

地中壁と後打ち壁からなる合成壁の設計法に関する研究（その4）

——合成壁接合部の許容せん断応力度と地中壁洗浄処理面の品質管理方法——

古屋 則之 菊地 利武
津田 和明 小嶋 克朗

Study of Design Method on RC-RC Composite Walls Made of Underground Diaphragm Walls and Inner Walls (Part 4)

——Allowable Unit Stress for Shearing at Joints of Composite Walls and a Control Method
for Quality of Joint Surface Washed by Water Jets——

Noriyuki Furuya Toshitake Kikuchi
Kazuaki Tsuda Yoshiro Kobatake

Abstract

This study is for establishing a design method in the case of using underground diaphragm walls as structural walls in the form of composite walls made by joining together with inner walls for the purpose of making more rational use of underground diaphragm walls. This report discusses the allowable unit stress for shearing at a joint and a control method for the quality of a joint surface washed by water jets. Direct shear tests were carried out to determine the shear strength of the joint and expressions of the allowable unit stress for shearing taking in the effects of tie bars across the joints and normal pressure on the joints were derived. Regarding the quality control method for the washed joint surfaces, a way to judge the degree of washing based on the tensile strength of the surface concrete was studied and is proposed here.

概 要

この研究は、地中連続壁のより合理的な活用方法として、地中連続壁の内面に後打ち壁を打継いで構築した合成壁を、地下外壁として利用する場合の、設計法を確立することを目的としたものである。この報告では、地中連続壁と後打ち壁との接合部における許容せん断応力度と、ウォータージェットで洗浄処理した地中壁面の品質管理方法について述べている。接合部の許容せん断応力度については、接合部に関する直接せん断実験を実施し、接合鉄筋と、接合面に作用する面圧との影響を考慮した許容せん断応力度式を導いた。洗浄処理面の品質管理については、表層部分のコンクリートの引張強度から洗浄度を判定する方法を検討し、提案した。

1. 序

この研究は、仮設山留め壁や耐震壁、基礎杭などとして用いられる地中連続壁（以下、地中壁と称す）のより合理的な利用技術の確立と利用分野の拡大を計るために、地中壁の内面に後打ち壁を打継いで構築した合成壁を、土圧・水圧と地震時水平力を負担する地下外壁として利用する場合の、設計法を確立することを目的としたものである。

既報の研究^{1)~3)}から、合成壁としての一体性を確保するためには、地中壁面をウォータージェットで洗浄処理するだけで十分であるが、より一体性を保証するためには、洗浄処理とともに接合鉄筋も配筋するようにして、接合部を設計しておく必要があると考えられる。

合成壁の接合法としては、図-1に示すような、①曲げ加工した接合鉄筋をあらかじめ地中壁側に埋設しておき、これを曲げ戻して使用する方法（以下、鉄筋埋込み工法と称す）と、②地中壁表面に埋設した定着筋付きの鋼材にスタッドを溶接してこれを接合鉄筋として用いる方法（以下、スタッド溶接工法と称す）の2種類を対象とする。

この報告は、これらの接合法で一体化された合成壁を設計する場合の接合部の許容せん断応力度の検討結果と、洗浄処理面の品質管理方法の検討結果について述べたものである。

許容せん断応力度は、鉄筋埋込み工法については接合部の直接せん断実験を行ない、スタッド溶接工法については既報の直接せん断実験結果⁴⁾⁵⁾を用いて検討した。

2. 接合部のせん断強度と許容せん断応力度

2.1. 鉄筋埋込み工法による接合部の直接せん断実験

2.1.1. 実験概要

(1) 試験体 試験体の形状・寸法および接合鉄筋の配置例を図-2に、試験体の一覧を表-1に示す。

試験体は、接合鉄筋比 $p_s (= a_s/A_o)$ 、 a_s : 接合鉄筋の全断面積、 A_o : 接合面面積) と面圧 σ_o (外力によって接合面に作用する垂直応力度 $= N/A_o$ 、 N : 圧縮力) をパラメータとする模型試験体12体と、実物試験体4体である。

