

接合面を有する地下連続壁部材の 設計せん断耐力算定方法に関する研究

岡田武二¹

¹正会員 工修 清水建設(株) 技術研究所 (〒135 東京都江東区越中島3丁目4番17号)

地下連続壁にはその施工条件から壁間継手や合成地下壁の打継目などが多く生じる。壁間継手を有する地下連続壁の面内せん断耐力、水平方向面外曲げせん断耐力および打継目を有する合成地下壁の面外曲げせん断耐力を実験的に検討し、接合面を有する地下連続壁の設計せん断耐力算定方法およびせん断力の作用方向に応じた安全性の検討方法について提案した。

Key Words : construction joint, shear transfer, design shear capacity, reinforced concrete

1. まえがき

最近の地下構造物の大型化・地下深層化の動向は目覚ましい。地下10階規模の剛性の高い地下壁、大規模橋梁基礎ならびに大深度地下円筒殻等の構築構工法として地下連続壁の構造体利用がますます増加するものと予測される。

地下連続壁の設計では、地下連続壁が地盤を型わくとして地上よりコンクリートを打設する施工条件のため、地下連続壁相互の接合面（以下壁間継手と略称する）や、地下連続壁と後打ちコンクリート壁や梁との合成打継目など接合面を有する構造部材の設計をすることになる。接合面は、一体に打設した部位に較べて構造的な弱点となりやすいので、設計上は設計耐力の低減を考慮するか、一体打ち部分と同等になるよう補強方法を選択することにより一体構造として設計を行うかなどの方法がとられている。いずれにしても、接合面を有する部材の作用せん断力と変形挙動、終局耐力との関係を明らかにした上で、設計耐力算定式を定める必要があり、これまでに多くの実験的研究がなされてきた。

従来の建築地下壁への地下連続壁利用では、壁間継手は耐震壁としての面内せん断抵抗機能および鉛直方向の面外曲げせん断抵抗機能でよかったが、最近の大規模な建築地下壁や地下貯蔵槽、橋梁基礎、道路地下駐車場などの土木構造物への利用では、従来の機能に加えて水平方向の面外曲げせん断抵抗機能も有することが必要となってきた。そのためには、確実な施工が可能な接合形式の選定および設計

で考慮している外力条件下における壁間継手や打継目のせん断耐力評価が問題となる。

特に壁間継手は根切り後に横筋相互を溶接したり、壁間継手部に柱を後打ちするなどの手段はとらず、地上から確実に一体化する施工法でなければならず、一体打ち部分と同程度のせん断耐力が必要とされる。壁間継手の細部設計をする上に必要な仕切鋼材の形状寸法の選定のための設計せん断伝達耐力算定式および壁間継手を有する部材の面内せん断耐力、面外曲げせん断耐力算定式などが定式化されていないのが現状である。また地下連続壁に後打ち壁を合成する場合についても目荒しの程度や範囲の選定のためのせん断伝達耐力算定式や打継目を有する部材の面外曲げせん断耐力算定式などが定式化されていないのが現状である。

本研究は、壁間継手を有する地下連続壁の面内せん断耐力、水平方向面外曲げせん断耐力および打継目を有する合成地下壁の面外曲げせん断耐力を実験的に検討し、壁間継手や打継目などの接合面を有する地下連続壁の設計せん断耐力算定方法およびせん断力の作用方向に応じた安全性の検討方法について述べるものである。

2. 既往のせん断設計方法

地下連続壁の用途は、最初は仮設の止水壁や山留め壁に限られていたが、その後構造体としての利用上の問題点¹⁾が解決され、中・高層建築地下壁、地下街、地下貯蔵槽、橋梁基礎などの構造体として実

表-1 限界状態設計法における設計せん断耐力算定式

	設計せん断伝達耐力	設計面内せん断耐力	設計面外曲げせん断耐力	記号
ACI ⁹⁾	$\phi V_n = \phi \cdot \mu \cdot \rho \cdot f_{yd} A_c \quad (1)$ <p>ここに $\mu = 1.4$ (一体打設) 1.0 (6.4mm目荒し) 0.6 (硬化コンクリート平滑面) 0.7 (鋼材面) ϕ: 強度低減係数 0.85 $V_n < 0.2 f_{cd} A_c$ かつ $56A_c$ (kgf)</p>	$\phi V_n = \phi V_c + \phi V_s \quad (2)$ <p>ここに $\phi V_c = \phi \left(0.70 \sqrt{f_{cd}} \cdot \ell_w \cdot h \right)$ $\phi V_s = \phi \left(0.8 \frac{A_v \cdot f_{yd} \cdot \ell_w}{S} \right)$ ϕ: 強度低減係数 0.85 $V_n < 2.13 \sqrt{f_{cd}} \cdot \ell_w \cdot h$</p>	$\phi V_n = \phi V_c + \phi V_s \quad (3)$ <p>ここに $\phi V_c = \phi \left(0.50 \sqrt{f_{cd}} + 175 P_w \frac{V_n d}{M_u} \right) b_w d$ $\phi V_s = \phi \frac{A_v f_{yd} d}{S}$ ϕ: 強度低減係数 0.85 $V_n d / M_u < 1.0$ $V_c < 0.93 \sqrt{f_{cd}}$</p>	<p>A_c: せん断面の接合面積 (cm²) A_v: 間隔 S 内にあるせん断補強筋の断面積 (cm²) A_s: 引張側鉄筋の断面積 (cm²) f_{yd}: 鉄筋の設計降伏強度 (kgf/cm²) h: 部材の高さ (cm) ℓ_w: 壁の水平長さ (cm) S: せん断補強筋の間隔 (cm) P: せん断面における鉄筋比 f_{cd}: コンクリートの設計圧縮強度 (kgf/cm²) d: 部材断面の有効高さ (cm) P_w: $A_s / b_w d$ b_w: 腹部の幅 (cm) P_x: x方向の鉄筋比 $A_s / b t$ b: 部材単位幅 (cm) t: 部材厚 (cm) f_n: 作用する圧縮応力度 (kgf/cm²) f_{wyd}: せん断補強鉄筋の設計降伏強度 (kgf/cm²) V_{xyd}: 水平鉄筋降伏による設計面内せん断耐力 (kgf) N_1, N_2: 主面内力 $N_1 \geq N_2$ で、引張で正 (kgf) N_x, N_y, V: x方向、y方向に作用する面内力で、引張で正 (kgf) ϕ_1: 主面内力 N_1 と x方向鉄筋のなす角度 $\alpha \leq 45^\circ$ V_n: せん断強度</p>
土木学会 ⁴⁾	$V_{cwd} = \mu \cdot (P \cdot f_{yd} + \frac{1}{2} \sigma'_{nd} \cdot A_c) / \gamma_b \quad (4)$ <p>ここに $\mu = 1.1 \sqrt{f_{cd}} / (P f_{yd} + \frac{1}{2} \sigma'_{nd})^2 \leq 0.12 \sqrt{f_{cd}}$ $\gamma_b = 1.3$ $\theta = 90^\circ$ とする</p>	$V_{xyd} = P_x \cdot f_{yd} \cdot b \cdot t / \gamma_b \quad (5)$ <p>ここに $V_{xyd} = N_1 \cos^2 \phi_1 + N_2 \sin^2 \phi_1 + (N_1 - N_2) \sin \phi_1 \cdot \cos \phi_1$ $\gamma_b = 1.15$ $N_1, N_2 = \frac{N_x + N_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{N_x - N_y}{2} \right)^2 + V^2}$ $\tan 2\phi_1 = \frac{2V}{N_x - N_y}$</p>	$V_{yd} = V_{cd} + V_{sd} \quad (6)$ <p>ここに $V_{cd} = 0.9 \beta_d \cdot \beta_p \cdot \beta_n \cdot \sqrt{f_{cd}} \cdot b_w \cdot d / \gamma_b$ $V_{sd} = \frac{A_v \cdot f_{wyd} \cdot d}{1.15 S \cdot \gamma_b}$ $\beta_d = \sqrt[4]{100/d} < 1.5$ $\beta_p = \sqrt[3]{100 P_w} < 1.5$ $\beta_n = 1 + M_o / M_d < 2$ $\gamma_b = 1.3$ $\gamma_b' = 1.15$</p>	

