

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2)

——合成壁による架構の水平加力実験——

菊 地 利 武 古 屋 則 之 津 田 和 明
小 畠 克 朗 武 田 寿 一

Study of Design Method on RC-RC Composite Walls Made of Underground Diaphragm Walls and Inner Walls (Part 2)

——Seismic Loading Tests of Concrete Walls——

Toshitake Kikuchi Noriyuki Furuya Kazuaki Tsuda
Yoshiro Kobatake Toshikazu Takeda

Abstract

The objective of this study is to carry out structural investigations on composite diaphragm walls and establish a more rational utilization technology for underground diaphragm walls in construction of basement structures. This paper concerns seismic loading tests on one-tenth (1/10) scale structural models of RC-RC composite shear walls. These tests were performed in order to investigate influences on the structural performances of the underground diaphragm wall type, composite wall with or without joint reinforcement, ratio of joint reinforcement in beam connection, ratio of length to width of a underground diaphragm wall, and method of forming joints of tie beams with underground diaphragm walls. Based on these test results, it may be said there was little influence of test parameters, and it was possible to confirm that a composite wall is roughly equal in structural performance to a monolithic wall.

概 要

この研究は、地中連続壁とこれに接して後打ちする本体内壁とを一体化した合成壁に地下外壁としての機能を持たせ、地下耐震架構として利用するために合成壁の構造性能を検討し、地中連続壁のより合理的な利用技術の確立を目的としたものである。この報告は、地震時水平力が作用する場合を想定した、縮尺(実物の約1/10)の構面試験体による水平加力実験に関するもので、地中壁体の種類、壁接合筋の有無、はり接合筋比、単位地中壁の長さ幅比および地中壁と脚部つなぎばりとの接合法が構造性能に与える影響について検討したものである。実験結果から、試験パラメータにあまり関係なく、合成壁の強度は、一体壁とほぼ同等であるなど、合成壁による架構の構造性能を知ることができた。

1. 序

この研究は、多種多様でますます厳しくなる設計・施工条件に対応できる地中連続壁の、より合理的な利用技術の確立と利用分野の拡大を図るために、合成壁体を利用した地下耐震架構の開発を目的としたものである。

開発中の耐震架構は、地中壁を本体構造(はり・柱)に接合すると共に、地中壁とこれに接して後打ちする本体内壁とを一体化して合成壁体を構築することにより、地下耐震架構を形成したものである。これは、地震時水

平力と土水圧による面内と面外方向の荷重に対し、一体壁としての構造機能を発揮する地下構造体である。合成壁体のタイプには、地中壁をロッキングパイプ方式で構築し、単位地中壁相互で応力伝達がない場合(以下、スクリーン壁体¹⁾と呼ぶ。(財)日本建築センターより評定取得済み)とハイドロフリーズ掘削機によるカッティングジョイント方式で構築し、応力伝達がある場合(以下、カッティングジョイント壁体と呼ぶ。開発中)の2種があり、設計・施工条件に応じて選択できる。

この報告は、合成壁体に地震時水平力が作用する場合

を想定した、縮尺(実物の約1/10) 模型の構面試験体による水平加力 実験に関するものである。ここでは、地中壁の種類、壁接合筋の有 無、はり接合筋比、単位地中壁の 深さ方向の長さとの比率および地中壁とつなぎばりとの接合法 などが、合成壁による架構の構造 性能に与える影響について比較検 討した。

2. 実験の概要

2.1. 試験体

試験体一覧を表-1に、試験体 の形状、寸法および配筋を図-1 に示す。

試験体は、板厚12cm、板長さ 2.1mの地中壁を想定したプレキ ャスト板3枚又は7枚が連続した 壁体に、壁厚12cmの本体内壁 (一体壁)を打継いだ合成壁体が試 験部分となる尺縮(実物の約1/10) 模型の構面試験体7体、比較のた めの一体壁1体合計8体である。

試験パラメータは、①地中壁体 の種類(2種類;スクリーン壁体 とカッティングジョイント壁体)、 ②壁接合筋の有無(有り;0.11% を配筋)、③はり接合筋比 P_s (2 種類; $P_s=0.11$ と 0.20%)、④単 位地中壁の深さ方向の長さ L と幅 B との比率 L/B (以下、長さ幅比 を呼ぶ。