模型試験体は接合部を模擬した地上製作の試験体であり、せん断強度に及ぼす接合鉄筋量と面圧の効果を見るために、また、実物試験体は実際の地盤に構築した地中壁から切り出して製作した試験体であり、施工性の影響をみるためのものである。

模型試験体の先打ち部分は、底型枠上に砂利と土を敷き、泥水を数回散布した後、表面に形成された泥水膜が乾燥しない間にコンクリートを打設して製作した。接合鉄筋は、製作当初から接合面に直交するように配筋し、定着長は接合面からそれぞれ $20d$ (フックあり) とした。コンクリート硬化後には接合面をウォータージェット (水圧: 150 kg/cm^2) で洗浄して脆弱な部分を除去した。後打ちの部分のコンクリートは、先打ち部分の接合面が実際の地中壁と同様に鉛直になる向きで打設した。

実物試験体は、地中壁を切り出して先打ち部分として用い、折り曲げ加工して埋設しておいた接合鉄筋を研り出し、曲げ戻してから、模型試験体と同様の方法で製作した。

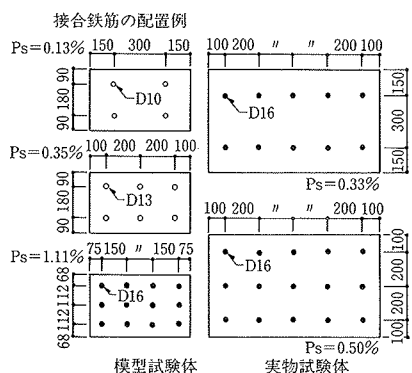


図-2 試験体の形状・寸法

接合鉄筋に使用した異形鉄筋と実験時のコンクリートの性質を表-2に示す。

鉄筋		降伏点 σ_y (kg/cm^2)	引張強度 σ_{max} (kg/cm^2)	弾性係数 E_s (10^6 kg/cm^2)
模型試験体	D10	3670	5180	1.94
	D13	3520	5080	1.90
	D16	3340	4840	1.91
実物試験体	D16	3770	5390	1.91

コンクリート		圧縮強度 F_c (kg/cm^2)	弾性係数 E_c (10^8 kg/cm^2)
模型試験体	先打ち部分	329	2.30
試験体	後打ち部分	290	2.08
実物試験体	先打ち部分	368	2.21
試験体	後打ち部分	279	2.24