用化されている²⁾。

これまでの実施例の設計はほとんどの場合、建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準³⁾、土木学会コンクリート標準示方書⁴⁾ (以下土木学会標準示方書と略称する) ならびに道路協会の地中連続壁基礎設計施工指針⁵⁾ などの許容応力度設計法に準拠しており、安定液中打設コンクリートの強度変動の増加に対して許容応力度を低減するか、配合強度を割増しするかして、接合面を有する部材の実験結果にもとづいて壁間継手および合成打継目の許容せん断応力度を定めて設計している^{6), 7), 8)}。

地下連続壁の接合面の位置と作用断面力は主として図-1の3通りが考えられている。図中(a)と(b)は隣接する単位壁体相互の壁間継手であり、(a)は面内方向の軸力とせん断力が作用する場合、(b)は面内方向の軸力と水平方向面外曲げせん断力が作用する場合である。(c)は根切後に地下連続壁壁面を打継ぎ処理して後打ちコンクリート壁を合成した打継目であり、面外曲げせん断力が作用する場合である。

このような面部材のせん断耐力は、せん断力が面内方向に作用するか面外方向に作用するか、また面内方向の軸力が組合わさって作用するかによって異なる。従来の許容応力度設計法では、はりの許容せん断応力度を一律に適用しており、せん断耐力に対する安全性が不明確である。しかし、限界状態設計法では、作用力方向を考慮してせん断耐力を評価しており、合理的な設計ができる。

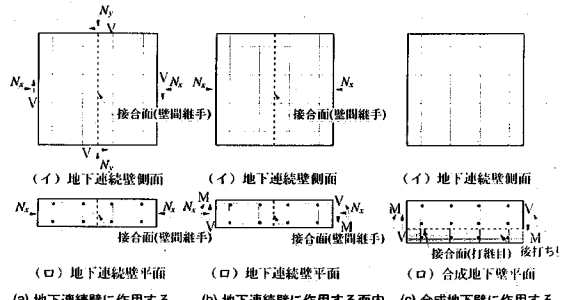


図-1 地下連続壁の接合面の位置と作用断面力

一般の鉄筋コンクリート部材に限界状態設計法を適用する場合の設計せん断耐力算定式としては、表-1に示すACI 318-83鉄筋コンクリート構造設計規準⁹⁾の式(1)、(2)および(3)があり、また土木学会標準示方書(平成3年版)の式(4)、(5)および(6)などがある。すなわちACI設計規準ではすでにあるひびわれ、または発生する可能性のあるひびわれ、異なる材料の接合面、異なる時期に打設されたコンクリート面などの与えられた面をせん断力が横切って伝わる場合には、式(1)の設計せん断伝達耐力 ϕV_n を計算して、設計せん断力がこれを超えないように設計することとしている。一方、土木学会標準示方書ではひびわれ発生の可能性の高い面や打継面等でせん断力を伝達する場合には式(4)の設計せん断伝達耐力 V_{cwd} を計算して、設計せん断力がこれを超えないよ

うに設計することとしている。接合面を有しない一体打ち部分のせん断力に対する安全性の検討は、面内せん断力については式(2)、式(5)ならびに面外曲げせん断力については式(3)、式(6)の設計せん断耐力算定式で検討することとしている。しかし接合面を有する部材の設計せん断耐力と各設計せん断伝達耐力との関係は明確にされていないのが現状である。

3. 設計せん断伝達耐力算定式

ひびわれ面、打継面や接合面でのせん断伝達耐力の評価は、せん断力が卓越する直接せん断実験(push-off型試験)の実験データに基づいてなされ、いくつかの算定式が提案されている¹⁰⁾。

ACI設計規準のせん断伝達耐力式は、ひびわれ面を介した試験体の接合鉄筋比を変化させた実験データ¹¹⁾に基づいて、せん断摩擦理論を適用して定式化したものである。表-1中の式(1)に示しているが、設計せん断伝達耐力は、接合鉄筋が降伏強度に達した時の鉄筋引張り力 $p \cdot f_{yd} \cdot A_c$ に比例するとし、せん断伝達面の形状によって摩擦係数 μ を変化させている。目荒し面(6.4mm凹凸)では一体打設の71.4%、鋼材面で50.0%およびコンクリート平滑面で42.8%としている。しかしこれらの低減率の実験データに対する安全率は明確に示されていない。

また、土木学会標準示方書のせん断伝達耐力式は、表-1中の式(4)に示しているが、一体打ち試験体によるpush-off型試験の実験データから摩擦係数 μ は $p \cdot f_{yd} = 30 \text{ kgf/cm}^2$ を境として変化させ、 $p \cdot f_{yd}$ がそれ以下の場合には一定値とし、それ以上の場合には $p \cdot f_{yd}$ の指数関数とし、 $p \cdot f_{yd}$ が大きくなると徐々に低下する¹²⁾。なおこの示方書では目荒し、平滑面などのせん断伝達面の状態に応じた摩擦係数の低減は特にしていない。

著者は、5~10mm凹凸の目荒し面、コンクリートあるいは平鋼(埋殺し型わく用の厚さ6mm程度の平滑鋼板を使用)による平滑面ならびに平鋼の組合せによるコンクリートコッター部(図-7の斜線部がコンクリートほぞとなる)の3種類の接合形状についてのpush-off型せん断実験結果から、設計せん断伝達耐力算定式(7)式を提案した¹³⁾。

$$V_{uk} = f_{vuok} \cdot t \cdot l$$

$$\left\{ k_{ck} \cdot \frac{f'_c}{\gamma_c} \cdot \lambda + k_{fk} (f_{nu} + k_{sk} \cdot p \cdot \frac{f_y}{\gamma_s}) \right\} \frac{t \cdot l}{\gamma_b} \quad (7)$$

ここに、

V_{uk} : 接合面の設計せん断伝達耐力 (kgf)

f_{vuok} : 接合面の設計せん断伝達応力度 (kgf/cm²)
 f'_c : コンクリートの圧縮強度 (kgf/cm²)
 f_{nu} : 接合面に垂直に作用する平均応力度 (kgf/cm²)

t : 接合面の幅 (cm)

l : 接合面の単位長さ (cm)

k_{ck} : 付着係数

目荒しが5~10mm凹凸の場合 0.04

平滑な場合 0.02

一体打設またはコッター部せん断伝達面の場合 0.06

k_{fk} : 拘束係数

目荒しが5~10mm凹凸、平滑、一体打設ともに0.85とする。

k_{sk} : 鉄筋係数

目荒しが5~10mm凹凸の場合 0.5

平滑な場合 0.2

一体打設またはコッター部せん断伝達面の場合 1.0

γ_c : コンクリートの材料係数 1.3とする

γ_s : 鉄筋の材料係数 1.0とする

γ_b : 部材係数 1.3とする

λ : 接合面積 $A_c = t \cdot l$ とせん断伝達面積 A'_c の比 $\lambda = \frac{A'_c}{A_c}$

この算定式は、せん断伝達面の形状に応じたせん断伝達耐力を極限解析を用いて実験的に求めたもので、これまでになされた同様な実験データに対しても必要な安全率(部材係数 $\gamma_b = 1.3$)を確保している(図-2参照)。