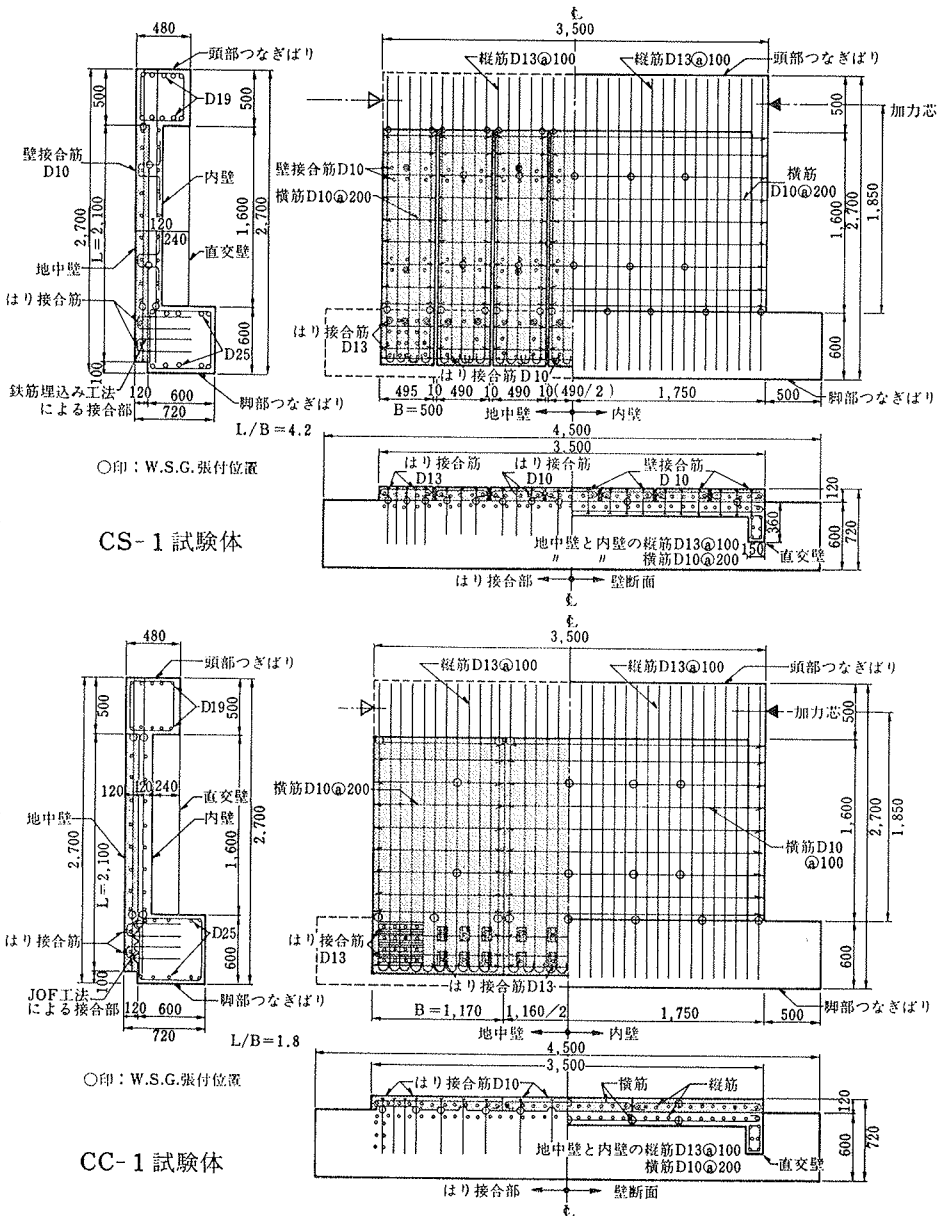


図-1 試験体の形状、寸法および配筋

試験体	壁の種類	地中壁体の種類	壁接合筋の有無*1	はり接合筋比 ^{*2} $P_s(\%)$ (使用鉄筋径)	単位地中壁体の 深さ方向長さ L と幅 B との比率 L/B	地中壁体とつ なぎばりとの 接合法	圧縮 強度 $F_c(\text{kg/cm}^2)$	弾性 係数 $E_c(10^4\text{kg/cm}^2)$	割裂 強度 $F_t(\text{kg/cm}^2)$
CS-1	合成壁	スクリーン壁体 [スリットがあり 地中壁体相互で 応力伝達なし]	有	0.20(D10)	4.2	鉄筋埋込み工法*4	303	2.25	24.2
CS-2							307	2.17	26.6
CS-3		カッティング ジョイント壁体 [スリットがなく 地中壁体相互で 応力伝達あり]	無	0.20(D13)	1.8	JOF工法	336	2.47	24.7
CC-1							358	2.58	25.5
CC-2	合成壁	カッティング ジョイント壁体 [スリットがなく 地中壁体相互で 応力伝達あり]	無	0.11(D10)	1.8	JOF工法	358	2.34	26.3
CC-3							333	2.47	25.6
CC-4	合成壁	カッティング ジョイント壁体 [スリットがなく 地中壁体相互で 応力伝達あり]	無	0.20(D13)	4.2	鉄筋埋込み工法*4	309	2.23	25.3
N							一体壁	—	0.20(D13)*3

(注) *1: 地中壁とこれに接して打継ぐ内壁とを構造的につなぐ壁相互の接合筋: 12-D10(0.11%)/単位地中壁1枚当り
*2: 地中壁と脚部つなぎばりとを剛接する、左右両端の接合部を除くせん断力のみを負担する中間接合部における接合筋比