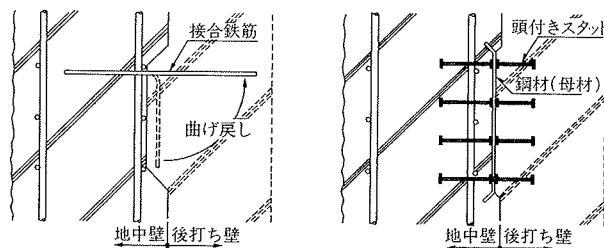
表-2 使用材料の性質

(2) 加力と測定方法 加力状況を写真-1に示す。加力は、鋼製治具を用いて、一面せん断形式で行ない、一方向の漸増繰返し载荷とした。

面圧は、設定した圧縮力をPC鋼棒を用いた自己バランス方式で作用させ、加力中も一定に保持した。

加力中は、接合面の相対すべりと、接合面から ld (d : 鉄筋径) 離れた位置での接合鉄筋のひずみを測定した。

2.1.2. 実験結果とその検討 実験結果を表-1に示す。



(1) 鉄筋埋込み工法 (2) スタッド溶接工法

図-1 合成壁の接合法

試験体	接合鉄筋比 P_s (%)	面圧 σ_o (kg/cm^2)	接合面 A_o (面積 $\cdot \text{cm}^2$)	付着切れ開始時* τ_b (kg/cm^2)	すべり破壊時 τ_s (kg/cm^2)
M0-0	0.00	0	地中壁 模擬面 (2160)	29.1	29.1
M0-5		5		32.5	37.8
M0-10		10		44.9	47.7
M0-20		20		52.8	60.4
M1-0	0.13	0		25.4	25.6
M4-0		5		26.9	27.8
M4-5		10		34.2	41.8
M4-10		20		49.1	50.0
M4-20	0.35	0		50.9	60.0
M7-0		5		26.4	35.9
M11-0		10		28.7	46.3
M11-10		20		45.5	60.7
R1-0	0.13	0	実物 地中壁面 (6000)	17.7	17.7
R3-0		5		18.7	21.0
R5-0		10		21.0	30.6
R9-0		20		20.7	45.7

(注) * 接合面の相対すべりが 0.02mm を越えた時の値

表-1 試験体一覧と実験結果

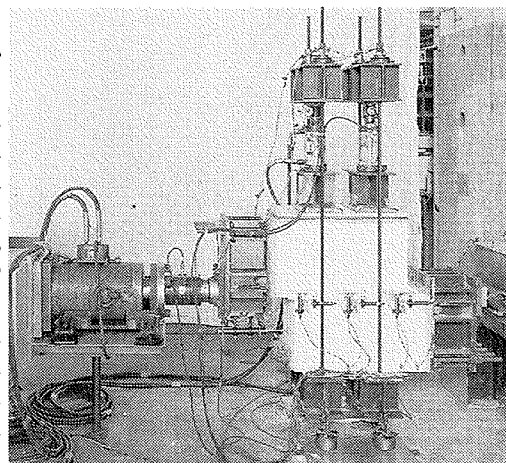


写真-1 加力方法

(1) 破壊経過 模型試験体から得られた荷重～接合面の相対すべり曲線の模式図を図-3に示す。

O～A区間ではほぼ弾性的な挙動を示し、A点を過ぎると接合面でコンクリート相互の付着が切れ始めてすべりが徐々に大きくなり、B点で接合面の全面にわたって付着が切れてすべり破壊し、荷重が低下した。すべり破壊後は、同図に示すように接合鉄筋比と面圧の大きさによって四つのタイプの破壊経過を示した。

(2) 付着切れ開始時のせん断応力度 模型試験体の結果から、付着切れ開始時のA点の平均せん断応力度 τ_b は、面圧のない試験体では接合鉄筋比に関係なくほぼ同じ値であり、平均 27.4 kg/cm^2 であった。面圧のある試験体では、面圧が大きくなるに従って τ_b は増大する傾向を示した。

実物試験体の τ_b も接合鉄筋比に関係なくほぼ同じ値となり、平均 19.5 kg/cm^2 であった。

(3) すべり破壊時のせん断応力度 模型試験体のすべり破壊 (B点) 直前に測定された接合鉄筋のひずみを軸ひずみと曲げひずみに分離して、両者の関係を図-4に示す。この時点のひずみは、軸ひずみ、曲げひずみ共に降伏ひずみに達しておらず、曲げひずみが軸ひずみに比べて若干小さめであるが、両者は、ほぼ同程度の値であった。これは、すべり破壊がせん断摩擦仮説⁶⁾で考えられているような、単に接合鉄筋の引張降伏によるのではなく、その前に局部的な曲げ引張降伏が先行することによって生じることを示唆していると考えられる。

図-5は、すべり破壊時に、接合鉄筋の軸引張応力{上記結果から $0.5 \sigma_y$ と仮定、 σ_y : 接合鉄筋の降伏応力度 (kg/cm^2)} に対応する圧縮反力 $p_s \cdot 0.5 \sigma_y$ が接合面に作用していた