図-3は、設計せん断伝達耐力算定式(1)、式(4)および式(7)を比較したものであり、文献13)のpush-off型実験データも同時に記してある。実線の各式は一体打設コンクリートのひびわれ面の設計せん断伝達耐力を示しており、一体打ち試験体データ●印に対応しており、各設計値とも所定の安全率を確保していることがわかる。破線の各式は目荒しを5~10mm凹凸とした打継目の設計せん断伝達耐力を示しているが、ACI式は著者提案式に比べて目荒し試験体データ□印に対して安全率が小さい。また点線の各式は接合面が平滑な場合の設計せん断伝達耐力を示すが、同様にACI式は著者提案式に比べて平滑面の試験データ△印に対して安全率が小さい。

式(7)は、平鋼の組合せによるコッター部および目荒しなどの接合面の形状、コンクリートの強度 f'_c 、接合鉄筋比 p および接合面に作用する垂直応力度 f_{nu}

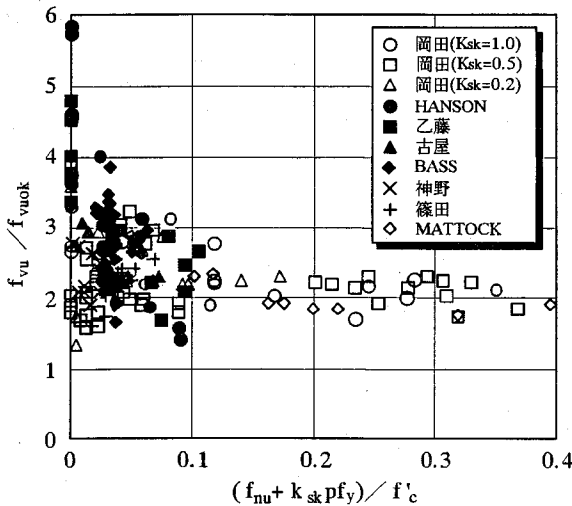


図-2 設計値 f_{vuok} と実験値 f_{vu} との比¹³⁾

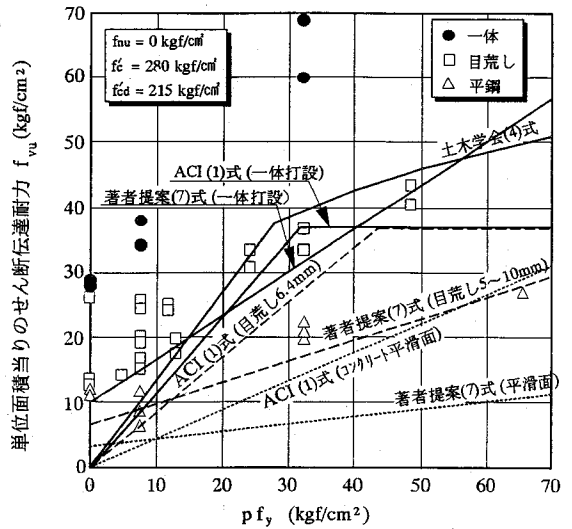


図-3 設計せん断伝達耐力と実験値との比較

を変数として評価し得ることから、図-1に示した地下連続壁の接合面の設計せん断伝達耐力算定式に十分適用できるものと考えられる。

4. 接合面を有する部材のせん断実験概要

図-1に示す接合面を有する地下連続壁部材の面内せん断耐力、水平方向の面外曲げせん断耐力を求めるために行った一連の実験^{14), 15), 16), 17)}の概要は次の通りである。

試験体は表-2に示すAシリーズ、BシリーズおよびCシリーズとし、合計41個とした。Aシリーズは図-1(a)の壁間継手に面内せん断力のみが作用する場合を想定して図-4の試験体を用いた面内せん断実験である。接合面のせん断伝達耐力が小さくなる面内軸圧縮力のない状態とした。Bシリーズは図-1(b)の壁間継手に面内軸圧縮力と水平方向面外曲げせん断力が作用する場合を想定して図-5の試験体を用いた面外曲げせん断実験である。Cシリーズは図-1(c)の合成打継目に面外曲げせん断力が作用する場合を想定して図-6の試験体を用いた面外曲げせん断実験である。

これらの実験において変化させたパラメータは、接合面の形状 (M: 一体, SC: 図-7に示す平鋼の組合せによるコンクリートコッター部, SS: 6mm平滑鋼板 (平鋼と略す), IH: 5mm~10mm凹凸目荒し) と接合鉄筋比 ($p=0.21\sim 1.70\%$) とし、各試験体のパラメータの組合せを記号で示し、表-2の試験体記号に示した。

図-7に接合面の形状が平鋼の組合せによるコン

クリートコッター部の継手構造仕様を示す。せん断力 V の作用方向に対して、斜線で示すコンクリートほぞでせん断力を伝達する構造としている。接合面と垂直方向に水平鉄筋 (○印) を配筋しており、その片側で重ね長さ 45ϕ の重ね継手 (試験体記号 W を付記) としたものとおよび通し鉄筋としたものの2種類とした。面内せん断実験試験体の鉛直鉄筋の上下端部は、特にフックなどの処理はしていない。また面外曲げせん断実験試験体 A-A 断面のせん断補強筋 (壁厚さ方向の水平鉄筋に相当) は、実際の地下連続壁重ね継手部においては施工が困難な個所のため試験体においても配筋していない。合成地下壁面外曲げせん断試験体の接合鉄筋は両端部に直角フックを設けて軸方向鉄筋に定着した。接合鉄筋は、異形鉄筋 $D13mm$ を $30cm$ ピッチに配筋 (接合鉄筋比 $p=0.21\%$) した。また曲げ引張側鉄筋は、はりが曲げ圧縮破壊せずに打継目でせん断伝達破壊が先行するようにできるだけ多く配筋することとし、異形鉄筋 $D38mm$ を 8 本 ($A_s=91.2cm^2$, $p_w=6.4\%$) とした。

実際の地下連続壁の施工条件にあわせるために、重ね継手のある試験体 (W 記号を付記したもの) は鉄筋を安定液中に24時間放置しておき、安定液を除去した後に気中でコンクリートを打設した。その他の試験体は、一般のコンクリートと同様に気中で打設した。

コンクリートの配合は表-3に示す3種類である。実験時期が異なるため配合を別にしたが、 $f'_c=280\sim 300kgf/cm^2$ をねらいとした。圧縮強度 f'_c は実験時材令の標準養生供試体強度を示している。細骨