*3: 1回のコンクリート打設により地中壁部を含め各部材を一体に成形したが、合成壁の接合面位置に接合筋を配置
*4: あらかじめ地中壁に折曲げ加工した接合筋を埋込み、根切り後に台直し加工する方式
*5: 各値は、地中壁部と本体部との平均値、弾性剛性は、 $1/4 F_c$ 時の割線剛性

表-1 試験体一覧とコンクリートの性質

と鉄筋埋 込み工法) である。

地中壁の配筋は、シングル配筋で縦筋に D13@100 ($p_w = 1.06\%$)、横筋に D10@200 ($p_w = 0.30\%$) を、内壁にも地中壁と同量の鉄筋を配した。

左右最外端のはり接合部には、せん断力とねじりモーメントを負担するものとして、JOF 工法による接合部に 16-D13 ($p_s = 0.81\%$) を、鉄筋埋込み工法による接合部に 20-D13 ($p_s = 1.02\%$) を配した。それ以外の中間部には、せん断力のみを負担するものとして接合筋を配した。試験体の製作は、まず、単位地中壁を想定した PC 板相互に 10 mm のスリットを設けるように PC 板を敷き並べてスクリーン壁体を、また、ベニヤ型枠で成形した PC 板の鉛直継手部に、後打ち部を打継いでカッティングジョイント壁体を構築し、次いで、内壁、頭部つなぎばり、脚部つなぎばりおよび直交壁を同時に平打ちで打継いで行なった。

2.2. 使用材料

使用した鉄筋の性質を表一 2 に示す。

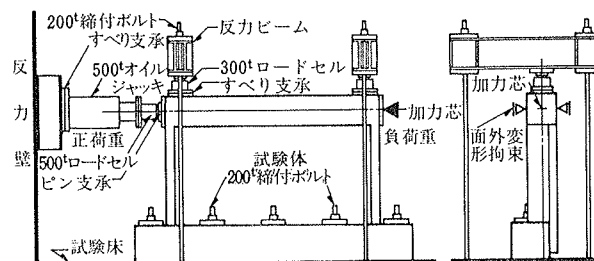
コンクリートには、設計基準強度 $F_c = 240 \text{ kg/cm}^2$ 、スランプ 18 cm、粗骨材の最大粒径 25 mm の普通コンクリートの生コンを使用した。コンクリートの実験時における性質を表一 1 に示した。

