

鉛直継手による地中壁の一体化に関する実験的研究 (その3)

——波形鋼板接合面の面外せん断実験——

入 沢 賢 一 小 畠 克 朗
武 田 寿 一

An Experimental Study on Development of Interconnection Between Cast-in-Situ Diaphragm Walls by Vertical Construction Joint Method (Part 3)

——Tests of Reinforced Concrete Walls Made of Vertical Joint Box with Corrugated Steel Plate Subjected to Shear Out of Plane——

Ken-ichi Irisawa Yoshiro Kobatake
Toshikazu Takeda

Abstract

The objective of this study is to establish a new method of constructing foundations by use of cast-in-situ diaphragm walls instead of caissons or underground wall panels. Parts 1 and 2 reported about tests loading both out of plane and in plane to investigate the strength and stiffness of a vertical joint in the new construction method. This new method, which is now called "Diaphragm Wall Foundation," is already in use. This report presents the results of out of plane shear tests on six specimens, comparing plain steel plate with corrugated steel plate, which are used for vertical joint planes making joint boxes. The test results show that the behavior of corrugated steel plate is far superior to that of plain steel plate.

概 要

地中連続壁本体利用に当り、壁体相互の鉛直継手工法を提案し、実物大の地中壁体で施工性と構造性能調査を行ない、構造実験の結果を前報(その1)、(その2)で報告した。現在、本工法は、「連壁剛体基礎工法」と呼称し、既に実用に供されている。

本報は、鉛直継手部に設けた鋼製函体(J.BOX)の接合面の従来までの平鋼板を波形鋼板に換えることによる継手部の構造性能の向上を把握検討するため、逆対称加力による接合面の面外せん断実験により検討したものである。

実験の結果、波形鋼板による接合面の破壊性状は平鋼板と異なり、接合面の終局せん断強度は平鋼板の2~2.5倍に向上した。なお、接合面が波形鋼板の場合の終局せん断強度は $\tau = P_s \delta_{sy}$ 直線式を若干上回り、シャーコネクターは破壊時近傍で効力が発揮され、平鋼板と異なった。以上、J.BOX接合面に波形鋼板を使用することにより、連壁の一体化構造部材としての性能は非常に向上した。

1. 序

当社では、昭和53年度から、従来のケーソン工法に代わる新しい基礎工法の開発を行ない、OWS-SOLETANCHE工法による地中連続壁相互間の鉛直継手の一体化工法を提案し、その施工性調査と構造性能に関する実験的研究を続けてきた。この成果は、『連壁剛体基礎工法』として、既に、鉄道橋・道路橋基礎の本体構造としていくつか実用に供されている。

本工法は、地中連続壁鉛直継手部に設置した JOINT

BOX(以下、J.BOXと呼ぶ)内で水平主筋の重ね継手により一体化する工法であり、面外・面内方向の断面剛性を向上させ、従来のニューマチックケーソン工法に比べ、施工の安全性・容易性・工期短縮・経済性に優れ、構造性能も満足できるものである。

しかし、前報のSシリーズ¹⁾、INSシリーズ²⁾の実験結果から、接合面終局せん断耐力式 $c\tau_y = 0.36P_{ST}\sigma_{sy} + 5.6$ が得られたが、J.BOXの接合面が平鋼板のため、接合面のせん断抵抗は鉄筋のダボ作用に依存することが大きいものと判断された。

シリーズ	試験体	接合面 接合鋼板	鉄筋			コンクリート			試験体の 深さ (m)								
			水平主筋 (上下筋共同)	接合鉄筋比		シャーコネ クター本数	圧縮強度 F _c (kg/cm ²)	ヤング係数 E _c (kg/cm ²)		割裂強度 σ _{ei} (kg/cm ²)							
				P _s %	P _{ST} %												
S ₂	JP86-S ₂	E-4.5mm	5-D25	0.86	0.86	4-D32	376	2.39×10 ⁵	26.3	-0.98							
	JP86C4-S ₂				1.39												
	JC86-S ₂	コルゲートシート t=4.5mm h=50mm 1山=150mm			0.86	4-D32					389	2.45×10 ⁵	27.0				
	JC86C4-S ₂				1.39												
	JC86C8-S ₂				1.93									8-D32	403	2.50×10 ⁵	27.7
	JC134-S ₂				1.34												
S	N134-S	一体打	5-D32	1.34	1.34	557	3.07×10 ⁵	25.8	-5.51								
	No86-S		5-D25	0.86	0.86	315	2.28×10 ⁵	25.1	空中製作								
	N86-S					420	2.84×10 ⁵	28.0	-3.33								

