

SSS 工法に関する実験的研究 (その9)

—地中壁と打増し壁からなる合成壁の面内せん断強度に関する実験—

香田 伸次 (技術研究所) 坂口 昇 (技術研究所)
岡田 武二 (技術研究所) 宇野 寿郎 (技術開発本部)

§ 1. はじめに

地中連続壁工法とは、場所打ち鉄筋コンクリート造の単位地中壁体を連続させたものであり、在来のシートパイル工法や親杭横矢板工法に代わる仮設山止め壁としてだけでなく、地下構築物本体としても利用可能な工法である。施工法としては、安定液によって孔壁の崩壊を防ぎながら溝状の掘削を行なった後、底部に沈澱堆積するスライムの処理を行ない、鉄筋かごを挿入し、トレミー管を用いてコンクリートを打設するものである。したがって、地下工事に伴う周辺地盤の沈下、騒音、振動などの建設公害防止の観点からも中高層建築、地下鉄、地下街などの地下工法として現在幅広く採用されている。また、地中連続壁は地下構築物本体（本設構造体）として、次の3種類（およびそれらの組み合わせ）への利用が考えられている。

- (1)土圧・水圧を負担する地中壁体
- (2)水平荷重（主に、地震時荷重）を負担する地中壁体
- (3)鉛直荷重を負担する地中壁体（支持杭）

当社でも、清水式場所打ち地下工法（SSS工法）として、既に各所で地中連続壁を採用している。その際、建物規模・用途、地盤条件などに合わせて仕様・工法を開発し、本設構造体としても有効な活用が可能となるように設計を行なっている。今回は、単位壁体相互の接合部（垂直継手）の一体性を特に考慮しない仮設用地下連続壁工法（SSS-B工法）による地中壁の内部に後打ち壁を打ち増し、形成される合成壁に地震時水平力を一体壁として負担させようとする構法（SSS-B1工法）の開発を行なった。

B1工法における地中壁部は縦方向にユニット化されていることから、一般的な外壁と同様に一体的に施工される打増し壁部に比べて耐力・剛性等の耐震性能が劣るものと考えられる。したがって、両者による合成壁も接合面にはだ別れが生じ、両者が別々に挙動するような場合には、耐力・剛性が低下していくものと予想される。

その点について本報では、どのような場合に接合面にはだ別れが生じるのか、はだ別れの発生前後で耐力・剛性がどのように変化するかといった問題について、地中壁部と打増し壁部との剛性の違いに着目してモデル化し、簡便な終局せん断耐力算定式を提案する。さらに、地中壁と合成壁全体との壁厚比をパラメータとした面内せん断実験を行ない、耐力、破壊モード、変形性能等の違いを調べ、提案式の妥当性を確認した。

§ 2. 終局せん断耐力算定式

本章では、SSS-B1工法合成壁の面内せん断抵抗機構をモデル化し、それに則した終局せん断耐力算定式を提案する。

2.1 合成壁モデル

はじめに、SSS-B1工法の基本的な架構法を図-1に示す。B工法との差異は、地中壁の内壁面に結合鉄筋を配し、目荒らしまたは高圧水洗浄による接合面処理を行なった後、打増し壁と合成して耐震壁機能を持たせるところにある。地中壁部分の単位壁体（エレメント）相互の接合部（垂直継手部）に、一体性を特に考慮しない点はB工法に等しい。