2.3. 加力方法と測定方法

加力方法を図一 2 に示す。

加力は、頭部つなぎばりに荷重を加える片持ばり形式により、曲げとせん断が同時に加わる方法で行ない、荷重をロードセルで検出した。

荷重の加え方は、地中壁コンクリートの短期許容せん断応力度短 $f_s = 8.33 \text{ kg/cm}^2 \{ = 1.5 \times (3.75 + 3/400 F_c) \}$ 、 $F_c = 240 \text{ kg/cm}^2$ を基準に正負交番繰



図一 2 加力方法

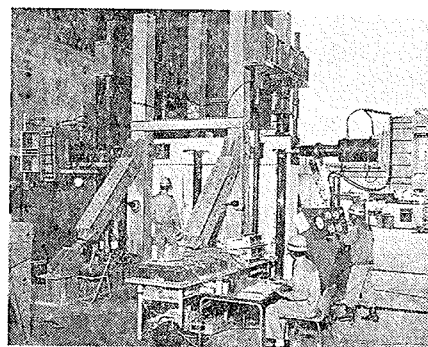
返し漸増載荷方式とした。なお、水平加力に伴う浮き上りを頭部つなぎばり位置で試験床に反力をとった治具で拘束し、試験部分が主にせん断応力場になるように、また、偏心加力に伴う面外方向へのねじれ変形を拘束し、その影響がないように加力装置を計画した。

測定は、変位として、頭部つなぎばり中央で加力芯位置における脚部つなぎばりに対する相対水平変位を高感度型変位計で、ひずみとして、縦筋とはり接合筋のひずみを W.S.G. で行なった。

3. 実験結果とその検討

3.1. 破壊経過

実験状況と最終破壊状況を写真一 1 と 2 に示す。



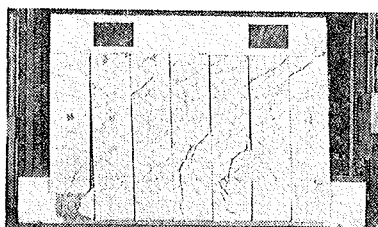
写真一 1 実験状況

呼び径	降伏点強度 $s\sigma_y$ (kg/cm^2)	引張強度 $s\sigma_{max}$ (kg/cm^2)	弾性係数 E_s ($\times 10^4 \text{ kg/cm}^2$)	伸び率 (%)	使用部位
D10	3600	5220	1.88	15.9	壁横筋、壁接合筋
D13	3500	5110	1.89	18.6	壁縦筋、頭部と脚部つなぎばりの帯筋
D19	3620	5650	1.92	13.4	頭部つなぎばりの軸方向筋
D25	3810	5590	1.93	21.2	脚部つなぎばりの軸方向筋