(注) (1)Sシリーズは既報 $b \cdot D = 74 \times 80 = 5920 \text{cm}^2$ (全断面)
 (2)接合鉄筋比 $P_s = \frac{\text{全水平主筋断面積}}{\text{接合全断面積}(b \cdot D)}$ シャーコネクターも考慮した接合鉄筋比 $P_{ST} = \frac{\text{シャーコネクターも含めた全水平主筋断面積}}{\text{接合全断面積}(b \cdot D)}$

表一 試験体一覧表およびコンクリートの実験時性質

本報は、この鉛直継手工法の改善のため、J. BOX の接合鋼板に波形鋼板を使用し、平鋼板と比較したものである。

2. 実験概要

2.1. 計画

外力は面外力(土水圧)を対象とする。

試験体断面形状・配筋・加力方法は前報^{1),2)}のSシリーズと同じとし、接合鉄筋比(P_{ST}:接合全断面に対するシャーコネクターも含む全鉄筋量の比)、接合面の相違(平・波形)を実験変数とする。

試験体製作は、できるだけ実物に近似させ、2.2.で後述する仮想の地中壁体から計6体のはり状試験体を切り出して実験・検討する。よって、本工法の改善および設計資料の一端を得ることを主眼としたものである。

2.2. 試験体

大型実験棟床上に、幅0.8×長さ2.6×深さ4.4(m)の仮想の地中壁型枠を組み、内部にシートを張り安定液を満たし、接合鋼板(平・波形)をセットした鉄筋籠を吊込み、24時間浸漬した後、トレミー管によりコンクリートを安定液中で打設した。製作した2体の仮想地中壁体を水平切断し、はり状の試験体とした。その試験体一覧表を表一に、断面形状・配筋を図一に示す。

試験体は全てSシリーズと同一形状寸法であり、P_{ST}=0.86%(上下筋共5-D25)で平・波形の接合鋼板、これにシャーコネクター4-D32を追加したP_{ST}=1.39%の平・波形鋼板、シャーコネクター8-D32にしたP_{ST}=1.93%の波形鋼板、シャーコネクターのないP_{ST}=1.34%(上下筋共5-D32)の波形鋼板、計6体である。

2.3. 使用材料

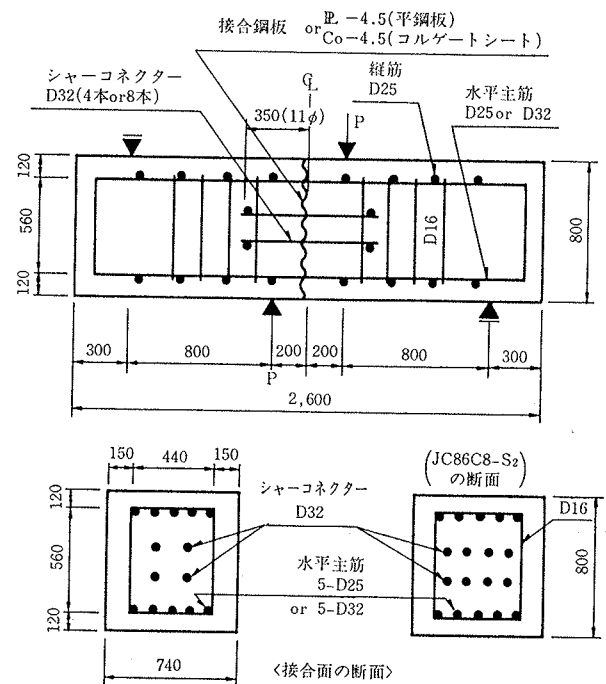
コンクリート:普通セメント量 370 kg/m³, 川砂, 粗骨材最大寸法 25 mm の碎石混りの川砂利, 呼び強度 270 kg/cm², スランプ 20±1.5 cm, W/C=48.6%の生コンを使用した。表二にコンクリート示方配合を示す。実験時のコンクリートの性質は表一に示した通りである。