と仮定し、すべり破壊時の平均せん断応力度 τ_s との関係を示したものである。同様に、 τ_s と面圧 σ_0 との関係を図-6に示す。 τ_s は接合面に作用する圧縮力の増加に伴って増大し、 τ_s と $p_s \cdot 0.5 \sigma_y$ および τ_s と σ_0 とはそれぞれ一次比例すると仮定して回帰分析した結果、(1)式と(2)式が得られた。

● 接合鉄筋量によるせん断強度評価式 (kg/cm^2)

$$\tau_s = 21 + 1.4 (p_s \cdot 0.5 \sigma_y) \quad \dots\dots\dots(1) \text{式}$$

● 面圧によるせん断強度評価式 (kg/cm^2)

$$\tau_s = 30 + 1.6 \sigma_0 \quad \dots\dots\dots(2) \text{式}$$

また、接合鉄筋と面圧とが付加された場合の τ_s に関しては、(1)式に、面圧による強度増分の $1.6 \sigma_0$ を累加した(3)式を用い、実験値と比較した結果を図-7に示す。実験値との対応から、すべり破壊時のせん断応力度は接合鉄筋と面圧との効果を累加することによって評価できると考えられる。

● 接合鉄筋量と面圧とによるせん断強度評価式 (kg/cm^2)

$$\tau_s = 21 + 1.4 (p_s \cdot 0.5 \sigma_y) + 1.6 \sigma_0 \quad \dots\dots\dots(3) \text{式}$$