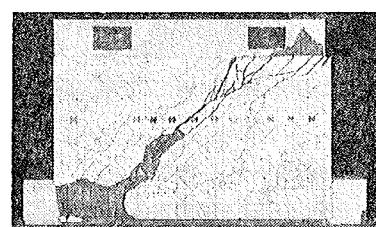
表一 2 鉄筋の性質



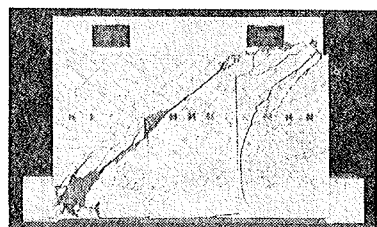
CS-1 試験体



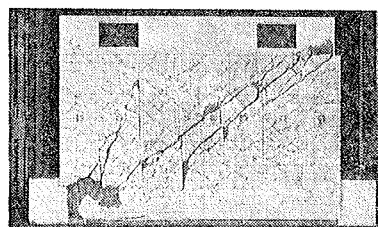
CS-2 試験体



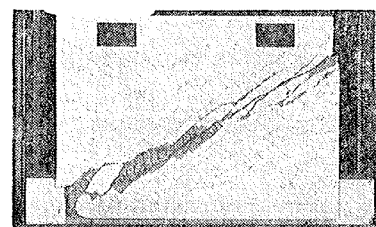
CC-1 試験体



CC-2 試験体



CC-4 試験体



N 試験体

写真一 2 最終破壊状況

各試験体に加力すると、曲げひび割れが $Q = 40 \sim 54$ ton で脚部つなぎばり上面近傍位置に発生し、荷重が上昇するに従って曲げひび割れが進展した。更に、加力すると、加力点側の内壁隅角部を起点にして壁せい中央を加力方向に對し、約45度の角度で横切るせん断ひび割れが内壁側に $Q = 105 \sim 130$ ton、地中壁側に $Q = 114 \sim 136$ ton で発生したが、剛性が急激に低下することなく、荷重が上昇すると共にせん断ひび割れが増加進展していった。内壁と地中壁における引張最外縁の縦筋脚部は、第4サイクルの $Q = 200$ ton 以後の荷重レベルで降伏あるいはその近傍のひずみに達した。各試験体は、 $Q = 280 \sim 336$ ton で加力点と反対側の脚部の壁隅角部におけるコンクリートが圧縮破壊するのと同時に、合成壁がせん断破壊して剛性が急激に低下した。

終局強度に至るまでの合成壁のひび割れ発生状況は、いずれの試験体もほぼ類似したパターンを示しており、一体壁と比較しても、巨視的には大差があるとはいえないが、局部的には単位地中壁が独立に挙動しはじめている兆候を示すものが認められた。合成壁の最終破壊状況を見ると、個々の単位地中壁で破壊が進行しており、特に、はり接合筋の小さい CC-2 と地中壁がスクリーン壁体のものでその傾向が明瞭に認められた。これは、終局強度以後の大変形時（部材角で $R = 1/20$ rad. まで加力）に、地中壁と内壁との一体性が徐々に失われていったためと考えられる。

終局強度に至るまでの合成壁のひび割れ発生状況は、いずれの試験体もほぼ類似したパターンを示しており、一体壁と比較しても、巨視的には大差があるとはいえないが、局部的には単位地中壁が独立に挙動しはじめている兆候を示すものが認められた。合成壁の最終破壊状況を見ると、個々の単位地中壁で破壊が進行しており、特に、はり接合筋の小さい CC-2 と地中壁がスクリーン壁体のものでその傾向が明瞭に認められた。これは、終局強度以後の大変形時（部材角で $R = 1/20$ rad. まで加力）に、地中壁と内壁との一体性が徐々に失われていったためと考えられる。

3.2. 諸強度

せん断ひび割れ強度 Q_{sc} と終局強度 Q_u をまとめて表-3 に示す。

各試験体のせん断ひび割れは、それぞれ内壁側に Q_{sc} (実 τ_{sc}) = $105 \sim 130$ ton ($12.5 \sim 15.5$ kg/cm²)、地中壁側に Q_{sc} (実 τ_{sc}) = $114 \sim 136$ ton ($13.6 \sim 16.2$ kg/cm²) で発生した。実験値の計算値に対する比率は、内壁側が0.79 ~ 0.98倍（平均0.89倍）、地中壁側が0.84 ~ 1.02倍（平均0.93倍）で実験値がやや小さい値を示した。せん断ひび割れ強度は、地中壁側が内壁側よりもやや大きい値を示す傾向が認められた。この傾向は、一体壁Nにおいて

試験体	せん断ひび割れ強度				終局強度				終局強度時の変位	弾性剛性		
	実験値		計算値		実験値		計算値			実Ke	計Ke	比率
	実 Q_{sc} ^{*1}	実 τ_{sc}	計 Q_{sc} ^{*2}	実 Q_{sc}	実 Q_u	実 τ_u	計 Q_u ^{*3}	実 Q_u	δ_u (mm)			
	(ton)	(kg/cm ²)	(ton)	計 Q_{sc}	(ton)	(kg/cm ²)	(ton)	計 Q_u				
CS-1	122 (126)	14.5 (15.0)	127	0.96 (0.99)	322	38.3	317	1.02	10.4 5.6	1590	2610	0.61
CS-2	111 (116)	13.2 (13.8)	140	0.79 (0.83)	280	33.3	319	0.88	7.8 4.2	1780	2510	0.71
CS-3	107 (116)	12.7 (13.8)	130	0.82 (0.89)	313	37.3	332	0.94	11.6 6.3	1390	2880	0.48
CC-1	128 (132)	15.2 (15.7)	133	0.96 (0.99)	320	38.1	342	0.94	10.6 5.7	1960	2990	0.66
CC-2	118 (124)	14.0 (14.8)	137	0.86 (0.91)	312	37.1	342	0.91	11.8 6.4	1670	2720	0.61
CC-3	105 (114)	12.5 (13.6)	135	0.78 (0.84)	328	39.0	329	1.00	10.4 5.6	1980	2860	0.69
CC-4	130 (136)	15.5 (16.2)	133	0.98 (1.02)	332	39.5	320	1.04	9.3 5.0	2000	2640	0.76
N	114 (130)	13.6 (15.5)	135	0.84 (0.96)	336	40.0	314	1.07	11.1 6.0	2160	2720	0.79