以上のようなB1工法合成壁を、以下の仮定条件でモ

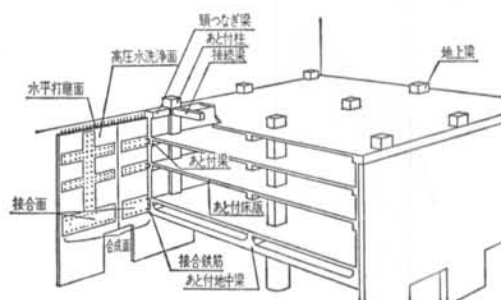


図-1 B1工法の基本架構法

デル化する。

- (1)脚部は、最下層の後付け床版高さ以下を固定とみなす。
- (2)中間階の後付け梁、後付け床版は無視する。
- (3)接合面の配置の違いに影響される伝達応力の集中・分散等は特に考慮せず、合成面全体で均一に応力伝達が行なわれるものとみなす。
- (4)面圧（面外方向力）は合成面全体に均等に生じるものとみなす。ただし、面外方向の変形は拘束されているものとする。
- (5)地震時水平力は頭つなぎ梁位置に集中的に作用し、合成壁は片持ち梁型の変形をするものとする。
- (6)軸力による影響は無視する。

2.2 セン断抵抗機構および破壊モード

面内せん断力を受ける B1 工法合成壁のせん断抵抗機構の推移、破壊経過、破壊モードを図-2、3のように考える。これによると、破壊経過、最終破壊モード、終局せん断耐力 Q_u の組み合わせは、次の3通りとなる。

- ①Path (A), 一体壁としてのせん断破壊, $Q_u=Q_w$
- ②Path (B), 合成面のはだ別れ破壊, $Q_u=Q_s$

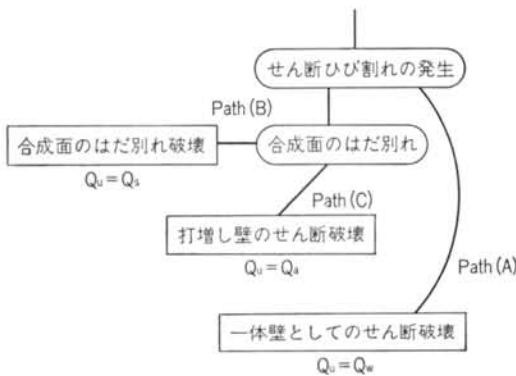


図-2 破壊経過および破壊モード

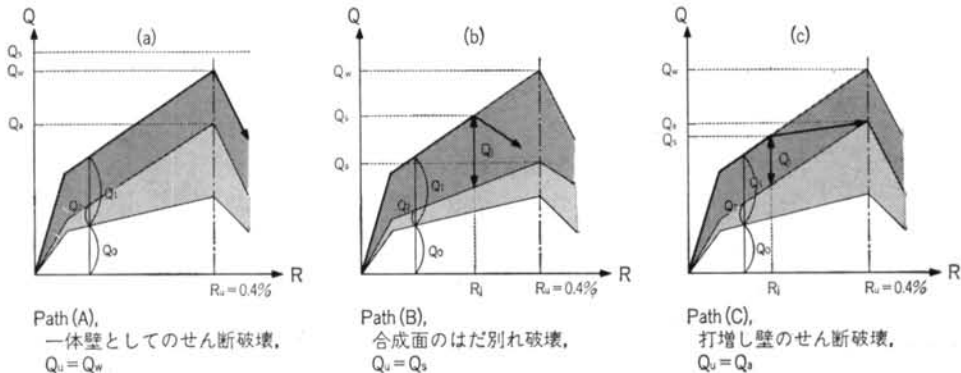


図-3 破壊モードの違いによる復元力特性の違い

③Path (C), 打増し壁のせん断破壊, $Q_u=Q_a$

このうち、②は接合面にはだ別れが生じることにより地中壁側の剛性が低下して、負担せん断力が減少した分を打増し壁が保持できなくなり、破壊に至る現象を示す。また、③は合成面にはだ別れが生じた後も打増し壁+地中壁（スリット壁）として抵抗して、最終的に打増し壁がせん断破壊に至る現象を示す。