粗骨材の最大寸法	スランプ	空気量	W/C	細骨材率	単位量(kg/m ³)				
					W	C	S	G	混和剤
25 mm	20±1.5 cm	4 %	48.6 %	47.5	180	370	836	935	0.862

表二 コンクリート示方配合

鋼材の種類	σ max (kg/cm ²)	σ sSY (kg/cm ²)	E _s (×10 ⁶ kg/cm ²)	伸び (%)	
E-4.5	3873	0.2 σ _{sy} =2573	1.76	29.5	
Co-4.5	3896	0.2 σ _{sy} =2825	2.00	30.4	
水平主筋及びシャーコネクター	D25	5792	3685	1.78	18.7
	D32	5567	3317	1.90	19.6
フープ筋	D16	5754	3893	1.91	16.5

表三 鋼材の物理的性質



図一 試験体断面形状・配筋 (壁から切り出したもの)

鉄筋: 熱間圧延異形棒鋼いづれも SD30 の材質で, 水平主筋 D25, D32, シャーコネクター D32, 縦筋 D25, フープ筋 D16, である。

接合鋼板: 平鋼板は厚さ 4.5 mm の SS41, 波形鋼板は厚さ 4.5 mm の無メッキのコルゲートシート (NKK 製品, 2形, $h=50$ mm, 1山間 150 mm, SS34) を使用した。表一3に鋼材の物理的性質を示す。0.2 σ_{sy} , は永久歪 0.2% 時の弾性線に平行な線と $\sigma \sim \varepsilon$ 曲線との交点の強度を示す。

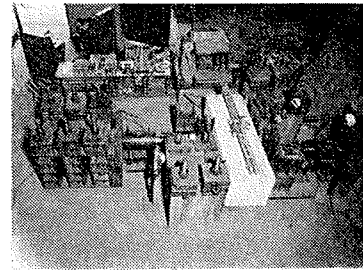


写真-1 実験状況 (加力装置)

2.4. 加力方法および測定方法

写真-1に加力装置の全景を示す。加力は、はりスパン中央にある接合鋼板(接合面)から左右 20 cm と 100 cm 離れた点を支点とする一方向逆対称加力である。接合面におけるせん断スパン比は約 0.3 と小さく、曲げの影響は小さい。

測定は、接合面より左右 20 cm 離れた荷重点 40 cm 間の相対変位 (δ_s) を高感度変位計(感度: 1000 μ /mm)で、鉄筋の歪度を W.S.G. で、行なった。なお、2点の荷重点の荷重はロードセルで検出し平均した。

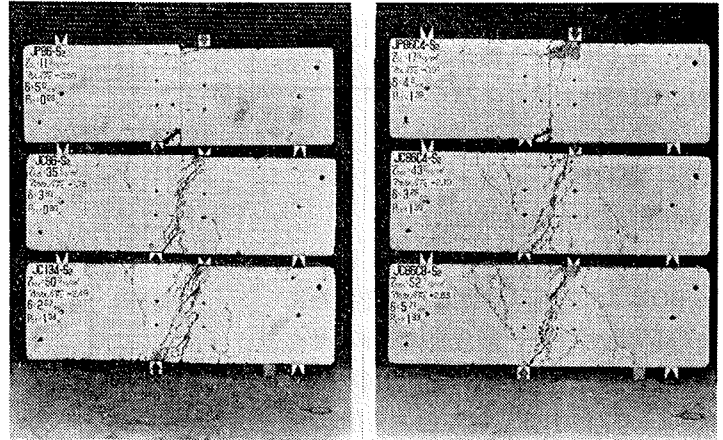


写真-2 最終破壊状況 (S_2 シリーズ: 6 体)

3. 実験結果とその検討

3.1. 破壊性状と $\tau \sim \delta_s$ 曲線

写真-2に最終破壊状況を、図-2に接合面平均せん断応力度 $\tau = Q/bD$ (bD は接合面積) と δ_s との関係を、前報¹⁾の一体打 (N86-S, N134-S, N₀86-S) と比較して、示した。

(1) 平鋼板 (2 体): δ_s は主に接合面のずれ変位であり、せん断抵抗は水平主筋とシャーコネクターのダボ作用に依存し、ひびわれは鉄筋周辺に集中した。前報¹⁾で定義したすべりせん断降伏強度 $\tau_{SL} = 11.5, 17.6$ kg/cm^2 (JP86-S₂, JP86C-S₂) が $\delta_s \approx 5$ mm で示された後、一挙に δ_s は増大し、鉄筋に沿う付着ひびわれが $\tau_{BO} = 16.9, 28.2$ kg/cm^2 で発生した。その後、 $\delta_s = 40, 28$ mm で除荷した。