表-2 試験体一覧表および実験結果

Aシリーズ（壁間継手の面内せん断実験）

試験体記号	接合面の形状	接合鉄筋比 p (%)	鉄筋径 本-mm	鉄筋降伏強度 f _y (kgf/cm ²)	接合面積 Ac (cm ²)	コンクリート圧縮強度 f _c ' (kgf/cm ²)	終局時せん断力 V _u /Ac (kgf/cm ²)	設計せん断伝達耐力 V _{uk} /Ac (kgf/cm ²)	設計せん断耐力 V _{xyd} /Ac (kgf/cm ²)	V _{uk} /V _{xyd}	V _u /V _{uk}	V _u /V _{xyd}
M-42W-1	一体	0.42	8D13	3700	2400	325	19.5	21.2	12.8	1.66	0.92	1.52
M-42W-2	"	0.42	8D13	3700	2400	325	18.9	21.2	12.8	1.66	0.89	1.48
M-42W-3	"	0.42	8D13	3700	2400	325	19.5	21.2	12.8	1.66	0.92	1.52
M-84-1	"	0.84	8D25	3840	4800	281	29.4	30.6	25.6	1.20	0.96	1.15
M-84-2	"	0.84	8D25	3840	4800	297	35.7	31.1	25.6	1.22	1.15	1.40
SC-33	コッター部	0.33	8D16	3750	4800	310	19.3	13.5	10.0	1.35	1.43	1.92
SC-42W-1	"	0.42	8D13	3700	2400	330	19.2	16.2	12.8	1.26	1.19	1.50
SC-42W-2	"	0.42	8D13	3700	2400	330	19.2	16.2	12.8	1.26	1.19	1.50
SC-42W-3	"	0.42	8D13	3700	2400	330	19.2	16.2	12.8	1.26	1.19	1.50
SC-84-1	"	0.84	8D25	3840	4800	310	37.5	26.1	25.6	1.02	1.44	1.47
SC-84-2	"	0.84	8D25	3840	4800	310	37.1	26.1	25.6	1.02	1.42	1.46
SC-169	"	1.69	16D25	3840	4800	310	53.7	46.9	51.4	0.91	1.14	1.04
SS-42W-1	平鋼	0.42	8D13	3700	2400	325	12.3	5.8	12.8	0.45	2.12	1.00
SS-42W-2	"	0.42	8D13	3700	2400	325	13.2	5.8	12.8	0.45	2.28	1.03
SS-42W-3	"	0.42	8D13	3700	2400	325	11.6	5.8	12.8	0.45	2.00	0.91
SS-84	"	0.84	8D25	3840	4800	310	16.6	7.9	25.6	0.31	2.10	0.65

Bシリーズ（壁間継手の水平方向面外曲げせん断実験）

試験体記号	接合面の形状	接合鉄筋比 p (%)	主鉄筋比 P _w (%)	鉄筋径 (主筋) 本-mm	鉄筋降伏強度 f _y (kgf/cm ²)	コンクリート圧縮強度 f _c ' (kgf/cm ²)	終局時せん断力 V _u /bwd (kgf/cm ²)	終局時垂直力 N _{xu} /Ac (kgf/cm ²)	設計せん断伝達耐力 V _{uk} /bwd (kgf/cm ²)	設計せん断耐力 V _{yd} /bwd (kgf/cm ²)	V _{uk} /V _{yd}	V _u /V _{uk}	V _u /V _{yd}
M-33	一体	0.33	0.20	4D16	3750	277	4.6	0.0	21.5	2.8	7.78	0.21	1.65
M-85	"	0.85	0.51	4D25	3840	277	9.1	0.0	36.8	3.8	9.59	0.25	2.38
M-85+15	"	0.85	0.51	4D25	3840	354	14.2	15.0	51.9	4.8	10.80	0.27	2.95
M-85+40	"	0.85	0.51	4D25	3840	336	18.7	40.0	70.7	5.6	12.53	0.26	3.32
M-170	一体	1.70	1.01	8D25	3840	277	12.4	0.0	61.8	4.8	12.88	0.20	2.58
SC-33	コッター部	0.33	0.20	4D16	3750	277	5.2	0.0	15.6	2.8	5.65	0.33	1.87
SC-85	"	0.85	0.51	4D25	3840	277	9.8	0.0	31.0	3.8	8.06	0.32	2.56
SC-170	"	1.70	1.01	8D25	3840	277	13.3	0.0	55.9	4.8	11.65	0.24	2.78
SC-33W	"	0.33	0.20	4D16	3750	354	4.7	0.0	17.3	3.0	5.76	0.27	1.56
SC-85W	"	0.85	0.51	4D25	3840	354	10.4	0.0	32.5	4.2	7.74	0.32	2.49
SC-85W+15	"	0.85	0.51	4D25	3840	336	14.2	15.0	43.8	4.7	9.36	0.32	3.03
SC-85W+40	"	0.85	0.51	4D25	3840	354	18.7	40.0	64.0	5.8	11.10	0.29	3.25
SC-170W	"	1.70	1.01	8D25	3840	354	10.9	0.0	57.6	5.2	11.16	0.19	2.12
SS-33	平鋼	0.33	0.20	4D16	3750	280	5.4	0.0	5.9	2.8	2.13	0.92	1.96
SS-85	"	0.85	0.51	4D25	3840	280	9.0	0.0	9.0	3.8	2.34	1.00	2.34
SS-85W+15	"	0.85	0.51	4D25	3840	280	14.2	15.0	20.8	4.4	4.68	0.68	3.19
SS-85W+40	"	0.85	0.51	4D25	3840	280	18.0	40.0	40.3	5.3	7.64	0.45	3.41
SS-170	"	1.70	1.01	8D25	3840	280	13.4	0.0	13.9	4.8	2.90	0.97	2.80
IH-33	目荒し	0.33	0.20	4D16	3750	280	5.8	0.0	12.8	2.8	4.65	0.45	2.09
IH-85	"	0.85	0.51	4D25	3840	280	9.5	0.0	20.4	3.8	5.31	0.46	2.47
IH-170	"	1.70	1.01	8D25	3840	280	13.0	0.0	33.0	4.8	6.88	0.39	2.70

Cシリーズ（合成打継目の面外曲げせん断実験）

試験体記号	接合面の形状	接合鉄筋比 p (%)	鉄筋径 (mm)	鉄筋降伏強度 f _y (kgf/cm ²)	コンクリート圧縮強度 f _c ' (kgf/cm ²)	終局時せん断力 V _u /bwd (kgf/cm ²)	設計せん断伝達耐力 V _{uk} /bwd (kgf/cm ²)	設計せん断耐力 V _{yd} /bwd (kgf/cm ²)	V _{uk} /V _{yd}	V _u /V _{uk}	V _u /V _{yd}
M-21-1	一体	0.21	D13@300	3630	382	55.0	18.6	10.1	1.84	2.95	5.45
M-21-2	"	0.21	D13@300	3630	382	54.3	18.6	10.1	1.84	2.92	5.38
IH-21-1	目荒し	0.21	D13@300	3630	382	29.1	11.6	10.1	1.15	2.51	2.88
IH-21-2	"	0.21	D13@300	3630	382	33.3	11.6	10.1	1.15	2.87	3.30