(注) ()内の値は、せん断ひび割れが地中壁間に発生した時の強度、*1 ; 正荷重時と負荷重時の平均値 (計算値の算定式)
 *2 せん断ひび割れ強度¹⁾; 計 $Q_{sc} = K_s \cdot K_{tn} \cdot \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_c \cdot \sigma_t \cdot t} \cdot \ell$, $K_s = 1 - 0.52 P_w \sqrt{f_c}$, $K_{tn} = (1 + 1.05 t/B) / (1 + 1.77 t/B)$, σ_t (割れ強度), ℓ (0.9D), P_w (縦筋と横筋の平均値, 0.68%)
 *3 せん断終局強度⁴⁾; 計 $Q_u = [0.0679 P_t^{0.23} (f_c + 180) / \sqrt{M/QD} + 0.12 + 2.7 \sqrt{\sigma_w h} \cdot P_w h] b e_j$
 *4 弾性剛性; 計 $K_e = \frac{1}{1/K_B + 1/K_S}$, $K_B = Q \delta_B$, $\delta_B = \frac{Q \cdot a^3}{3 E \cdot I_c}$, $K_S = \frac{Q}{\delta_S}$, $\delta_S = K \frac{Q \cdot a}{G \cdot A}$, $K = 1.22$, $a = 185$ cm

表-3 試験結果一覧

も認められており、これは、地中壁と内壁とで脚部つなぎばりに対する支持形式が異なることから、両者でせん断力の負担割合が多少相違しているためと考えられる。

CS-2を除く合成壁の終局強度は、実 Q_u (実 τ_u) = $312 \sim 332$ ton ($37.1 \sim 39.7$ kg/cm²) で、試験パラメータの終局強度への顕著な影響は認められず、比較的近似した値を示した。これらの一体壁Nに対する比率は、0.93 ~ 0.99倍（平均0.96倍）でほぼ同等の強度であった。これに対して、地中壁がスクリーン壁体で壁接合筋のないSC-2の実験値は、一体壁Nに対する比率でみると0.83倍で、他の合成壁の終局強度に比べて小さかった。

この実験における試験パラメータと終局強度 Q_u との関係を見ると、①地中壁がスクリーン壁体の合成壁の実 Q_u は、カッティングジョイント壁体の実 Q_u よりも小さい (CS-2 と CC-4 の比較), ②地中壁体がスクリーン壁体で壁接合筋を有する合成壁の実 Q_u は、壁接合筋のないものよりも大きい (CS-1 と CS-2 の比較), ③はり接合筋 p_s は、実 Q_u に余り影響しない, ④単位地中壁の長さ幅比 L/B は、実 Q_u に余り影響しない (CC-1 と CC-3 の比較), ⑤地中壁と脚部つなぎばりとの接合法は、実 Q_u にほとんど影響していない (CC-3 と CC-4 の比較) といえる。

また、合成壁の実 Q_u は、合成壁を完全な一体壁（断面の中心から $0.3D$ 以上外にある縦筋が曲げ補強筋として働くとして仮定³⁾）として、表-3 に示したせん断終局強度式⁴⁾ で求めた計算値に対する比率でみると、0.88 ~

