

地中連続壁に用いるジベル継手のせん断伝達特性

Shear Stress Transmission of Underground Diaphragm Wall Joints Using Perfobond Strips

引 田 真規子 宮 田 章
佐 野 公 俊¹⁾ 西 村 康 一²⁾

要 約

地中連続壁を耐震壁や地下外壁として利用する場合、せん断力を伝達可能な壁間継手で壁体同士を連結する。これまで壁間継手として用いられてきた水平筋重ね継手に加えて、孔あき鋼板ジベルを仕切板に溶接する施工性の良いジベル継手を開発した。孔あき鋼板ジベルは土木分野において鋼とコンクリートの接合部でずれ止めとして使われており、耐力評価式が提案されているが、鉄筋コンクリート壁同士を連結する壁間継手とはせん断伝達機構が異なることから、要素実験及び縮小壁体模型の面内せん断加力実験により耐力評価式の適用性を検討した。ジベル継手で連結した鉄筋コンクリート壁連結部の要素実験では、ずれ変位 5mm 程度までは耐力低下しないこと、土木耐力評価式でせん断降伏耐力を安全側に評価できることなどを明らかにした。また、ジベル継手を有する 1/2 縮尺の地中連続壁試験体を用いた面内せん断加力実験より、孔あき鋼板降伏時の変位状況、並びに従来継手との併用においては耐力累加が可能であることなどを確認した。

目 次

- I. はじめに
- II. 壁間継手の概要
- III. 継手の要素実験
- IV. 縮小壁体模型の面内せん断加力実験
- V. まとめ

I. はじめに

地中連続壁（連壁）は地中に造成する鉄筋コンクリート壁（RC 壁）で、矩形平面の壁体を連続して造成することで大断面の壁を構築でき、掘削工事における山留め壁、地下耐震壁や基礎杭として用いられる¹⁾。当社の建築用連壁工法である鹿島式地下連続壁工法（KCC 工法）では、連壁を地下外壁や地下耐震壁として利用する場合、せん断力を伝達可能な壁間継手で壁体を連結する。従来から、鉄筋を利用した継手（水平筋重ね継手²⁾）が壁間継手として用いられてきたが、施工時に鉄筋定着分のスペースや鉄筋保持のための仮設材が必要であり、現場での組立作業が煩雑な点が課題となっていた。そこで、筆者らは孔あき鋼板ジベルを仕切板の両面に溶接する施工性の良いジベル継手を開発した。孔あき鋼板ジベルは、

主に土木分野において鋼とコンクリートの接合部でずれ止めとして使われており、耐力評価式が提案されている³⁾。近年では建築分野でも鋼とコンクリートの機械式ずれ止めとしての適用を目指した検討が行われているが^{例えば 4) 5)}、応力伝達する接合部が狭小なため、大断面の RC 壁同士を連結する壁間継手とはせん断伝達機構が異なると考えられる。本報では、ジベル継手の要素実験並びに縮小壁体模型を用いた面内せん断実験に基づいてジベル継手のせん断伝達特性を評価し、土木の耐力評価式³⁾の適用性について検討した。

II. 壁間継手の概要

壁間継手を Fig.1 に示す。従来から用いられてきた水平筋重ね継手（Fig.1(a)）は、隣り合うパネルの境界に設置する仕切板に孔をあけ、水平筋やシアコネクタといった鉄筋を通すことで RC 壁同士を連結しており、鉄筋のダウエル作用によりせん断力を伝達する。水平筋はパネル区間全長にわたり配筋し、RC 壁体のせん断力を伝達する。仕切板位置の伝達せん断力が不足する場合には、仕切板にシアコネクタを配筋する。これに対し今般開発したジベル継手は、仕切板の両面に孔あき鋼板を溶接するだけの施工性に優れた継手である

1) 建築設計本部 Architectural Design Division
2) 東京建築支店 Tokyo Architectural Construction Branch

キーワード： 地中連続壁，継手，水平鉄筋，孔あき鋼板ジベル，せん断実験

Keywords： underground diaphragm wall, joint, horizontal rebar, perfobond strip, shear test

(Fig.1(b))。鋼板の孔（ジベル孔）に充填されたコンクリートがせん断力に抵抗し応力伝達する。ジベル孔内に貫通鉄筋を配筋することもあり、この場合には充填コンクリートに加えこの貫通鉄筋もせん断力伝達に寄与する。