実物試験体の τ_s と(3)式との対応を図-8に示す。接合鉄筋量が少ない領域では実験値が(3)式に比べて小さいが、全体的にはほぼ良い対応を示した。

$p_s = 0.13\%$ の試験体の τ_s は、付着切れ開始時の応力度

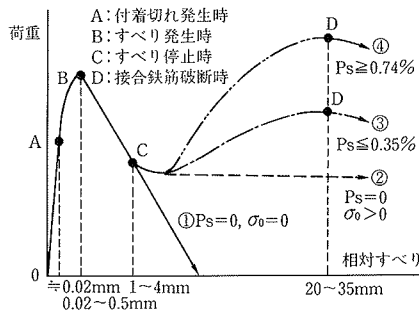


図-3 荷重～接合面の相対すべり曲線

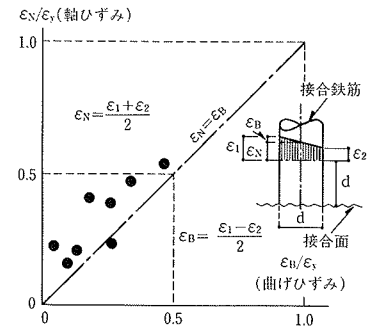


図-4 すべり破壊直前のひずみ

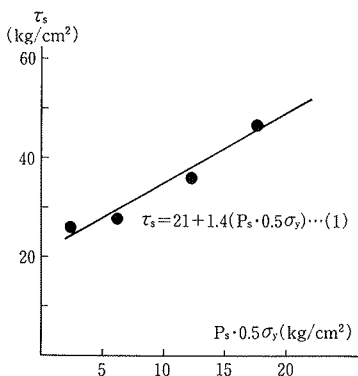


図-5 $\tau_s \sim p_s \cdot 0.5 \sigma_y$ 関係

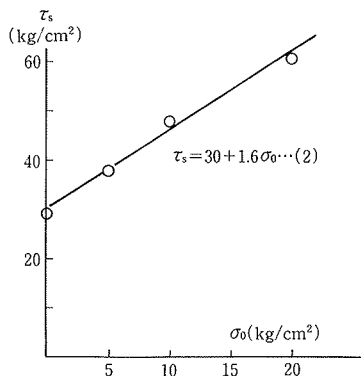


図-6 $\tau_s \sim \sigma_0$ 関係

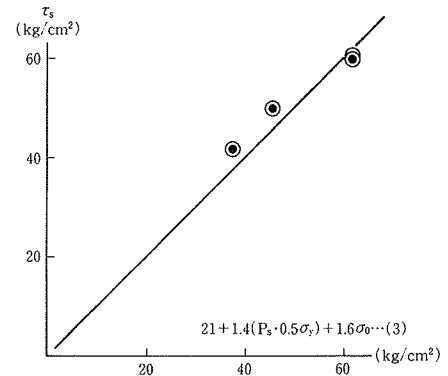


図-7 τ_s 評価式と実験結果との比較

τ_s とほとんど変わらないこと（表-1 参照）や、また、図-5、図-8 での $p_s=0.13\%$ の試験体の τ_s 実験値（図中、左端の点）が、他の試験体の実験結果の勾配と若干異なる位置にくることなどから、接合鉄筋比が小さい場合の τ_s は、接合鉄筋の有無にかかわらずコンクリート間の付着力に依存してほぼ一定になると考えられ、すべり破壊に対して接合鉄筋が効果を発揮するのは概ね0.2%以上の場合と考えられる。

2.2. 接合部の許容せん断応力度

許容せん断応力度は以下の方針に基づいて設定した。

(i) せん断強度式は、模型試験体のせん断強度評価式を準用して、実物試験体の実験結果の下限値を満足するように設定する。スタッド溶接工法に関するせん断強度式には、既往の評価式^{4,5)}を用いる。

(ii) 許容せん断応力度のせん断強度に対する安全率は、長期では3、短期では2とする。

2.2.1. せん断強度下限式 上記の方針に従って得られた、接合鉄筋の補強効果を考慮したせん断強度下限式は以下のとおりである。

- 鉄筋埋込み工法の場合（図-8 参照, kg/cm^2 ）

$$\tau_s = 12.3 + 1.4(p_s \cdot 0.5 \sigma_y) + 1.6 \sigma_0 \quad \dots\dots\dots(4)\text{式}$$

- スタッド溶接工法の場合（図-9 参照, kg/cm^2 ）

$$\tau_s = 4.6 + 0.78 p_s \cdot \sigma_y \quad \dots\dots\dots(5)\text{式}$$

コンクリートの付着力に依存するせん断強度の下限値としては、接合鉄筋比が0.2%未満の実物試験体の実験結果から、鉄筋埋込み工法の場合は $17.7 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 、スタッド溶接工法の場合は $16.7 \text{ kg}/\text{cm}^2$ ⁵⁾ が得られるが、工法が変わってもコンクリートの付着力に依存するせん断強度は変わらないはずであり、後者の値を採用する。

$$\tau_s = 16.7 \text{ kg}/\text{cm}^2 \quad \dots\dots\dots(6)\text{式}$$

2.2.2. 許容せん断応力度 接合鉄筋の補強効果を考慮した長期許容せん断応力度 $f_{s,t}$ （短期の場合は長期の1.5倍）を以下に示す。

- 鉄筋埋込み工法の場合 (kg/cm^2)

$$f_{s,t} = 4.1 + 0.23 p_s \cdot \sigma_y + 0.53 \sigma_0 \quad \dots\dots\dots(7)\text{式}$$

- スタッド溶接工法の場合 (kg/cm^2)

$$f_{s,t} = 1.5 + 0.26 p_s \cdot \sigma_y \quad \dots\dots\dots(8)\text{式}$$

ここに、 σ_y ：鉄筋またはスタッドの降伏応力度で、通常は短期許容引張応力度 (kg/cm^2) を用いる

接合鉄筋の補強効果を考慮した許容応力度式(7)、(8)式の適用範囲は、0.2

$\% \leq p_s \leq 1.1\%$ とする。これは、直接せん断実験での範囲が前者は0.13~1.11%、後者は0.13~0.9%であったことや、実験結果から、接合鉄筋の補強効果が現れるのは概ね0.2%以上の範囲であること、接合鉄筋の配筋密度として1.1%が限界であることなどを考慮したものである。