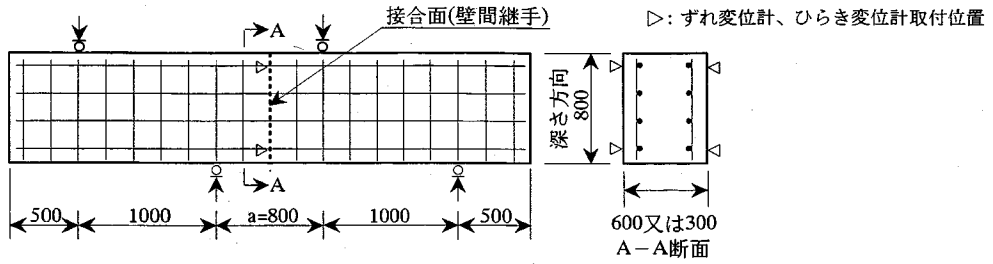


図-4 Aシリーズ面内せん断実験試験体寸法、測定点位置、接合面の位置および荷重方法（単位mm）

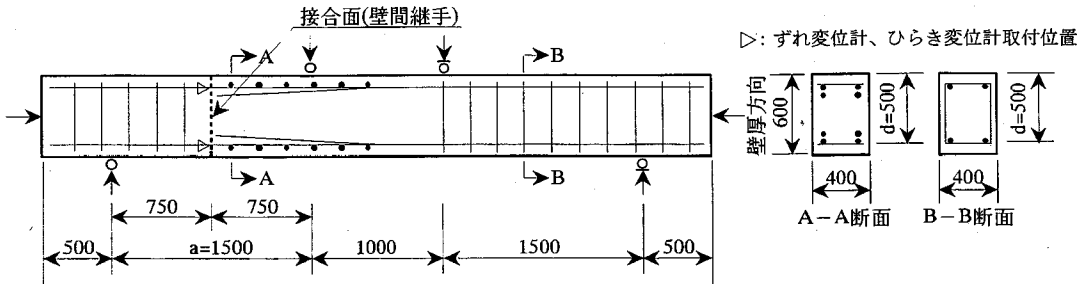


図-5 Bシリーズ面外曲げせん断実験試験体寸法、測定点位置、接合面の位置および荷重方法（単位mm）

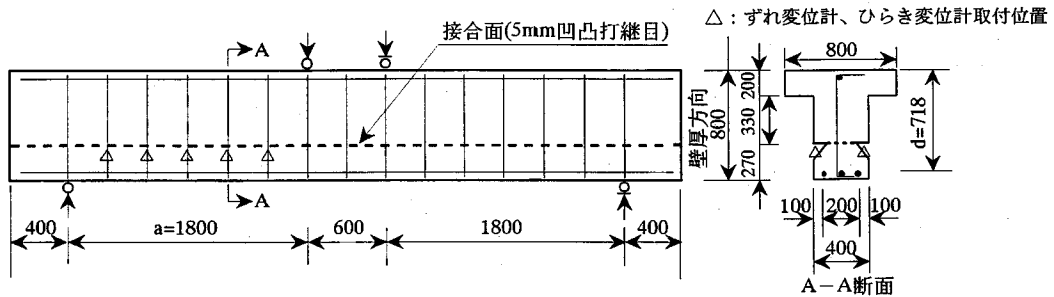


図-6 Cシリーズ合成地下壁面外曲げせん断実験試験体寸法、測定点位置、接合面の位置および荷重方法（単位mm）

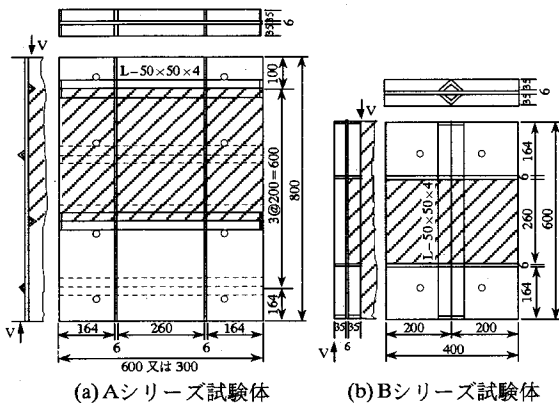


図-7 平鋼の組合せによるコンクリートコッター部構造仕様（単位mm）

表-3 コンクリートの配合

配合種類	対象実験シリーズ	圧縮強度 f_c (kgf/cm ²)	スランプの範囲 (cm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
						水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	
I	Aシリーズ	325	20±2	50.5	42.7	190	375	742	1003	0.113
II	A,Bシリーズ	227~310	20±2	48.0	42.2	179	373	738	1026	0.933
III	Cシリーズ	382	18±2	57.5	43.5	183	319	776	1023	0.096

粗骨材最大寸法は25mm、空気量の範囲4±1%とした。
*実験時材合により、277、280、281、297、310kgf/cm³

材は粒径2.5mmの川砂、粗骨材は最大骨材寸法25mmの川砂利を用いた。

各試験体の荷重方法は、静的2サイクル方式とし、第1サイクルは接合面のずれ変位量が0.1mmに達した荷重段階、第2サイクルは破壊までとした。Bシリーズの軸圧縮力は試験体両端部に等分布の圧

縮応力度が作用するようにアウトケーブルで反力を取った油圧ジャッキで一定軸力を保持した。軸圧縮応力度は $f_n = 15 \text{ kgf/cm}^2$ (試験体記号+15) および 40 kgf/cm^2 (試験体記号+40) の2種とした。

接合面の変位の測定には、接合面をまたいでゲージ長80mmについてカンチレバー型変位計およびパイ型変位計を用い、左右2ヶ所の平均値で求めた。これらの変位計は、80mm離れた2点間のずれ変位量およびひらき変位量を薄い鋼材のひずみに変換して測定する型式である。A、BおよびCシリーズの各接合面をまたいで図-4、図-5および図-6のD印の位置に取付けた。特にCシリーズの場合には特殊な治具を打継目の両側に接着剤で取付けて計測した。

表-2には各試験体の単位面積当りの終局時せん断力実験値 V_u 、式(7)による設計せん断伝達耐力 V_{uk} および土木学会式(表-1中の式(5)および式(6))による設計せん断耐力 V_{xyd} および V_{yd} を示した。

5. 設計せん断耐力算定式の検討

地下連続壁を限界状態設計法で設計する場合、せん断力に対する安全性の検討は、図-1に示すような接合面を有する部材について、壁間継手や打継目の設計せん断伝達耐力算定式による安全性と部材の種類、せん断力の作用方向を考慮した設計せん断耐力算定式による安全性について行わなければならない。

(1) 壁間継手を有する部材の設計面内せん断耐力算定式

地下連続壁の面内力は、土水圧による軸圧縮力および地震荷重によるせん断力が作用する。鉄筋による補強は、鉛直方向(Y軸)と水平方向(X軸)との直交配筋とする。壁間継手は鉛直方向に不連続となり、水平方向にせん断伝達するとともに主面内力を鉄筋およびコンクリートで抵抗するよう設計する。

面内せん断力に対する安全性照査に用いる設計断面力の算定方法および面内力を受ける面部材の設計面内せん断耐力は、土木学会コンクリート標準示方書の方法(表-1中の式(5))に準拠して求めることにする。

図-8は、Aシリーズに用いた2種類の接合面を有した試験体および一体試験体の単位面積当りの設計せん断伝達耐力 V_{uk} と設計面内せん断耐力 V_{xyd} との関係を示したものである。一体試験体(●印)と

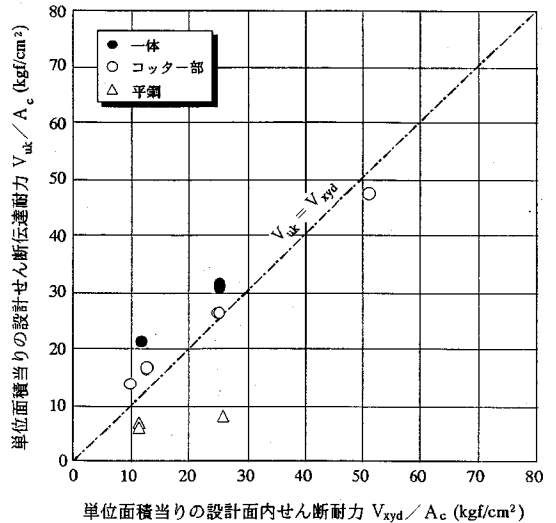


図-8 Aシリーズ試験体の設計せん断伝達耐力 V_{uk} と設計面内せん断耐力 V_{xyd} との関係

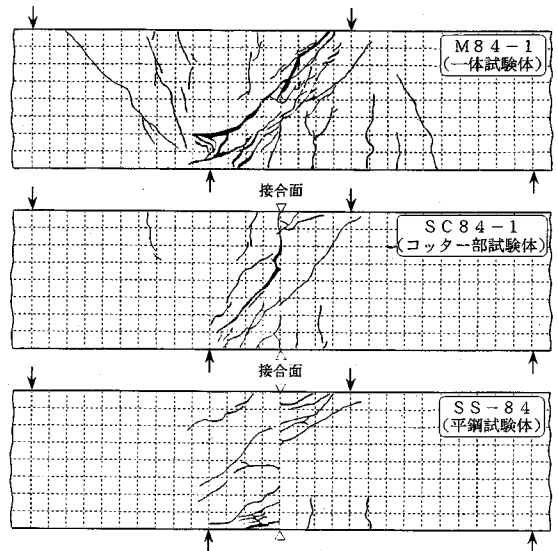


図-9 Aシリーズ面内せん断試験体ひびわれ発生状況

コッター部試験体(○印)の V_{uk} は V_{xyd} をほぼ上まわっているが、平鋼試験体(△印)の V_{uk} は V_{xyd} を下まわっている。

代表的なひびわれ発生状況を示すと図-9の通りである。コッター部試験体(SC84-1)のひびわれはまず接合面にそって発生し、ひらき変位量とずれ変位量が徐々に増加しながらせん断力の伝達がなされている。その後接合面をまたぐように斜めひびわれが発生して、一体試験体(M84-1)と同様な鉄筋降