Ⅲ. 継手の要素実験

1. 目的

文献 3) に示される孔あき鋼板ジベルの耐力評価式の適用性を検討するため、ジベル継手で連結した RC 壁連結部の要素実験を実施した。要素実験では従来継手である水平筋重ね継手との併用による効果についてもあわせて検討した。

2. 試験体および加力方法

試験体図を Fig.2 に、実験ケースを Table 1 に示す。試験体は E1～E3 の 3 体で、いずれも幅×高さ×長さ＝500×700×1200mm、縮尺約 1/3 の RC 壁で、長さ中央位置に孔あき鋼板ジベルを両面に溶接した仕切板を設置した。E1 は貫通鉄筋を配したジベル継手単独の標準試験体、E2 は水平筋重ね継手との併用効果確認試験体、E3 は水平筋重ね継手併用で貫通鉄筋のない試験体とした。水平筋は 6 段×2 本とし、その

うち仕切板を貫通するのは中央 2 段のみとした。仕切板を貫通する水平筋の鉄筋比 p_s は 0.145% である。孔あき鋼板の板厚と孔径は、孔内コンクリートの 2 面せん断破壊が生じるように設定した。ジベル孔数は試験対象とする試験側で 2、反対の支持側は 4 とし、試験側で最終状況に至るように計画した。なお、継手のせん断耐力のみを抽出できるように、試験側の仕切板とコンクリートの接触面にはスチレンボードを設置し付着を切った。

加力模式図を Fig.3 に示す。仕切板が水平になるよう試験体を 90 度回転させて水平スライドテーブル上に設置し、鉛直荷重をほぼ 0kN に制御した状態で仕切板位置の曲げモーメントが 0 になるよう水平方向に両振幅繰返し载荷を行い、試験体中央の壁間継手位置にせん断力を与えた。加力は仕切板から 50mm 離れた位置で計測したずれ変位 Δ で制御した。

3. 仕切板部のせん断耐力評価式

ジベル継手のせん断耐力 τ_p は式 (1) 及び式 (2) に示すように、土木学会で提示された評価式³⁾を仕切板面積 A_j で除して算定した。なお、水平筋重ね継手を併用する場合は、式 (4) に示す水平筋重ね継手のせん断耐力 τ_r ²⁾ とジベル継手

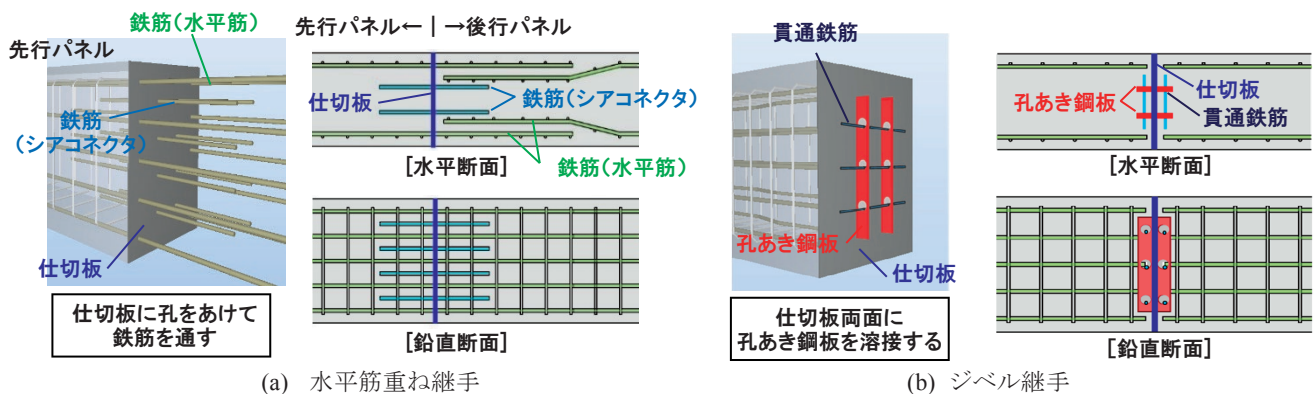


Fig.1 壁間継手
(Wall Joints)

Table 1 実験ケース
(Experiment Cases)