コンクリートの付着力に依存する長期許容せん断応力度 f_t （短期の場合は1.5倍）は以下のとおりである。

$$f_t = 5.5 \text{ kg}/\text{cm}^2 \quad \dots\dots\dots(9)\text{式}$$

3. 地中壁洗浄処理面の品質管理方法

ウォータージェットで洗浄処理を行なった地中壁面は、後打ちコンクリートとの一体化を計るために表面の脆弱なコンクリート層が除去されているように管理する必要がある。

ここでは、洗浄した面の表層部分のコンクリートの引張強度から洗浄度を管理することとし、引張強度管理値の値と、引張試験方法および管理方法について述べる。

3.1. 洗浄面の引張強度管理値

引張強度管理値は、①合成壁のコンクリートは設計基準強度が $F_c = 210 \sim 270 \text{ kg}/\text{cm}^2$ の範囲である、②合成壁は長期の面外方向せん断力に対してせん断ひびわれが発生しないように、壁の平均せん断応力度がコンクリートの長期許容せん断応力度 f_s ($F_c/40$ かつ $3.75 + F_c \cdot 3/400$) 以下となるように設計される、③ f_s は、せん断スパン比によって2倍の範囲で割り増しされる場合がある、ことなどを前提として以下のように定めた。

合成壁断面内のせん断応力度は壁厚の中央で最大となり、平均せん断応力度の1.5倍に相当する。従って、設計で想定される最大せん断応力度 τ は、

$$\tau = 1.5 \times 2 \times f_s$$

となる。

一方、主応力度 σ_1 、 σ_2 の大きさは、

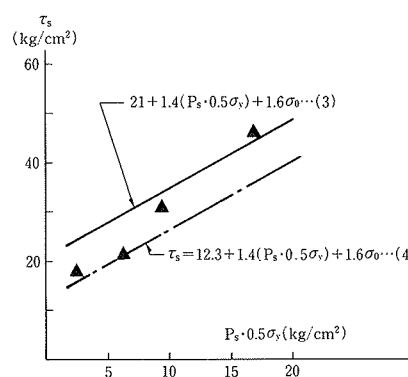


図-8 鉄筋埋込み工法による実物試験体の τ_s

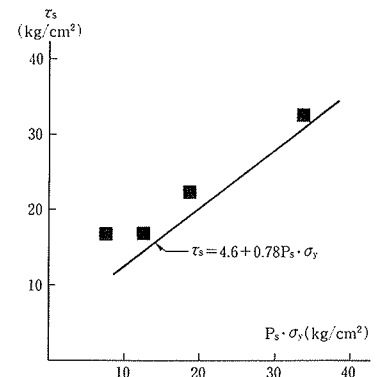


図-9 スタッド溶接工法による実物試験体の τ_s

$$\sigma_1, \sigma_2 = 1/2 \cdot \{(\sigma_x + \sigma_y) \pm \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau^2}\}$$

で表わされ、通常の曲げせん断部材の壁厚の中央では、

$$\sigma_1, \sigma_2 = \pm \tau (\because \sigma_x = \sigma_y = 0)$$

となる。この場合の主応力方向は、材軸に対して45°前後の方向である。

接合面は一般には主応力方向と一致しないために、接合面に垂直方向の応力度は主応力度以下となるが、この部分のコンクリートの引張強度 σ_t としては、

安全をみて引張主応力度 $\sigma_1 (= \tau = 1.5 \times 2 \times f_s)$ 以上確保することとする。

コンクリートの設計基準強度の範囲では、 $\sigma_1 = 15.8 \sim 17.3 \text{ kg/cm}^2$ となり、差が小さいために、引張強度管理値 σ_T としては、 $\sigma_T = 17 \text{ kg/cm}^2$ をとることとする。