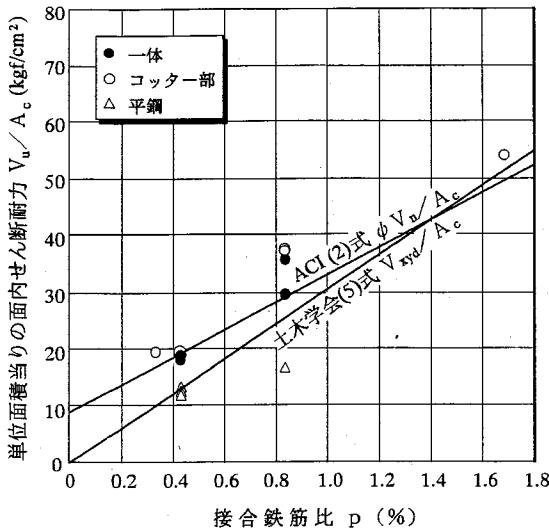


図-10 Aシリーズ面内せん断耐力実験値 V_u/A_c と接合鉄筋比 p との関係

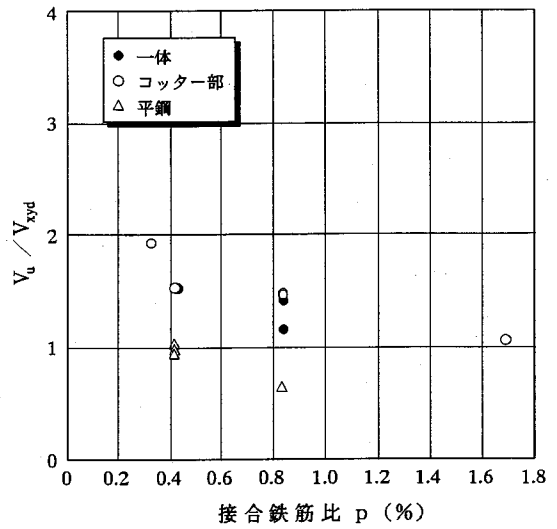


図-11 Aシリーズ安全率 V_u/V_{xyd} と接合鉄筋比 p との関係

伏による面内せん断破壊が先行して生じた。終局時の面内せん断耐力は接合面のない一体試験体とほぼ同じ値であった。 $V_{uk} \geq V_{xyd}$ である他の試験体も一体試験体より接合面の変位量が大きくなるが、すべて鉄筋降伏による面内せん断破壊が先行して生じ、終局時の面内せん断耐力は接合面のない一体試験体と同等となった。一方平鋼試験体 (SS-84) の場合、接合面にそってひびわれが発生するとずれ変位量が顕著に大きくなり、その後斜めひびわれが発生するが接合面で不連続となって接合面のずれによるすべり破壊が先行して生じた。終局時の面内せん断耐力は接合面のない一体試験体の46%に相当する値 ($V_u/A_c = 16.6 \text{ kgf/cm}^2$) であった。 $V_{uk} < V_{xyd}$ である他の平鋼試験体もすべてすべり破壊が先行して生じ、終局時の面内せん断耐力は接合面のない一体試験体の耐力を確保しないことが示された。

図-10は、接合鉄筋比 p と面内せん断耐力実験値 V_u/A_c との関係を示しており、同時にACI および土木学会の設計面内せん断耐力算定式 (表-1の式(2)および式(5)) の値を示した。土木学会式はACI式に比べて設計面内せん断耐力が小さい値となる。土木学会式の実験値に対する安全率 V_u/V_{xyd} を示すと図-11の通りであり、一体およびコッター部の場合には1.0以上であることを示している。しかし、設計せん断伝達耐力 V_{uk} が設計せん断耐力 V_{xyd} より小さい平鋼の場合には、安全率は1.0を確保しないことが示された。

以上のことから、接合面のない一体打ち部分と同等の設計面内せん断耐力 V_{xyd} を確保するためには、壁

間継手の設計面内せん断耐力 V_{xyd} を土木学会式 (表-1中の式(5)) で算定し、接合面の設計せん断伝達耐力 V_{uk} を $V_{uk} \geq V_{xyd}$ となるよう式(7)により継手構造仕様を設計しておけばよいものと考えられる。

(2) 壁間継手を有する部材の水平方向設計面外曲げせん断耐力算定式

地下連続壁に作用する面外力は、土水圧による曲げモーメント、せん断力および軸力である。外力の支持機構は、地下室などでは鉛直方向の連続梁または水平方向の連続梁、連壁基礎や立坑などでは箱型ラーメンまたは円筒シェルとして取扱う。鉄筋による補強は、鉛直方向 (Y軸) と水平方向 (X軸) との直交配筋とする。壁間継手は鉛直方向に不連続となるため、水平梁の軸心に直交して接合面が生じることになり、ここでせん断伝達するとともにせん断力を水平鉄筋で抵抗するように設計する。

面外せん断力に対する安全性照査に用いる設計面外曲げせん断耐力 V_{yd} は、土木学会標準示方書の方法 (表-1中の式(6)) に準拠して求めることにする。

図-12は、Bシリーズの3種類の接合面を有した試験体の設計せん断伝達耐力 V_{uk} (式(7)) と設計面外曲げせん断耐力 V_{yd} との関係を示したものである。すべての接合面の V_{uk} は V_{yd} を大幅に上まわっている。平鋼の接合面 (Δ 印) においても V_{uk}/V_{yd} の値は2.0以上の値となっている。これは一般的に曲げ部材のせん断圧縮破壊とせん断面のすべり破壊との破壊メカニズムが異なることおよび地下連続壁を対象とする場合には壁間継手近傍の水平鉄筋重ね継手部には梁