(2) 波形鋼板 (4 体): 波形が接合面のずれを拘束しているため、破壊に至るまでの発生ひびわれの経過は図-3のようになった。以下、各ひびわれ発生時の接合面平均せん断応力度の添付記号は図-3による。 $\tau_s = 10 \sim 18$ kg/cm^2 で波面と加力点間のせん断ひびわれ発生、 $\tau_{DT} = 20 \sim 28$ kg/cm^2 であり中段近傍から同じく加力点に向かってせん断ひびわれが発生することにより、波面と加力点間に斜めのストラットが形成され、さらに強度は増大し、水平主筋の降伏 (τ_y), 波形凸部間を亘るひびわれ (τ_{SA}), さらにストラット根元のコンクリート圧壊 (τ_{SC}) によって最大せん断耐力 ($\tau_{max} = 35 \sim 53$ kg/cm^2 ,

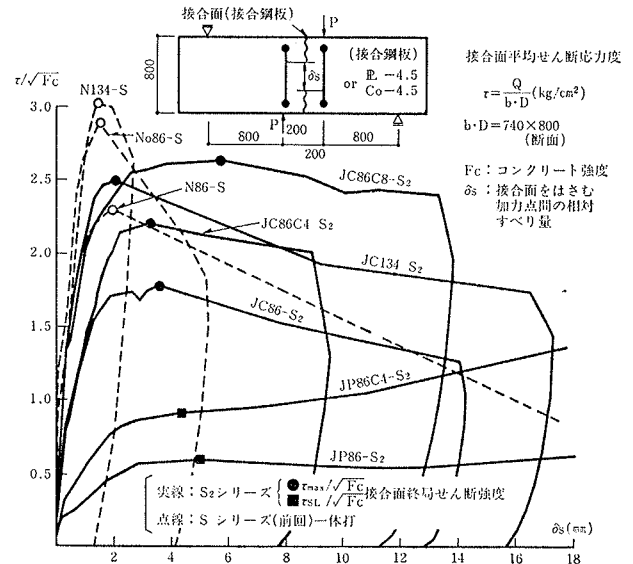


図-2 接合面平均せん断応力度

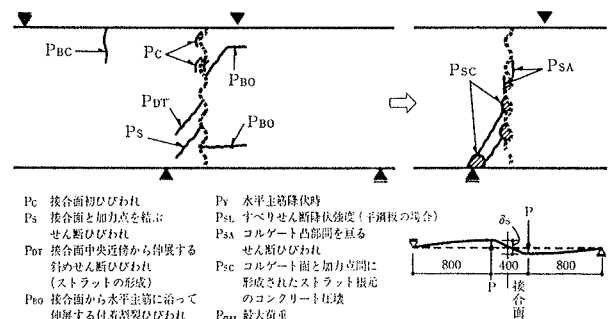


図-3 ひびわれ強度の分類と記号

δ_s (は約 3 mm 前後) が示された。

$\tau \sim \delta_s$ 曲線は、JC86-S₂, JC86C4-S₂ はストラット形成後に若干剛性低下がみられた。一方、JC134-S₂, JC86C8-S₂ は一体打りよりやや緩慢な曲線勾配を示すものの、顕著な剛性低下はなく、波形鋼板でも接合鉄筋比に影響されることがわかった。