終局せん断耐力は、各々の破壊モードに対応するせん断耐力 Q_w , Q_s , Q_a の大小関係から求められる。

2.3 算定式

はじめに、 Q_w , Q_s , Q_a の求め方を示す。

2.3.1 一体壁としてのせん断破壊時耐力 Q_w

終局時変形角 $R_u (=0.4\%$ と定義) を用いて求める (図-2 (a))。

$$Q_w = \alpha \cdot K_w \cdot R_u \quad \dots\dots(1)$$

ただし、

K_w : 合成壁が一体壁として挙動する際の剛性
 $= K_0 + K_1$

K_0 : 打増し壁の剛性 (図-4 (a))

$$= \frac{1}{\frac{h^3}{3 \cdot E_c \cdot I_0} + \frac{\kappa}{G \cdot n \cdot A_0}}$$

K_1 : 地中壁が一体壁として挙動する際の剛性 (図-4 (b))

$$= \frac{1}{\frac{h^3}{3 \cdot E_c \cdot I_1} + \frac{\kappa}{G \cdot n \cdot A_1}}$$

α : 剛性低下率 (菅野式¹⁾)

$$= 0.46 \cdot \rho_w \cdot \omega \cdot \sigma_y / \sigma_B + 0.14$$

h : 壁内法高さ

E_c : コンクリートのヤング係数

G : コンクリートのせん断剛性

$$= \frac{E_c}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

A_0 : 打増し壁断面面積 ($=t_0 \cdot l$)
 A_1 : 地中壁断面面積 ($=t_e \cdot l$)
 I_0 : 打増し壁の断面2次モーメント
 $=t_0 \cdot l^3/12$
 I_1 : 地中壁が一体壁として挙動する場合の断面2次モーメント
 $=t_e \cdot l^3/12$
 κ : 形状係数(変形) ($=1.2$)
 ν : コンクリートのポアソン比
 t_0 : 打増し壁厚
 t_e : 地中壁厚
 l : 壁せい
 p_w : 壁横筋比
 $w\sigma_y$: 壁横筋降伏点強度
 σ_B : コンクリート圧縮強度

2.3.2 合成面はだ別れ破壊時せん断耐力 Q_s

合成面が負担するせん断力 Q_J は、独立した単位地中壁を強制的に一体壁として挙動させるのに必要なせん断力に等しいとみなす。また、合成面がはだ別れする際には Q_J が最大値に達しているものとする(図-2(b))。

$$\max Q_J = (K_1 - K_2) \cdot R_J \quad \dots\dots(2)$$

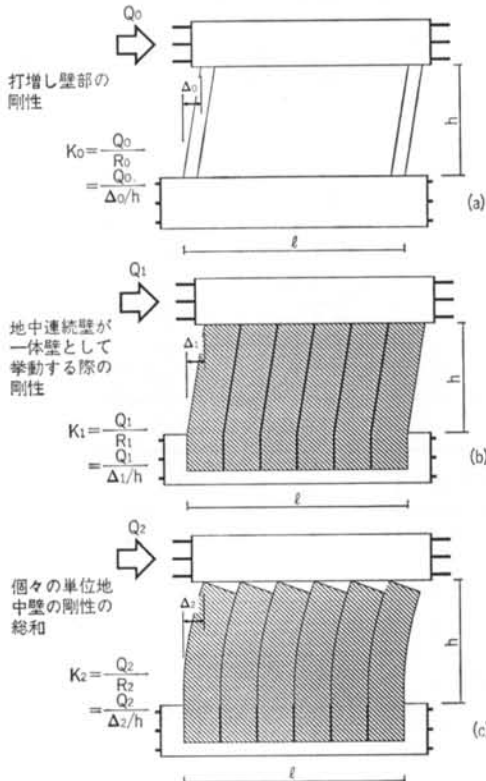


図-4 地中壁と打増し壁の剛性

ただし、

R_J : 合成面がはだ別れする際の変形角

K_2 : 個々の地中壁要素の剛性の総和

(図-4(c))

$$= \frac{n}{\frac{h^2}{3 \cdot E_c \cdot I_2} + \frac{\kappa}{G \cdot A_2}}$$

A_2 : 地中壁要素断面面積 ($=t_e \cdot l_2$)