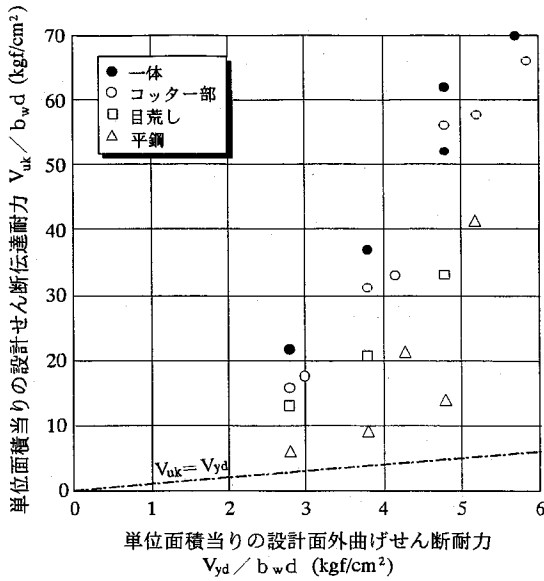


図-12 Bシリーズ試験体の設計せん断耐力 V_{uk} と設計面外曲げせん断耐力 V_{yd} との関係

のせん断補強鉄筋（梁のスターラップに相当する）を配筋しないため設計面外曲げせん断耐力が小さい値となることに起因するものである。

代表的な試験体のひびわれ発生状況を示すと図-13の通りである。コッター部の試験体（SC-85, SC-85W）のひびわれは、まず曲げモーメントの大きな一般部に曲げひびわれが発生し、つづいて接合面の曲げ引張部位にも曲げひびわれが発生すると同時に、ひらき変位量が増加した。しかし、曲げ圧縮部位では接合面のひらき変位量とずれ変位量はほとんど生じないでせん断力の伝達が十分なされた。接合面に生じた曲げひびわれは斜めひびわれに移行し、一般部において一体試験体と同様なせん断圧縮破壊が先行して生じた。終局時の面外曲げせん断耐力は接合面のない一体試験体とほぼ同じ値であった。他のコッター部または目荒しの接合面を有する試験体も接合面からのひびわれは発生しているが破壊耐力には影響せず、すべて一般部のせん断圧縮破壊が先行して生じ、終局時の面外曲げせん断耐力は一体試験体と同等となった。一方平鋼試験体（SS-85）の場合には、接合面の曲げ引張部に曲げひびわれが発生すると同時にずれ変位量が接合面全面に生じ、接合面でのすべり作用によってせん断力の伝達がなされた。しかし接合面でのすべり破壊には至らず、接合面に生じた曲げひびわれが斜めひびわれに移行し、一般部でのせん断圧縮破壊が先行して生じ、終局時の面外曲げせん断耐力は一体試験体と同等となった。

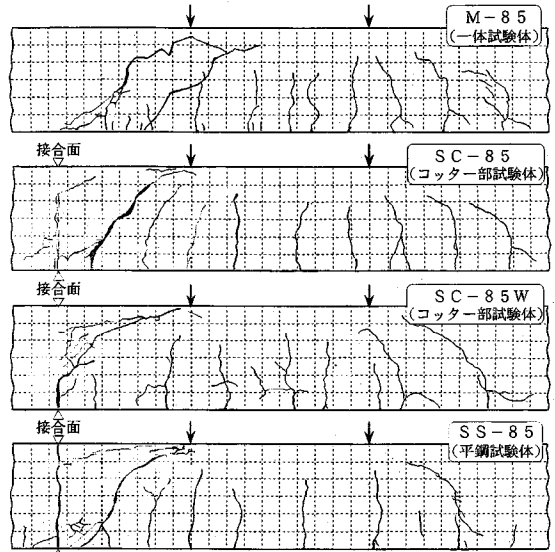


図-13 Bシリーズ水平方向面外せん断試験体ひびわれ発生状況

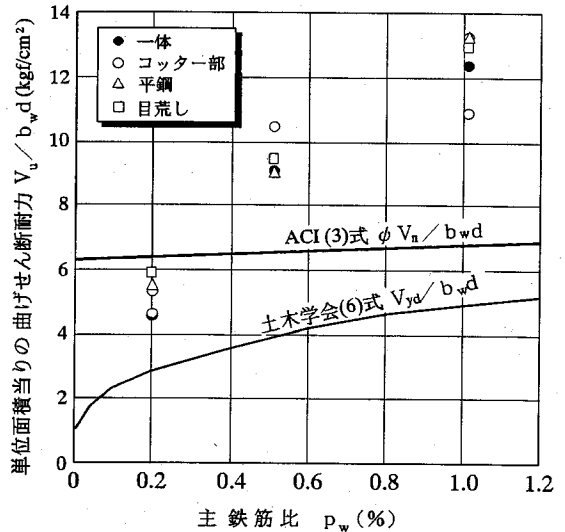


図-14 Bシリーズ面外曲げせん断耐力実験値 V_u/b_wd と主鉄筋比 p_w との関係

図-14は、主鉄筋比 p_w と面外曲げせん断耐力実験値 $V_u/b_w \cdot d$ との関係を示しており、同時にACIおよび土木学会の設計面外曲げせん断耐力算定式（表-1の式(3)および式(6)）の値を示した。ACI式によると、主鉄筋比が小さい場合に実験値が下まわり、設計式としては危険側となることが示されている。土木学会式によれば大幅に安全性が確保できることが示されている。これは、これまでののはりの曲げせん断実験データを解析した結果¹⁸⁾によれば、せん断

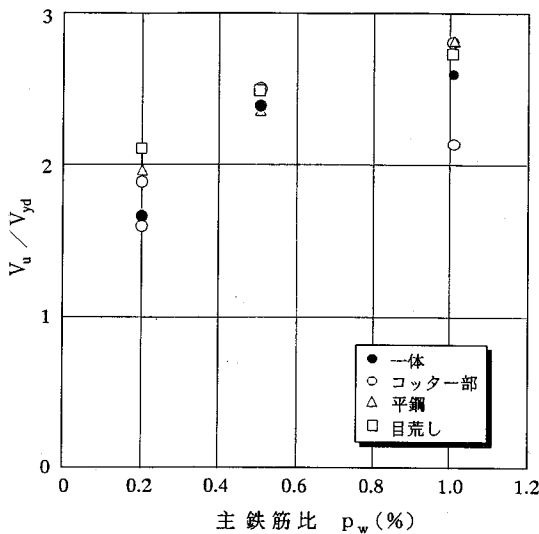


図-15 Bシリーズ安全率 V_u/V_{yd} と主鉄筋比 p_w との関係

スパン比 a/d の曲げせん断耐力に与える影響を $0.75 + 1.40d/a$ 倍としており、Bシリーズ実験の荷重条件 $a/d=3.0$ においては、土木学会式(6)で設定した $a/d=5.6$ のせん断耐力の1.22倍に増加することを示している。土木学会式の安全率 V_u/V_{yd} を示すと図-15の通りであり、すべての接合面を有する部材の安全率は一体試験体と同等であり、 $a/d=3.0$ の荷重条件による設計値 V_{yd} の増加倍率1.22を見込んでも、式(6)の設計せん断耐力の安全率は1.0以上であることが示されている。

以上のことから、接合面のない一体打ち部分と同等の設計面外曲げせん断耐力を確保するためには、水平方向設計面外曲げせん断耐力 V_{yd} を土木学会式(表-1中の式(6))で算定し、接合面の設計せん断伝達耐力 V_{uk} を $V_{uk} \geq V_{yd}$ となるよう式(7)により継手構造仕様を設計しておけばよいものと考えられる。ただし、平鋼接合面の場合にははずれ変形が顕著となるため、変形に対する照査が別途に必要である。

(3) 合成打継目を有する部材の設計面外曲げせん断耐力算定式

合成地下壁に作用する面外力は、土水圧による曲げモーメントおよびせん断力である。外力の支持機構は(2)と同様であるが、合成打継目は、鉛直梁または水平梁の軸心に平行に接合面が生じることにより、接合鉄筋は梁のスターラップを兼ねる配筋とし、ここでせん断伝達するとともにせん断力を一体となった合成断面梁として抵抗するように設計する。

面外せん断力に対する安全性照査に用いる設計面外曲げせん断耐力は、土木学会標準方書の方法(表-1中の式(6))に準拠して求めることにする。

表-2に、Cシリーズ試験体の式(7)による設計せん断伝達耐力 V_{uk} と土木学会式(表-1中の式(6))による設計面外曲げせん断耐力 V_{yd} の算定値を単位面積当りの応力度で示した。

