響が確認されたことから、 $(P_s \cdot \sigma_{sy} + \sigma_n)$ をパラメータとし、「深い掘削土留工設計指針」で用いられている下記の式で表すこととした。

$$\tau_{min} = \mu (P_s \cdot \sigma_{sy} + \sigma_n) \quad \text{式 (4)}$$

ここで、

τ_{min} : 接合面のずれが20mmまでにおける

最小せん断応力 (N/mm²)

P_s : ジベル筋比 $0 \leq P_s \leq 0.0045$

σ_{sy} : ジベル筋降伏強度 (N/mm²)

σ_n : 接合面の面応力 (N/mm²) $0.2 \leq \sigma_n \leq 0.6$

μ : 係数

今回のPシリーズ 16 体のせん断試験結果による回帰計算の結果、 $\mu = 1.17$ を得、図-8に実験結果とともに示す。

5. まとめ

19 体の一面せん断実験の結果から、コンクリート接合面処理に高圧水を用いた場合におけるせん断耐力について以下のことが確認された。

- ・ 最大せん断応力については、一体に近い十分な耐力が得られ、その影響要因は付着と面応力であった。
- ・ 最小せん断応力については、従来の考え方と

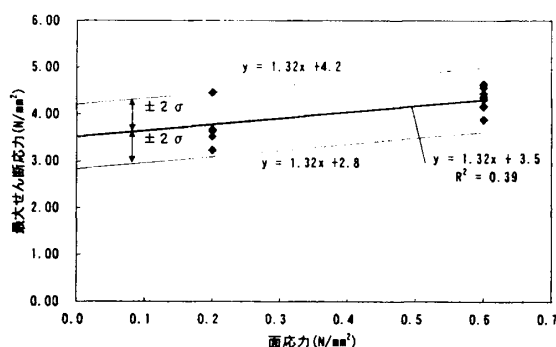


図-7 最大せん断応力回帰直線

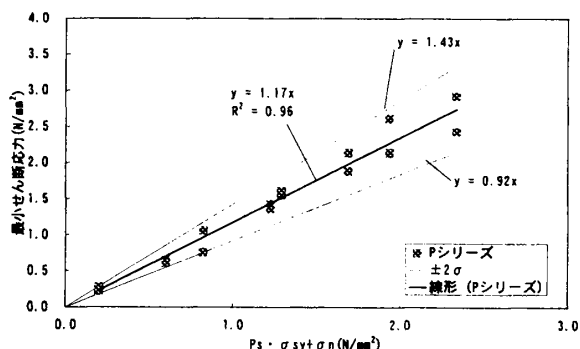


図-8 最小せん断応力回帰直線

同様に、ジベル筋比と面応力が影響要因となっていた。

これらの結果をもとに実験式を提案したが、今後、施工時の変動要因等も考慮して設計への適応を考えていきたい。

参考文献

- 1) 佐藤他：「地中連続壁の本体利用に関する基礎実験（その1：接合面のせん断特性）」、第36回土木学会年次講演会、V-33、1981年10月
- 2) 近藤他：「地中連壁工法に関する研究（その2：連壁と後打ちく体のせん断耐力）」、日本建築学会大会学術講演概要集（近畿）、1994年9月
- 3) 日本鉄道建設公団：「深い掘削土留工設計指針（平成5年1月）」
- 4) A.H.Mattock, N.W.Hawkins：「Shear Transfer in Reinforced Concrete - Recent Research」, Journal of PCI, March-April 1972