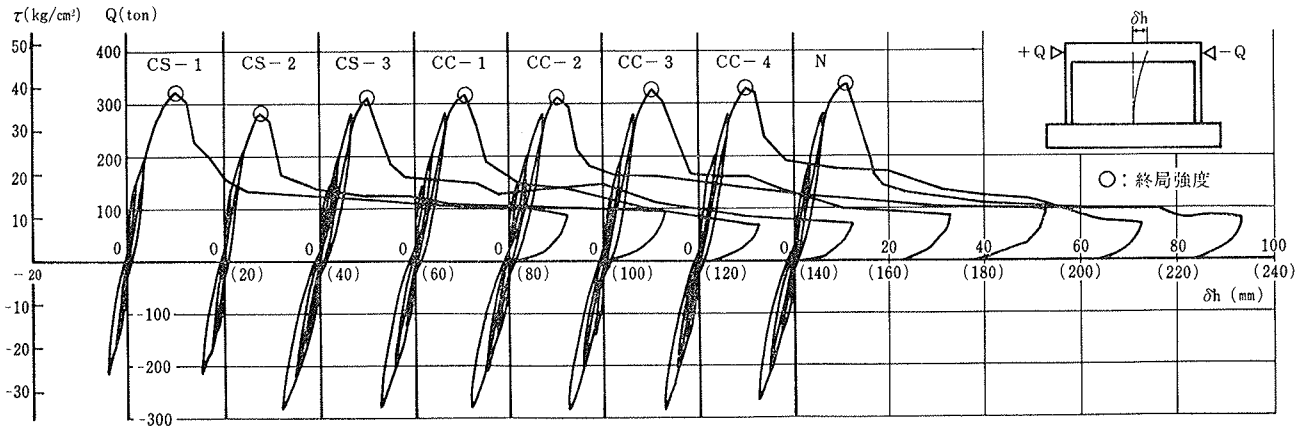


図-3 荷重Q～相対水平変位 δ_h 関係（履歴曲線）

1.04倍で、やや危険側の評価となるものもあるが、終局強度は、このせん断終局強度式でほぼ評価できる。

今回の実験結果は、地中壁がスクリーン壁で壁接合筋を有する合成壁と地中壁がカッティングジョイント壁体の合成壁に、一体壁とほぼ同等の終局強度が期待できることを示しているものと考えられる。

3.3. 変位

各試験体の初期剛性を

表-3に、荷重Q～相対水平変位 δ_h 関係（履歴曲線）を図-3に示す。

初期剛性の計算値は、地中壁がスクリーン壁体あるいはカッティングジョイント壁体の合成壁についても、一体壁と仮定し鉄筋を考慮した弾性曲げ剛性と弾性せん断剛性（ $k=1.22$ と仮定）から求めた値である。

合成壁の初期剛性実 K_e は、実 $K_e=1,390\sim 2,000$ t/cmであった。これらの実 K_e の一体壁Nに対する比率は、0.64～0.93倍（平均0.82倍）で、合成壁の初期剛性は、一体壁のものより小さい値を示した。

各試験体の実験値の計算値に対する比率は、0.48～0.79倍で、一体壁においても実験値が計算値よりも小さかった。これは、計算上の仮定と実試験体との相違、すなわち、地中壁と脚部つなぎばりとの支持形式の相違、スクリーン壁体におけるスリットの存在および乾燥収縮の影響などに起因しているものと考えられる。