試験体名	E1	E2	E3
実験条件	ジベル継手単独 貫通鉄筋あり	継手併用 貫通鉄筋あり	継手併用 貫通鉄筋なし
仕切板	PL-500×700×6 mm(SS400)		
鉄筋	水平筋(貫通)	なし	4-D13 ($\sigma_y=384 \text{ N/mm}^2$)
	仕切板位置の鉄筋比 p_s	—	0.145%
	あばら筋	D16@150 ($\sigma_y=391 \text{ N/mm}^2$)	
ジベル	試験側	PL-400×60×6mm(SS400)	
	孔あき鋼板	ジベル孔：2-Φ35mm(@100)	
	貫通鉄筋	2-D6 ($\sigma_y=333 \text{ N/mm}^2$, $F_{st}=500 \text{ N/mm}^2$)	なし
コンクリート 圧縮強度	43.5 N/mm ²	40.8 N/mm ²	41.4 N/mm ²

σ_y : 降伏点, F_{st} : 引張強度

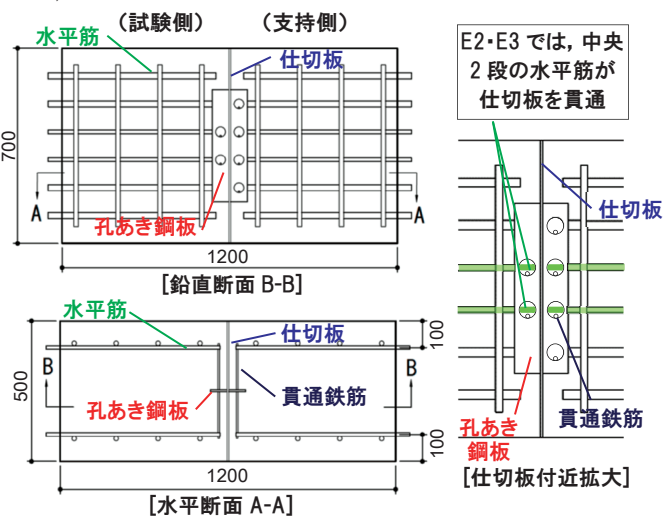


Fig.2 要素実験の試験体
(Specimen of Elemental Experiment)

のせん断耐力 τ_p を単純累加して、継手の総せん断耐力 τ_y を算定することとした（式（5））。

【ジベル継手，貫通鉄筋がない場合】

$$\tau_p = 1.60d^2 \times F_c / 1.3 \times n / A_j \quad \dots \dots \dots (1)$$

【ジベル継手，貫通鉄筋がある場合】

$$\tau_p = (1.85A - 26100) / 1.3 \times n / A_j \quad \dots \dots \dots (2)$$

$$A = \frac{\pi(d^2 - \Phi^2)}{4} F_c + \frac{\pi \Phi^2}{4} F_{st} \quad \dots \dots \dots (3)$$

【水平筋重ね継手】

$$\tau_r = 0.3P_r \cdot \sigma_{ry} \quad \dots \dots \dots (4)$$

【ジベル継手と水平筋重ね継手の併用】

$$\tau_y = \tau_p + \tau_r \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここで、 d ：ジベル孔径(mm)， F_c ：コンクリート圧縮強度(N/mm²)， n ：孔数， A_j ：仕切板面積(=3.5×10⁵ mm²)， F_{st} ：貫通鉄筋の引張強度(N/mm²)， Φ ：貫通鉄筋径(mm)， P_r ：水平筋の鉄筋比， σ_{ry} ：水平筋の降伏点(N/mm²)である。

式（1）及び式（2）に示す孔あき鋼板ジベルのせん断耐力 τ_p は、孔あき鋼板ジベルの押抜き実験等の平均耐力³⁾である。また、式（4）は仕切板を貫通する水平筋のせん断摩擦理論⁶⁾に基づく抵抗を評価したもので、既往の実験結果²⁾の下限に対応する。

4. 要素実験結果

（1）せん断応力—ずれ変位関係

せん断応力 τ (=せん断力/仕切板面積) とずれ変位 Δ の関係を Fig.4 に示す。ジベル継手単独のケースである E1 では、せん断応力 0.42N/mm²・ずれ変位 2.51mm で貫通鉄筋の降伏が確認されたが、その後のサイクルでも履歴形状は安定しており、5mm 程度までせん断応力は低下しなかった。また、E1 ではせん断降伏後のずれ変位 0mm 付近における τ - Δ 関係の接線勾配がほぼ 0 となったが、E2、E3 では勾配を有しており、これは水平筋の併用による効果と考えられる。E2 と E3 では τ - Δ 関係に有意な差は認められなかった。