打継目における接合鉄筋比 $p=0.2\%$ の試験体 (IH-21) の設計せん断伝達耐力は $V_{uk}/b_w \cdot d = 11.6 \text{ kgf/cm}^2$ で、設計面外曲げせん断耐力は軸方向鉄筋比 p_w の影響係数 βp の上限値1.5で算定した値 $V_{yd}/b_w \cdot d = 10.1 \text{ kgf/cm}^2$ とほぼ同等の値である。打継目を有する試験体 (IH-21) のひびわれは、まず曲げスパン内に曲げひびわれが発生し、次にせん断スパン内に曲げせん断ひびわれが発生した。この曲げせん断ひびわれが打継目に達すると打継目に沿って水平ひびわれが伸張した。打継目のひらき変位量およびずれ変位量はせん断スパン内で不均等に分布しており、荷重点近傍と支点近傍に比べてせん断スパン中央近傍で大きな値となった。打継目のひびわれがせん断スパン全域に達すると打継目のすべり破壊が生じた。終局時のせん断力は平均せん断応力度で $V_u/b_w \cdot d = 31.2 \text{ kgf/cm}^2$ であり、合成ばりの破壊性状は打継目のずれによるすべり破壊を起こして重ねばり状態となった。式(7)および式(6)による算定値の実験値に対する比率は、それぞれ $V_u/V_{uk} = 2.7$ および $V_u/V_{yd} = 3.1$ であり、大幅に安全性が確保できることが示されている。これは、Cシリーズ実験の荷重条件を $a/d=2.5$ としており、支点と荷重点近傍の打継面に垂直圧縮応力度が作用した影響および a/d が曲げせん断耐力に及ぼす影響と考えられる。終局時に打継目に作用する垂直圧縮応力度の値は不明であるが、支点反力がせん断スパンに均等に作用したと仮定すると $f_{mu} = 12.4 \text{ kgf/cm}^2$ となり、式(7)の設計せん断伝達耐力は平均せん断応力度で $V_{uk}/b_w \cdot d = 11.6 + 8.1 = 19.7 \text{ kgf/cm}^2$ と算定される。また $a/d=2.5$ による設計せん断耐力の増加倍率として $0.75 + 1.40d/a = 1.31$ 倍を見込むと式(6)の設計せん断耐力は平均せん断応力度で $V_{yd}/b_w \cdot d = 10.1 \times 1.31 = 13.2 \text{ kgf/cm}^2$ と算定される。これらの修正設計値の実験値に対する安全率は $V_u/V_{uk} = 1.6$ および $V_u/V_{yd} = 2.4$ であり、 $a/d=2.5$ の荷重条件による設計値の増加を見込んでも式(6)の設計せん断耐力の安全率は1.0以上であることが示されている。なお一体試験体の終局時せん断耐力実験値は平均せん断応力度で $V_u/b_w \cdot d = 54.7 \text{ kgf/cm}^2$ であり、打継目試験体の1.8倍であった。これは一体打ちと打継目とのせん断伝達強度の差に起因するものと考えられる。

以上のことから、一体打ち部分と同等の設計面外曲げせん断耐力を確保するためには、設計面外曲げせん断耐力 V_{yd} を土木学会式(表-1中の式(6))で算定し、打継目の設計せん断伝達耐力を $V_{uk} \geq V_{yd}$ となるよう式(7)により継手構造仕様を設計しておけばよいものと考えられる。

6. 結論

壁体相互の壁間継手や合成地下壁の打継目などの接合面を有する地下連続壁を限界状態設計法で設計する場合のせん断力の作用方向に応じた設計せん断耐力算定方法について実験的に検討した結果、以下のような結論が得られた。

(1) 接合面における設計せん断伝達耐力を一体打ち部分の設計せん断耐力以上となるよう接合面の構造仕様を設計しておけば、接合面を有する部材の終局限界状態に対する安全性を一体打ち部分と同等に確保できる。しかし、平鋼接合面のようなずれ変形が顕著となる接合面を有する場合には、変形に対する照査が別途に必要である。

(2) (1)のように接合面の構造仕様を設計する場合、接合面における設計せん断伝達耐力算定式として、平鋼の組合せによるコンクリートコッター部および目荒しなどの接合面の形状、コンクリート強度、接合鉄筋比、垂直応力度などの影響を評価し得る式(7)を適用すればよい。

(3) (1)のように接合面の構造仕様を設計する場合、壁間継手や合成打継目を有する地下連続壁の設計面内せん断耐力算定式として、土木学会式に準拠した式(5)を、設計面外曲げせん断耐力算定式として式(6)を適用すればよい。

参考文献

1) 岡田武二：地中連続壁工法の問題点，コンクリートジャーナル，Vol.9，No.8，pp.65-72，1971.8.

- 2) 岡田武二：地中連続壁の構造体利用とその発展，セメントコンクリート，No.532，pp.1-9，1991.6.
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート構造計算規準.
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書（平成3年版）設計編.
- 5) 日本道路協会：地中連続壁基礎設計施工指針，1991.7.
- 6) 福田陽一，山野祐司，加藤武二，宇野壽郎：豊州センタービルにおける地中連続壁杭の設計と施工，基礎工，pp.101-107，1993.4.
- 7) 花村昌彦，加瀬善弥，田中俊平：鹿島技術研究所22号館新築工事，基礎工，pp.108-114，1993.4.
- 8) 国弘仁，海野隆哉，鳥居茂：池袋駅ビルにおける地中連続壁の設計と施工，基礎工，pp.80-85，1993.4.
- 9) ACI：Building Code Requirements for Reinforced Concrete (ACI 318-83).
- 10) 青柳征夫：せん断伝達機構とその設計上の取扱い，コンクリート工学，Vol.20，No.12，pp.4-10，Dec. 1982.
- 11) Alan H. Mattock and Neil M. Hawkins：Shear Transfer in Reinforced Concrete-Recent Research，*PCI Journal*，pp.55-75，March-April 1972.
- 12) 土木学会：コンクリート標準示方書（昭和61年制定）改訂資料，コンクリート・ライブラリー，第61号，pp.178-179，1986.10.
- 13) 岡田武二：コンクリート接合面のせん断伝達に関する研究，土木学会論文集，No.502/V-25，pp.73-82，1994.11.
- 14) 岡田武二，小林晋爾：地下連続壁の接合部せん断耐力に関する研究，土木学会第32回年次学術講演会V，pp.220-221，1977.10.
- 15) 岡田武二，塩屋俊幸：鉛直打継目のせん断耐力に関する研究，土木学会第33回年次学術講演会V，pp.295-296，1978.9.
- 16) 岡田武二，武川芳広：SSS工法に関する実験的研究（その6），清水建設研究所報，第36号，pp.29-39，1982.10.
- 17) 神野靖夫，岡田武二，坂口昇，宇野壽郎：SSS工法に関する実験的研究（その8），清水建設研究報告，第54号，pp.45-52，1991.10.
- 18) Okamura, H. and Higai, T.：Proposed design equation for shear strength of reinforced concrete beams without web reinforcement，*Proceedings of JSCE*，No.300，August，1980.

(1994.9.30受付)

CALCULATION METHOD FOR DESIGN SHEAR CAPACITY FOR SLURRY WALL MEMBER WITH JOINT

Takeji OKADA

During certain types of construction work, many vertical joints between the slurry wall panels and composite wall joints are enclosed by slurry wall member. In-plane ultimate shear strength and out-plane ultimate bending shear strength of slurry wall member with vertical joints and out-plane ultimate bending shear strength of composite wall member with joints were examined experimentally. The calculation method for design shear capacity, incorporating a certain safety factor, is then proposed.