試験体	接合鉄筋比 P_s or P_{ST}	P_{ST}/P_s	τ (kg/cm ²) δ_s (mm)	接合面 ひびわれ		接合面と面 外せん断ひび われ	接合面中央 近傍から伸 展する斜め せん断ひび われ (ストランド)	すべりせん 断降伏強度	引断降伏時	接合面から 水平主筋に 沿って発生 する付着割 れひびわれ	コルゲート 内部間を越 えるせん断 ひびわれ	コルゲート 面と加力点 間に形成さ れたストラ ットのコン クリート圧	最大荷重	P_{ST}/σ_s (kg/cm ²)
				C	S									
JP86-S ₂	0.86	0	τ	2.0	4.7	—	—	11.5	10.8	16.9	—	—	23.0	31.6
JC86-S ₂			δ_s	0.030	0.603	—	—	—	5.00	2.90	27.20	—	—	
JP86C4-S ₂	1.39	1.6	τ	6.1	10.1	20.3	—	—	31.1	33.8	34.5	34.5	35.1	49.4
			JC86C4-S ₂	δ_s	0.095	0.180	0.62	—	—	1.40	1.88	2.70	2.70	
JC86C8-S ₂	1.93	2.2	τ	5.5	8.1	32.3	17.6	—	16.9	28.2	—	—	32.3	67.2
			JC86C8-S ₂	δ_s	0.230	0.611	28.01	4.35	3.09	20.27	—	—	—	
JC134-S ₂	1.34	0	τ	5.4	12.2	25.0	—	—	39.3	—	43.2	43.2	43.2	44.5
			JC134-S ₂	δ_s	0.060	0.176	0.846	—	—	1.95	—	3.29	3.29	
JP86-S ₂	0.86	0	τ	6.9	17.2	39.2	—	—	48.8	—	47.3	51.1	52.7	67.2
			JC86C8-S ₂	δ_s	0.035	0.156	0.983	—	—	2.19	—	1.94	2.62	
JP86-S ₂	0.86	0	τ	6.8	18.2	18.9	—	—	43.2	—	26.4	49.9	49.9	44.5
			JC134-S ₂	δ_s	0.050	0.180	0.200	—	—	1.07	—	0.374	2.07	

注) P_s = 全水平主筋断面積 / 接合全断面積
 P_{ST} = シャーコネクターも含む全水平主筋断面積 / 接合全断面積
 接合全断面積 $b \cdot D = 74 \times 80$ (cm)
 86... $P_s = 0.86\%$
 134... $P_s = 1.34\%$
 τ : 接合面平均せん断応力 $\tau = Q/b \cdot D$ (kg/cm²)
 δ_s : 接合面から左右 20cm 離れた点間の相対すべり変位 (mm)

3.2. 諸強度

前節に述べた各ひびわれ強度等諸強度一覧表を表-4 に示す。J. BOX の接合面の平鋼板を波形鋼板に換えることにより、接合面終局平均せん断強度は、JC86-S₂ が JP86-S₂ の 3 倍、JC86C4-S₂ が JP86C4-S₂ の 2.4 倍に増大した。ここに、接合面終局平均せん断強度とは、平鋼板では、面外せん断のすべりせん断降伏強度 ($\tau_{SL} = Q_{SL}/bD$) で、波形鋼板では接合面の最大せん断破壊耐力 $\tau_{max} = Q_{max}/bD$ で、両者の変位には大した差はない。さらに、波型の τ_{max} は一体打りに比べ、 $P_{ST} = 0.86\%$, $1.34 \sim 1.93\%$ で 26%, $13 \sim 27\%$ の低下がみられた。

3.3. 鉄筋の歪度

図-4 に鉄筋の $\tau \sim \epsilon$ 曲線の一例を示す。接合面から 2cm 離れた位置で鉄筋両面に張付したゲージの歪性状は、平鋼板と波形鋼板とでは全く異なった。

平鋼板の場合：両試験体は、水平主筋・シャコネクター共に初期荷重レベルから接合面における鉄筋両面に貼付した歪度はほぼ左右対称に展開して、同性状であった。これは前報の S シリーズと同等である。

波形鋼板の場合：接合面における鉄筋両面の歪度の性状について平鋼板と比較して示すと以下のようなになった。

- (1) 平鋼板のよう初期から両面ゲージがほぼ左右対称に展開せず、両面とも引張歪となって伸展した。
- (2) シャコネクターに比べ水平主筋の方が歪度の伸展状況が大きい。シャコネクターの両面の歪の伸展は顕著でなく、接合面破壊時直前で急激にその効果がうかがわれた。

(3) 水平主筋は曲げ降伏したものとしなくてもよかった。一方、シャコネクターは τ_{max} 時では未降伏であ

表-4 諸強度一覧表 (実験結果)