継手部のせん断降伏応力 τ_e は、E1 では貫通鉄筋の降伏時応力と定義した。E2、E3 では最大せん断応力到達まで貫通

鉄筋・水平筋ともに降伏が確認されなかったため、最大せん断応力を τ_e とした。

（2）貫通鉄筋・水平筋の効果

各加力サイクルピーク応力時の貫通鉄筋及び水平筋のひずみを Fig.5 に示す。Fig.5(a)より、E1 は貫通鉄筋ひずみが初期サイクルで小さく、せん断応力が 0.3N/mm² 程度以降に増加している。これは、0.3N/mm² 付近でジベル孔内コンクリートのせん断ひび割れが発生し始めたためと推察する。また、Fig.5(b)より、水平筋ひずみは 0.3N/mm² 付近までは E2（貫通鉄筋あり）が大きい、それ以降は E3（貫通鉄筋なし）が大きくなった。これは、コンクリートのせん断ひび割れ発生開始により貫通鉄筋が抵抗し始め、水平筋の負担が減少したこと起因する。以上の推論より、貫通鉄筋は水平筋と同様のダウエル作用によるせん断抵抗が期待できると考えられる。

（3）実験結果と評価値の比較

各ケースのせん断降伏応力 τ_e と、式（5）によるせん断耐力の評価値 τ_y を Table 2 に示す。これより、全てのケースで τ_e は τ_y を大きく上回っており、耐力評価式はせん断降伏応力を安全側に評価できることを確認した。

IV. 縮小壁体模型の面内せん断加力実験

1. 試験体および加力方法

試験体は、Table 3 に示すように水平筋とジベル仕様をパラ

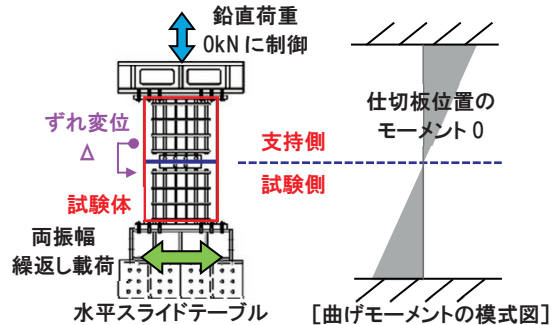
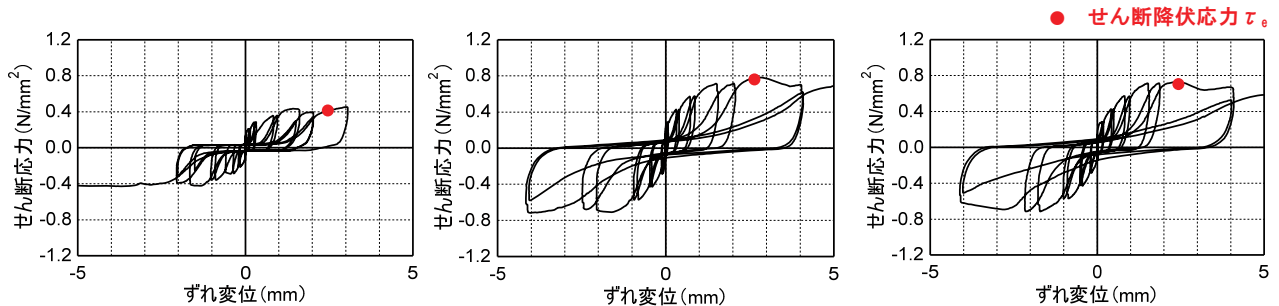


Fig.3 加力模式図
(Schematic Diagram of Loading)



(a) E1(ジベル継手単独，貫通鉄筋あり) (b) E2（継手併用，貫通鉄筋あり） (c) E3（継手併用，貫通鉄筋なし）

Fig.4 せん断応力とずれ変位の関係
(Relations between Shear Stress and Slip Displacement)