I_2 : 地中壁要素の断面2次モーメント

$$= t_e \cdot l_2^3/12$$

n : 地中壁要素の個数 ($=l/l_2$)

l_2 : 地中壁要素せい

さらに、式(2)とは別に接合面の直接せん断強度を用いて、 $\max Q_J$ は次式で表わされる。

$$\max Q_J = h \cdot l \cdot \tau_u \quad \dots\dots(3)$$

ただし、

τ_u : 接合面直接せん断強度 (高圧水洗浄面)²⁾

$$= 1.01 \cdot \sqrt{\sigma_B} + 1059 \cdot ps + 1.27 \cdot \sigma_N \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

$$\{= 0.316 \cdot \sqrt{\sigma_B} + 104 \cdot ps + 1.27 \cdot \sigma_N \text{ (MPa)}\}$$

ps : 結合鉄筋比

σ_N : 面圧

また、式(1)と同様に考えれば、接合面はだ別れ時の打増し壁せん断耐力 Q_s は次式で表わされる。

$$Q_s = \alpha \cdot K_w \cdot R_J \quad \dots\dots(4)$$

式(2)~(4)を整理すると、 Q_s は次式となる。

$$Q_s = \frac{\alpha \cdot h \cdot l \cdot K_w \cdot \tau_u}{K_1 - K_2} \quad \dots\dots(5)$$

2.3.3 打増し壁せん断破壊時耐力 Q_a

打増し壁せん断破壊時耐力 Q_a は、合成壁が打増し壁+地中壁(スリット壁)として挙動し、終局状態となったときのせん断耐力である(図-2(c))。

$$Q_a = \alpha \cdot (K_0 + K_2) \cdot R_u \quad \dots\dots(6)$$

2.3.4 終局せん断耐力 Q_u

終局せん断耐力 Q_u は、各々の破壊モードに対応するせん断耐力 Q_w , Q_s , Q_a の大小関係から判別して求める。 Q_w , Q_s , Q_a と Q_u の関係は、破壊モードを考慮すると以下のとおりとなる。

$$(1) Q_s > Q_w > Q_a \text{ のとき, } Q_u = Q_w$$

(一体壁としてのせん断破壊)

$$(2) Q_w > Q_s > Q_a \text{ のとき, } Q_u = Q_s$$

(合成壁のはだ別れ破壊)

$$(3) Q_w > Q_a > Q_s \text{ のとき, } Q_u = Q_a$$

(打増し壁せん断破壊)

§ 3. 面内せん断実験

3.1 実験概要

3.1.1 試験体

試験体は、地中壁頂部から脚部つなぎ梁までをモデル化した縮尺約1/12壁型模型計5体で、パラメータは地中壁と合成壁全体との厚さ比とし(表-1)、壁厚の合計は240mmで一定とした。図-5に試験体形状および配筋例(W3)を示す。

比較検討用の一体打設型試験体(W1)を除く他の試験体については、地中壁部全高にわたりスリット(幅10mm)を設けることにより、実際には壁間垂直継手部に一体性を考慮していない点を模擬した。また、地中壁頂部

試験体名	地中壁厚 (mm)	打増し壁厚 (mm)	地中壁厚 合成壁厚
W1	0	240	0.000
W2	90	150	0.375
W3	120	120	0.500
W4	150	90	0.625
W5	180	60	0.750