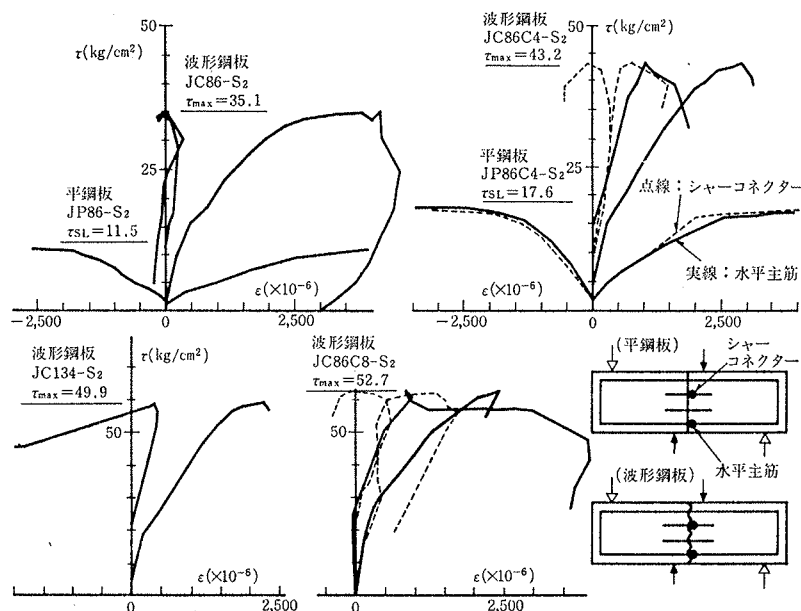


図-4 接合面における鉄筋の歪度 ($\tau \sim \epsilon$ 曲線)

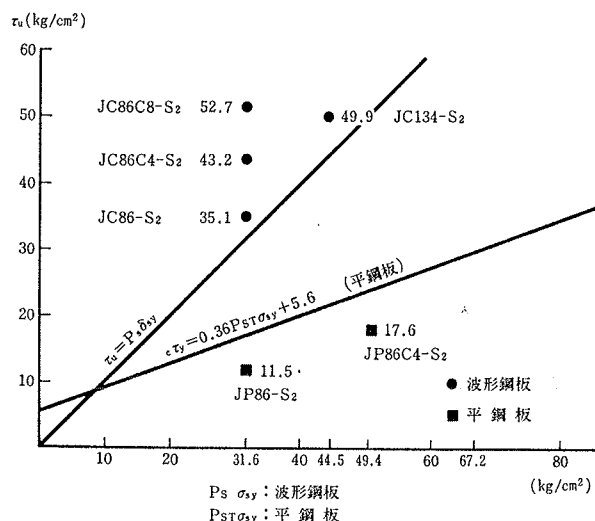


図-5 接合面終局せん断強度実験式 (S, S₂ シリーズの比較)

った。

以上、歪特性・破壊性状から平鋼板と波形鋼板との破壊機構は全く異なるといえよう。

3.4. 接合面終局せん断強度実験式

前報²⁾で面外・面内せん断実験結果を併合して、鉛直継手壁体の接合面終局せん断強度実験式

$$\tau_u = 0.36 P_{ST} \sigma_{sy} + 5.6 \text{ (kg/cm}^2\text{)}: \text{平鋼板}$$

を示した。これは Chang の式を用いて誘導した。今回の平鋼板の2体 (JP86-S₂, JP86C4-S₂) は実験式よりやや低い値を示した。

本報の接合面を波形鋼板とした4体は、平鋼板と破壊機構が異なり、直接 Chang の式を用いるのには問題がある。また、シャコネクターの効果も異なるため、シャコネクターを無視した接合鉄筋比 P_s (全水平主筋の対全断面積比) を使用し、 $\tau_u \sim P_s \sigma_{sy}$ 関係図に示すと図-5 のようになる。実験値は、 $\tau_u = P_s \sigma_{sy}$ 直線式より若干大きい。なお、JC86-S₂ にシャコネクター4本追加の JC86C4-S₂, 8本追加の JC86C8-S₂ は $\tau_u = 35.1 \text{ kg/cm}^2$ から 43.2, 52.7 kg/cm² と増大したのはシャコネクターの効果といえよう。

ここで、シャコネクターの実測の軸歪からせん断摩擦理論を適応して求めたせん断抵抗がシャコネクターの増分量にほぼ比例した。即ち、波形鋼板においても、平鋼板の場合の接合面せん断耐力増分に対し、シャコネクターの効き方が接合面せん断破壊時ではほぼ同程度であった。