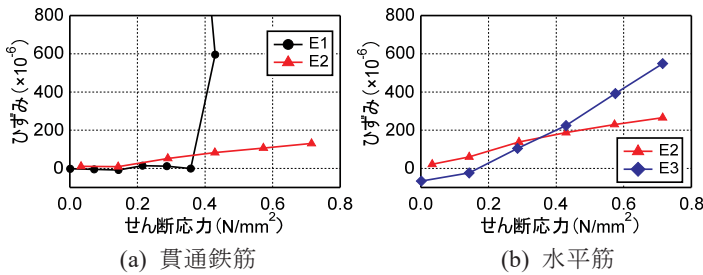


Fig.5 ピーク応力時の鉄筋ひずみ
(Rebar Strain at Peak Stress)

メータとした 5 体で、Fig.6 に示す壁間継手部を切り出した RC 梁型形状である。壁間継手はジベル継手と水平筋重ね継手を併用している。これは、後述する加力方法から仕切板近傍に作用する曲げに抵抗させる必要があったためである。

仕切板・孔あき鋼板の詳細を Fig.7 に示す。仕切板は、側面両側と底面をそれぞれ 5mm 大きく作って型枠に差し込み、位置を固定した。孔あき鋼板は仕切板に隅肉溶接した。P2 の孔あき鋼板は仕切板補強用仮設材を想定した L 形鋼とした。なお、全試験体でジベル孔の貫通鉄筋は使用していない。仕切板両面に厚さ 1mm のスチレンボードを貼り、仕切板とコンクリートとの付着を切った。コンクリート及び鋼材の材料試験結果を Table 4 に示す。

加力は、Fig.8 に示すように試験体端部 4 か所をピン接合し、仕切板近くの油圧ジャッキ 4 台のうち 2 台で圧縮力を正負交番繰返して、仕切板にせん断力を作用させた。加力サイクルは仕切板から 50mm 離れた位置で計測したずれ変位 Δ で制御した。

2. 面内せん断加力結果

(1) せん断応力とずれ変位の関係

せん断応力 τ (=せん断力/仕切板面積) とずれ変位 Δ の関係を Fig.9 に示す。全試験体とも $\Delta \approx 2\text{mm}$ で τ の増加が少なくなり、 $\Delta \approx 4\text{mm}$ で水平筋が引張降伏した。

試験体 P3, P4 では孔あき鋼板も孔間で降伏したが、仕切板部が大きくずれた ($\Delta > 10\text{mm}$) 後であった。P1 はその後の加力で τ が再び増加し、油圧ジャッキや計測機器の限界まで加力した (Fig.9(a))。その他の試験体も同様の挙動を呈した。以上の結果から、仕切板部のせん断降伏応力 τ_e を水平筋

Table 2 実験結果と評価値
(Experimental Results and Evaluation Stress)

試験体			E1	E2	E3
実験 結果	せん断降伏応力 τ_e	N/mm ²	0.42	0.78	0.73
	ずれ変位 Δ	mm	2.51	2.78	2.30
評価 値	水平筋 τ_r	N/mm ²	—	0.17	0.17
	ジベル τ_p	N/mm ²	0.29	0.27	0.36
	合計 τ_y	N/mm ²	0.29	0.44	0.53
τ_e/τ_y			1.45	1.77	1.38

の降伏時と定義した。P1 と P2 はせん断降伏応力までの履歴がほぼ同様となった。これより、L 形鋼に孔をあけた場合もジベルとして適用可能と考えることができる。

(2) せん断降伏応力の評価

せん断降伏応力 τ_e 、水平筋・ジベル鋼板降伏時の τ と Δ 、及び前述した式 (1) ~ (5) に基づき算定したせん断耐力 τ_y を Table 5 に示す。実験結果と評価値の比 τ_e/τ_y は 0.90~1.10 であり、実験結果と評価値との対応関係は良い。なお、本試験体の重量は約 72kN であり、試験体設置時に試験体長さ中央の仕切板位置に作用する曲げモーメントが小さくなく、要素実験に比べ τ_e/τ_y が低くなったと推察する。また、式 (5) に示す加算が成立した理由としては、水平筋降伏時のずれ変位 Δ が 4mm 程度であったことから、孔あき鋼板ジベルのせん断耐力に達し、かつ耐力を維持している状態にあったためと考えられる。

Table 3 実験ケース
(Experiment Cases)