表-1 パラメーター一覧

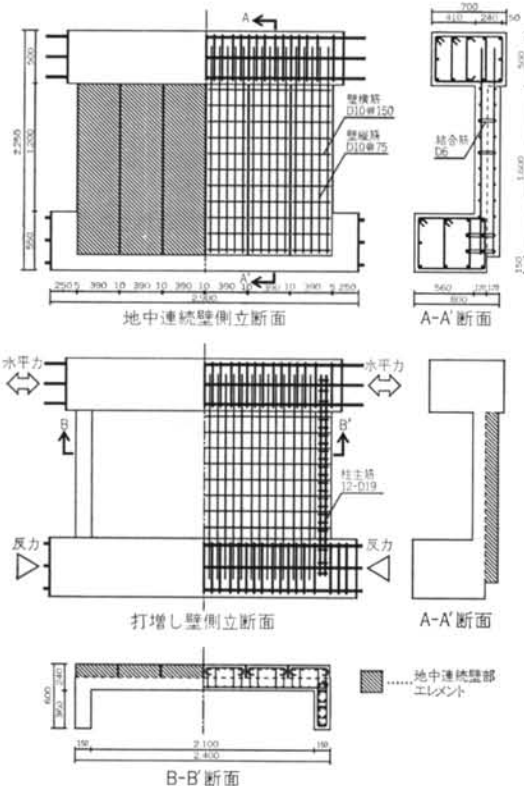


図-5 試験体形状・配筋例(W3)

の打継部は上部梁と完全に一体化させるよう、壁縦筋を上部梁内に充分定着した(定着長350mm, 35d)。地中壁部と打増し壁部との接合面には、各階の後付け梁位置を想定して、水平に2段の結合筋(ジベル筋)を配した(結合筋比は壁全面に対して $\rho_s=0.1\%$)。地中壁部と脚部つなぎ梁部との接合面については、実際には基礎スラブ筋が地中壁内まで定着され、結合筋としての効果も期待できることを考慮して、結合筋比 $\rho_s=0.2\%$ とし、分散させて配した。

全試験体とも、破壊モードがせん断破壊となるよう曲げ耐力を充分大きくし、かつ柱型によるせん断力負担分の影響を小さくするため柱型断面積は小さくして、柱主筋に熱処理を施し高強度化を図った。

3.1.2 施工

施工については、地中壁部を先行して作製し充分な養生期間を経過した後、打増し壁部を含む他の部分を作製した。コンクリート打設方向は、地中壁部、後打ち壁部とも水平方向とした。また、地中壁部と打増し壁部(および脚部つなぎ梁部)との接合面には、地中壁打設直後に安定液を付着させ、硬化後高圧水洗浄(150 kgf/cm²{14.7 MPa})を行ない、安定液中で打設される地中壁

W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
		セメント	水	細骨材	粗骨材	AE剤
59.5	45.7	300	178	824	992	0.75

(ただし、AE剤はボゾリス70)

表-2 コンクリートの調合

名称・部位	圧縮強度		ヤング係数		ポアソン比
	(kgf/cm ²)	[MPa]	(kgf/cm ²)	[GPa]	
W1	308	30.2	2.68×10^5	26.3	0.21
W2 地中壁	325	31.2	3.01×10^5	29.5	0.22
W3 打増し壁	309	30.3	2.65×10^5	26.0	0.21
W4 地中壁	328	32.1	3.01×10^5	29.5	0.22
W5 打増し壁	294	28.8	2.75×10^5	27.0	0.20

表-3 コンクリートの物性

径	部位	降伏点強度		引張強度		ヤング係数	
		(kgf/cm ²)	[MPa]	(kgf/cm ²)	[MPa]	(kgf/cm ²)	[GPa]
D19	柱主筋	9,346	916	10,977	1,078	1.89×10^6	185
D10	壁筋	3,444	338	5,047	495	1.87×10^6	183
D6	結合筋	3,063	300	4,172	409	1.95×10^6	191

表-4 鉄筋の物性

安定液材料	ベントナイト (浅間印)	CMC (SK-2)	分散剤 (ヘキサメタリン酸Na)
含有量(%)	6.0	0.1	0.1

(ただし、練り混ぜ水は水道水とした)