3.5. 既往の接合面せん断耐力式との比較

以下に示す既往の接合面せん断耐力式の一部と本報の実験値とを比較して、 $\tau_u \sim P_s \sigma_{sy}$ 関係図を図-6 に示す。

- ① 小畠³⁾ $\tau_{jy} = 0.4 P_s \sigma_{sy} + 13.5$ (普通コンクリートで歯型の鋼板による打継面)
- ② ACI318-83⁴⁾ (せん断摩擦理論)
 - $\tau_u = 1.0 P_s \sigma_{sy}$ (普通コンクリートで目荒しをした打継面)
 - $\tau_u = 0.6 P_s \sigma_{sy}$ (普通コンクリートで目荒しなしの打継面)
- ③ Mattock
 - $\tau_u = 0.8 P_s \sigma_{sy} + 28^{5)}$ ($\leq 0.3 F_c$, $P_s \sigma_{sy} \geq 14 \text{ kg/cm}^2$) (普通コンクリートで初期ひびわれのある接合面)
 - $\tau_u = 0.8 P_s \sigma_{sy} + 14^{6)}$ ($\leq 0.2 F_c$, ≤ 56 , $P_s \sigma_{sy} \geq 14 \text{ kg/cm}^2$) (軽量コンクリートで初期ひびわれのある接合面)

図に示すように、本報の安定液中に24時間浸漬した後、安定液中でコンクリート打設した場合でも、接合面が波形鋼板の場合は平鋼板と異なり、せん断強度は大幅に向上することが確認された。

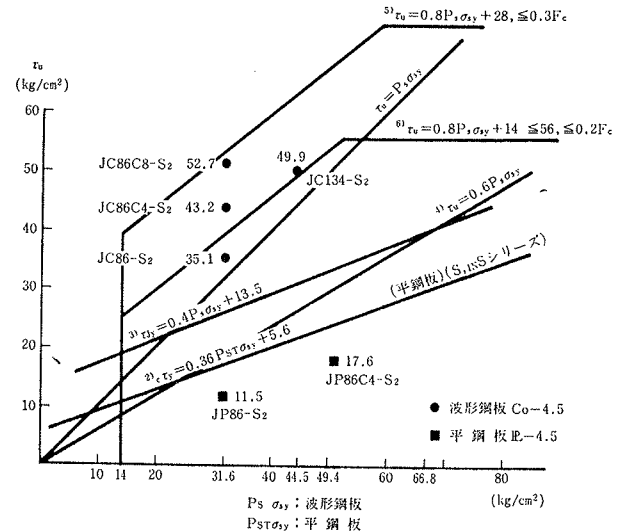


図-6 本工法の実験式と既往の接合面せん断耐力式との比較

4. 結び

前報^{1), 2)}のせん断実験シリーズの接合面に使用した平鋼板を波形鋼板に換え、その両者を比較した結果、歪性状・ひびわれ性状から判断して、平鋼板と波形鋼板との接合面におけるせん断伝達機構が非常に異なっていることがわかった。連壁鉛直継手の接合鋼板に波形鋼板を使用することにより、強度・剛性ともにその構造性能が大きく向上することが認められた。

なお、本研究の試験体製作に当り、吉田 直氏(土木設計部)および加藤登美男氏(特殊工法部)の御協力を得ました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 武田, 入沢, 大内, 佐藤: 鉛直継手による地中壁の一体化に関する実験的研究(その1), 一面外加力のせん断, 曲げせん断, 純曲げの実験一, 大林組技術研究所報, No. 21, (1980), pp. 47~60
- 2) 武田, 入沢: 同上題目(その2), 一面内加力の曲げせん断実験一, 同所報, No. 26, (1983), pp. 31~37
- 3) 武田, 小畠: 地中連続壁の地下本体構造としての利用, コンクリート工学, Vol. 13, No. 2, (Feb. 1975) pp. 12~21
- 4) ACI318-83
- 5) A. H. Mattock, Shear Transfer in Concrete Having Reinforcement at an Angle to the Shear Plane Publication SP-42 Shear in Reinforced Concrete ACI, (1974), pp. 17~42
- 6) A. H. Mattock, N. M. Hawkins: Shear Transfer in Reinforced Concrete-Recent Research, PCI Jour., (Mar.-Apr. 1972)