試験体名	P1	P2	P3	P4	P5
仕切板	PL-760×1005×6mm (SS400)				
水平筋 (鉄筋比ps)	10-D25 (0.676%)		10-D29 (0.857%)	10-D25 (0.676%)	
孔あき 鋼板	先行パネル	PL-6 (SS400)	L-65×65×6 (SS400)	PL-6 (SS400)	
	後行パネル	PL-6 (SS400)	PL-6 (SS400)		
ジベル 孔	孔径・間隔 (mm)	$\Phi 35@100$		$\Phi 45@150$	$\Phi 35@150$
	孔数	14		10	

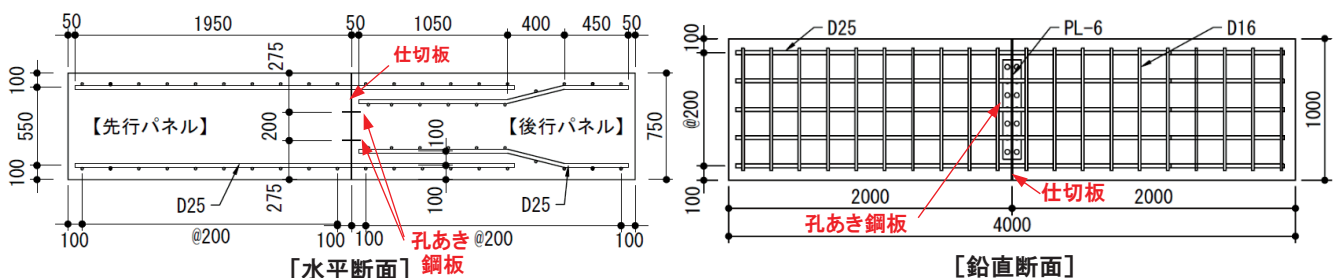


Fig.6 面内せん断加力実験の試験体
(Specimen of Shear Loading Test)

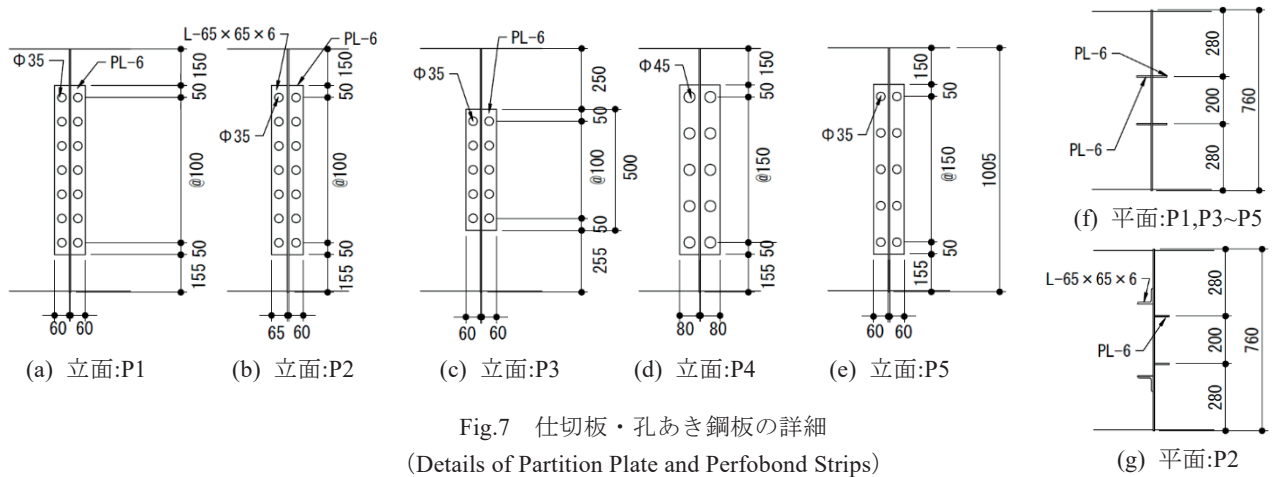


Fig.7 仕切板・孔あき鋼板の詳細
(Details of Partition Plate and Perforated Strips)

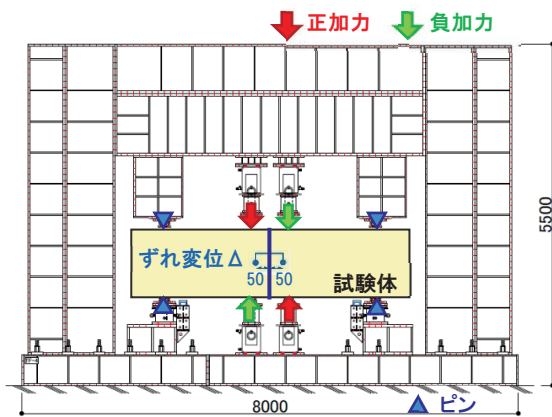


Fig.8 加力方法
(Loading System)