表-5 安定液の調合

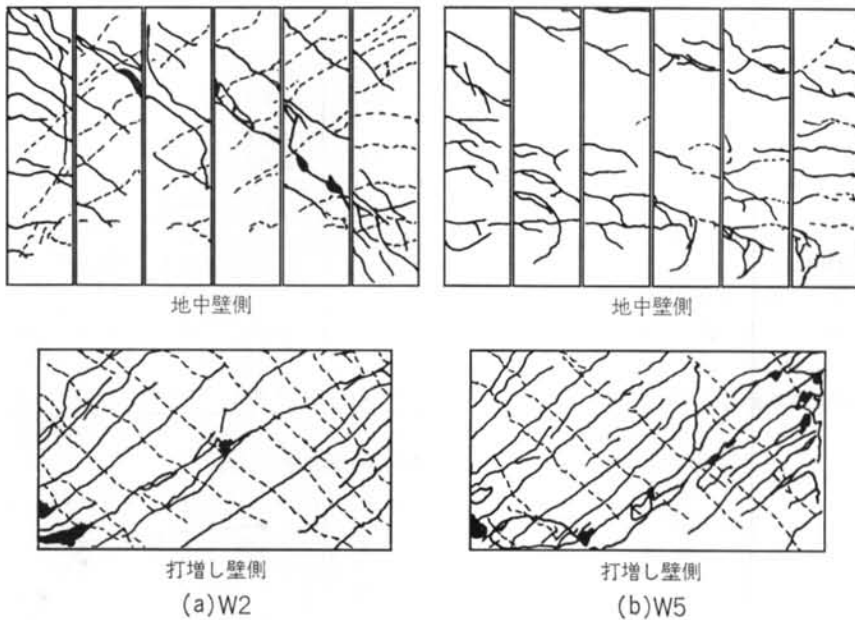


図-6 最終破壊状況例
部の施工状態を模擬した。

3.1.3 材料

使用した材料は、コンクリートが設計基準強度 $F_c = 240 \text{ kgf/cm}^2$ (23.5 MPa)、壁筋および結合筋を SD295 とした。コンクリートの調合を表-2に、材料試験結果を表-3、4に示す。

地中壁部の接合面にはベントナイト安定液を付着させた。安定液の調合を表-5に示す。

3.1.4 加力

加力は上部梁へ水平力を入力する片持ち梁形式とし、入力せん断力を漸増させる正負交番荷荷とした。

3.2 実験結果

試験体の最終破壊状況の例 (W2, W5) を図-6に示す。地中壁厚が大きい W4, W5 ではエレメントの曲げ変形が卓越していたため、地中壁部のせん断ひび割れの拡大は顕著ではなかった。一方、地中壁厚が合成壁厚の 1/2 以下の W1~W3 では、打増し壁部のせん断ひび割れが地中壁部まで貫通しており、最終段階まで一体的に挙動していたことが分かる。また、地中壁と打増し壁の接合面については、側面(木口)でのひび割れが W3~W5 にのみ見られたが、顕著な拡大は見られなかった。また、脚部つなぎ梁位置では、最終破壊に至るまで全試験体とも接合面のはだ別れは観察できず、十分に接合されていたことが分かる。

図-7に、各試験体のせん断力-水平変形角関係を示

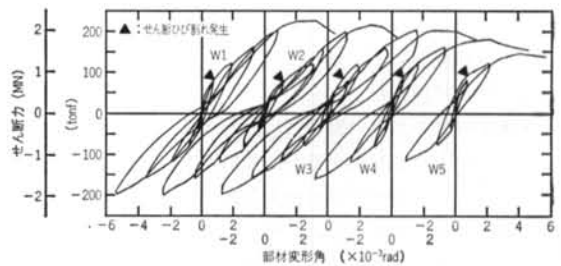


図-7 せん断力-水平変形角関係

名称	せん断ひび割れ発生時			最大耐力時		
	耐力 (tonf)	耐力 (kN)	変形角 ($\times 10^{-3}$ rad)	耐力 (tonf)	耐力 (MN)	変形角 ($\times 10^{-3}$ rad)
W1	82.5	809	0.76	225.4	2.21	7.25
W2	79.0	774	1.16	215.4	2.11	6.76
W3	68.9	675	0.96	202.0	1.98	6.48
W4	81.6	800	0.74	180.8	1.77	6.18
W5	81.6	800	0.76	146.1	1.43	4.06