3.2. 引張試験方法と管理方法

洗浄した面の表層部分のコンクリートの引張強度試験は、建研式接着試験方法に基づいて以下の要領で行なう(図-10参照)。

- (i) 乾燥させた洗浄面に接着試験用アタッチメントを接着剤で貼り付ける。
- (ii) アタッチメントの外周回りにディスクグラインダーで深さ 10 mm 程度の溝を切る。
- (iii) アタッチメントをユニバーサルジョイントを介して油圧ジャッキで引っ張り、コンクリート部分で引張破壊した時の荷重から引張強度 σ_t を求める。
- (iv) 接着試験は 500 m² 程度の洗浄面を 1 ロットとして 5 箇所以上で行なう。
- (v) 1 ロットの試験結果の平均値が $\sigma_t = 17 \text{ kg/cm}^2$ 以上であることを確認する。

表-3 に某建設現場にて試験的に実施した接着試験結果を示す。洗浄速度を一定として、ウォータージェットの吐出圧力、吐出量、壁面からの距離などをパラメータとして洗浄条件を変えて調査した結果である。アタッチメントの接着不良(タイプ4)を除き、洗浄力の最も弱いタイプ3以外はすべて引張強度が 17 kg/cm² を上回ることを確認した。

4. 結び

合成壁の接合面をウォータージェットで洗浄し、接合

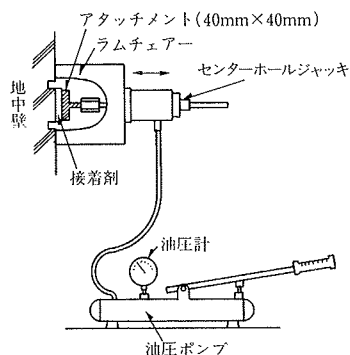


図-10 建研式接着試験方法

タイプ	洗浄条件				引張強度平均値 σ_t (kg/cm ²)	備考
	洗浄速度 (m ² /min)	吐出圧力 (kg/cm ²)	吐出量 (ℓ/min)	壁面からの距離 (mm)		
1	0.2	1000	4.7	30	25.7*	
2				50	22.8	
3				80	13.8	
4	0.2	1500	5.6	30	—	接着不良
5				50	18.8	
6				80	21.6	
7	0.2	2000	6.6	30	26.6*	
8				50	23.3	
9				80	26.3	

* 2 箇所の平均値、他は 3 箇所の平均値

表-3 接着試験結果

鉄筋を鉄筋埋込み工法またはスタッド溶接工法によって施工した場合の接合部の許容せん断応力度を、模型試験体と実物試験体を用いた直接せん断実験結果から検討するとともに、表層部分のコンクリートの引張強度に着目した洗浄面の品質管理方法を検討し、提案した。

謝辞

この研究の一部は、東京電力株式会社の委託により、東電設計株式会社と共同で実施したものであり、関係各位に深く感謝致します。実施に当っては、東京本社特殊工法部、同・設計第六部、同・工務部と共同で作業を進めた。

参考文献

- 1) 古屋, 小島, 武田: 地中壁と後打ち壁からなる合成壁の設計法に関する研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 34, (1987), pp. 92~98
- 2) 菊地, 古屋, 津田, 小島, 武田: 同題(その2), 大林組技術研究所報, No. 36, (1988), pp. 45~50
- 3) 古屋, 津田, 菊地, 小島, 武田: 同題(その3), 大林組技術研究所報, No. 36, (1988), pp. 51~56
- 4) 菊地, 小島, 武田: WALL FOUNDATION による耐震架構の開発研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 30, (1985), pp. 20~24
- 5) 入沢, 菊地, 小島, 武田: カutting ジョイント工法による地中連続壁鉛直継手部の実大実験, 大林組技術研究所報, No. 35, (1987), pp. 35~41
- 6) Birkeland, P. W. and Birkeland, H. W.: Connections in Precast Concrete Construction, Journal of the ACI, Vol. 63, No. 3, (Mar. 1966), pp. 345~368