Table 4 材料試験結果
(Material Test Results)

(a) コンクリート

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング率 (kN/mm ²)
P1	30.9	28.5
P2	34.5	28.0
P3	37.7	29.5
P4	34.2	29.5
P5	34.5	28.7

(b) 鋼材

鋼材	降伏点 (N/mm ²)	ヤング率 (kN/mm ²)	降伏ひずみ ($\times 10^{-6}$)
D29	440	186.9	2354
D25	400	187.7	2133
D16	368	179.6	2049
PL-6	272	192.3	1414
L-65×65×6	344	206.9	1662

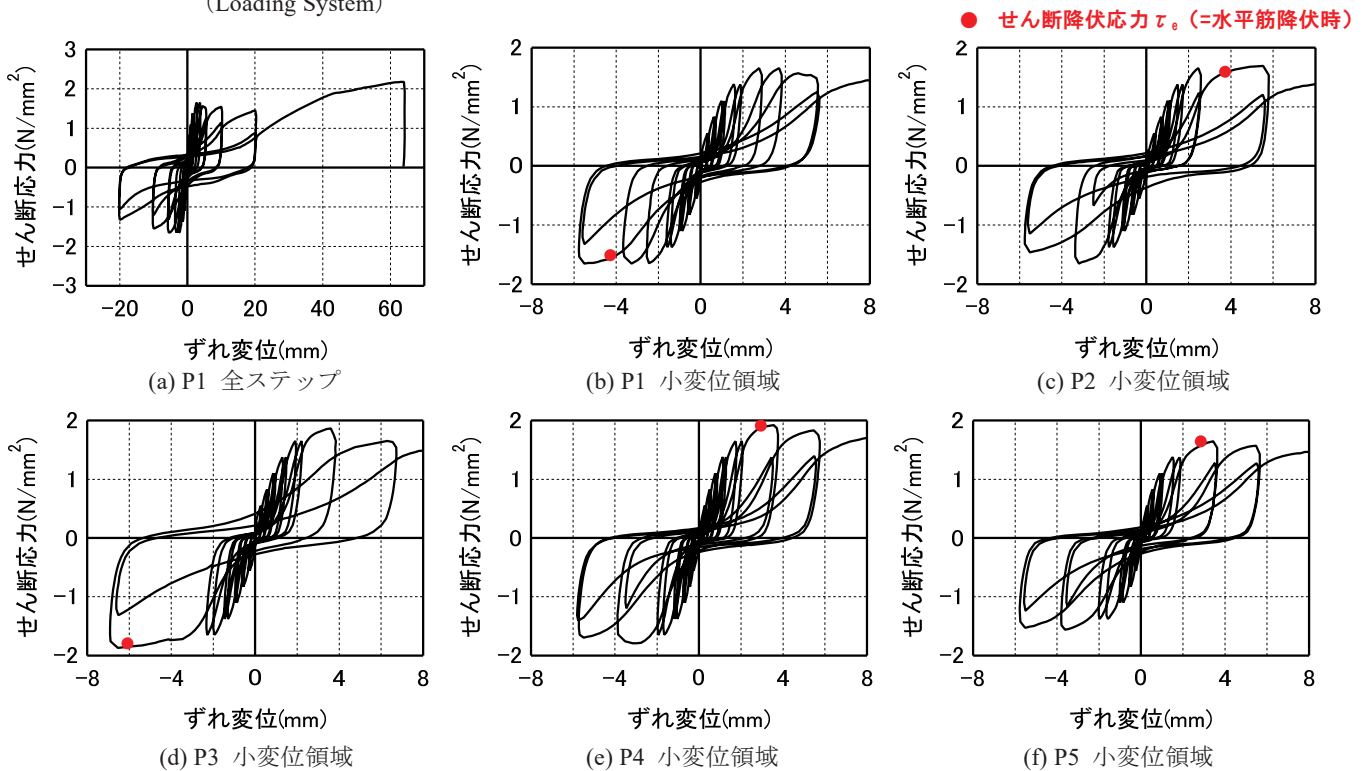


Fig.9 せん断応力とずれ変位の関係
(Relations between Shear Stress and Slip Displacement)