表-6 パラメータおよび結果一覧

す。また、せん断ひび割れ発生時の耐力および変形角、最大耐力および同時点の変形角の値を表-6に示す。この結果、せん断ひび割れ発生時耐力は壁厚比に因らないが、最大耐力は地中壁部の壁厚が大きくなるに従い小さくなる事が分かる。

以上のことから、破壊経過について次の3点に整理できる。

- (1)せん断ひび割れ発生程度までは、各試験体とも地中

壁部と打増し壁部が一体的に挙動していた。

(2)以降、荷重の増加に従い地中壁部の壁厚が大きいものは接合面にはだ別れが生じ、終局状態（打増し壁部のせん断ひび割れの拡大）に至った。

(3)地中壁部の壁厚が小さいものは、終局状態まで一体壁として挙動していた。

3.3 提案式との比較

先述の提案式による終局耐力計算値と、最大耐力実験結果との比較を表一7、図一8に示す。全試験体の結果に対して計算値は非常に良く適合しており、本提案式は破壊モードの違いによる耐力の違いも充分評価できることが分かる。

§ 4. まとめ

(1)今回の実験結果から、SSS-B1 工法合成壁の破壊モードは次のように考えられる。

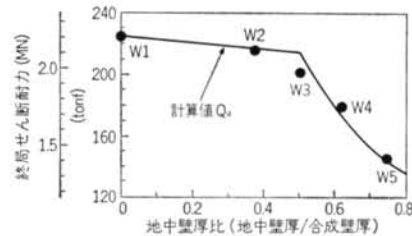
・地中壁厚が合成壁厚の1/2以下の場合には、合成壁はほぼ一体壁として挙動し、合成壁全体のせん断破壊によって終局に達した。

・地中壁厚が大きい場合には、合成壁は初期段階において一体壁として挙動するが、変形の進展に従い接合面にはだ別れが生じ一体性が喪失されていく。この結果、地中壁側の剛性が低下し、打増し壁側のせん断力負担分が増加することによって、最終的には打増し壁部のせん

試験体名	W1	W2	W3	W4	W5
実験値 Q_e	225.3 (2.21)	215.4 (2.11)	202.0 (1.98)	180.8 (1.77)	146.1 (1.43)
Q_w	225.3 (2.21)	223.0 (2.19)	222.3 (2.18)	230.0 (2.25)	229.2 (2.25)
Q_s	—	283.4 (2.78)	214.9 (2.11)	171.4 (1.68)	146.3 (1.43)
Q_a	—	195.1 (1.91)	146.6 (1.44)	99.0 (0.97)	77.0 (0.75)
Q_u	225.3 (2.21)	223.0 (2.19)	214.9 (2.11)	171.4 (1.68)	146.3 (1.43)
Q_e/Q_u	1.00	0.97	0.94	1.05	1.00

(単位：tonf, ()内はMN)

表一7 終局耐力の計算



図一8 終局耐力計算値と実験値との比較

断破壊によって終局に達した。

(2)このような壁厚比の違いによって生じる破壊モードの差異を精度良く評価できる、終局面内せん断耐力算定式を提案した。

<参考文献>

- 1) 菅野俊介：“鉄筋コンクリート部材の復元力特性に関する研究—曲げ降伏するはり、柱および無開口耐震壁の強度と剛性に関する実験的研究—” コンクリート・ジャーナル Vol. 11, No. 2 (1973年)
- 2) 神野靖夫, 他：“SSS 工法に関する実験的研究(その8)—地中壁と打増し壁からなる合成壁の打継面せん断強度に関する実験—” 清水建設研究報告 第54号 (1991年10月)