Table 5 実験結果と評価値
(Experimental Results and Evaluation Stress)

試験体		P1		P2		P3		P4		P5	
		応力度 (N/mm ²)	ずれ変位 (mm)	応力度 (N/mm ²)	ずれ変位 (mm)	応力度 (N/mm ²)	ずれ変位 (mm)	応力度 (N/mm ²)	ずれ変位 (mm)	応力度 (N/mm ²)	ずれ変位 (mm)
実験 結果	せん断降伏応力 τ_e (= 水平筋降伏時)	1.57	4.30	1.60	3.91	1.85	5.92	1.92	3.55	1.65	3.43
	ジベル鋼板降伏	(降伏せず)		(降伏せず)		1.94	42.02	1.07	13.62	(降伏せず)	
	最大せん断応力	2.17	64.01	1.66	41.01	2.87	71.01	2.20	75.01	2.56	53.49
評 価 値	水平筋降伏	0.81		0.81		1.13		0.81		0.81	
	ジベル耐力	0.87		0.97		0.76		1.14		0.69	
	合計 τ_y	1.68		1.78		1.89		1.95		1.50	
	τ_e / τ_y	0.93		0.90		0.98		0.99		1.10	

V. まとめ

地中連続壁に用いるジベル継手のせん断応力伝達特性評価のため、既往耐力評価式の適用性や従来継手との併用における耐力累加の妥当性を検討した。以下に知見を記す。

- ・ ジベル継手単体の要素実験では、貫通鉄筋の降伏後も履歴形状は安定しており、ずれ変位 5mm 程度までほぼ一定の耐力を維持できることを確認した。
- ・ ジベル継手のせん断降伏応力は土木の既往せん断耐力式で評価することができる。また、水平筋重ね継手と併用した場合のせん断降伏応力は、各々の継手せん断耐力を単純累加した値と概ね対応した。
- ・ ジベルの貫通鉄筋は、水平筋と同様のダウエル効果によるせん断応力伝達性能を有している。
- ・ L 形鋼などの仕切板補強用仮設材にウェブに孔をあけることで、ジベル鋼板として適用可能である。

参考文献

- 1) 地中連続壁協会；地中連続壁工法 施工指針（案），2014.
- 2) 引田真規子ほか；地中連続壁に用いる水平筋重ね継手の特性評価，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 I，2019.9，pp. 453-454.
- 3) 土木学会；2014 年度制定複合構造標準示方書，2014.
- 4) 福元敏之；拘束応力を考慮した孔あき鋼板ジベルの終局せん断耐力，日本建築学会構造系論文集，第 81 巻第 722 号，2016.4，pp. 803-812.
- 5) 福元敏之；摩擦・付着を考慮した拘束応力化に於ける孔あき鋼板ジベルの終局せん断耐力，日本建築学会構造系論文集，第 82 巻第 742 号，2017.12，pp. 1935-1944.
- 6) 日本建築学会；現場打ち同等型プレキャスト鉄筋コンクリート構造設計指針（案）・同解説，2002.10.

Shear Stress Transmission of Underground Diaphragm Wall Joints Using Perfobond Strips

Makiko Hikita, Akira Miyata, Kimitoshi Sano¹⁾ and Koichi Nishimura²⁾

Underground diaphragm walls are reinforced concrete walls that are continuously constructed underground. When using them as earthquake-resistant walls, each wall is connected with joints that can transfer shear stress. We have developed a perfobond strip joint that has good workability by welding perforated steel plates to the partition plate. Perfobond strips have long been used in civil engineering structures to prevent slip at the joint between steel and concrete, and a proof evaluation formula has been proposed. However, the shear transfer characteristics are different from those when connecting concrete walls. Therefore, we conducted experiments and examined the proof stress evaluation. From basic experiments, the following results were obtained. Firstly, the yield strength does not decrease up to slip displacement of about 5 mm. Secondly, the shear yield strength can be evaluated using the conventional civil engineering evaluation formula. In addition, we confirmed the yielding status of perfobond strips from the shear loading test of a half-scale concrete wall. From the above, we found that the perfobond strip joint can sufficiently transmit shear stress.