各試験体の荷重Q～相対水平変位 δ_h 関係は、CS-2の

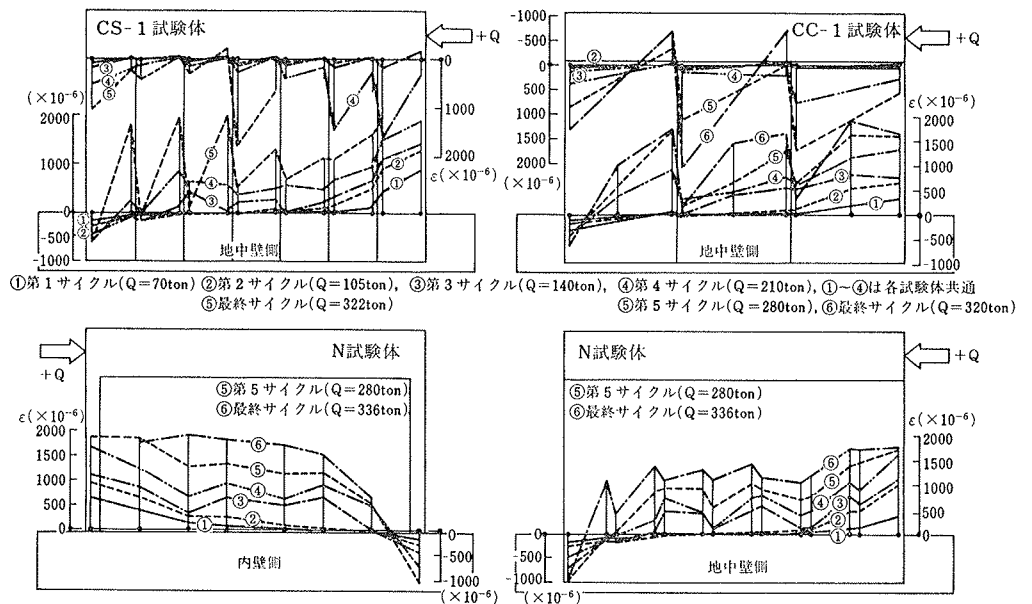


図-4 縦筋のひずみ分布

終局強度 $Q=280$ ton 近傍までは大差なく、合成壁の履歴性状は、一体壁のものとはほぼ同じであった。その変位性状には、曲げひび割れやせん断ひび割れが発生し、これらが増加進展しても急激な剛性低下などは認められず、合成壁が一体壁として挙動していた。

各試験体の終局強度時の相対水平変位 δ_h （部材角 R ）は、 $\delta_h=7.8\sim 11.8$ mm（ $R=4.2\sim 6.4\times 10^{-3}$ rad.）で、各試験体は、通常のRC壁の実験結果 $R=4\times 10^{-3}$ rad.と同等以上の靱性を有していた。また、終局強度に達した後、最大 $\delta_h=92.5$ mm（ $R=50\times 10^{-3}$ rad.）まで変形させたが、いずれの試験体も150～200 ton 近傍まで急激に剛性が低下したものの、それ以後100 ton 前後の荷重を維持しつつ変位のみが増大した。

3.4. ひずみ

各サイクルの最大荷重時（正荷重）における縦筋とはり接合筋のひずみ分布を図-4と5に示す。

合成壁の地中壁側における縦筋脚部のひずみ分布は、

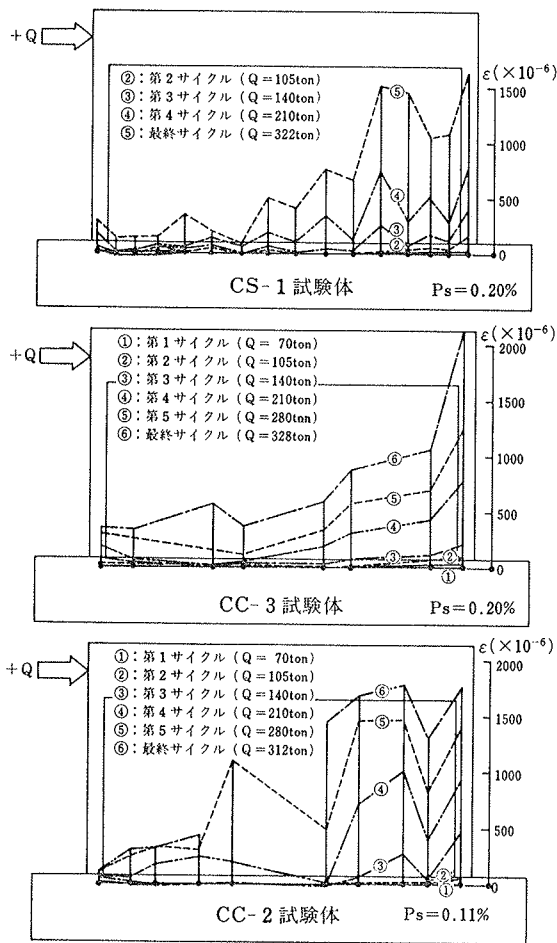


図-5 はり接合筋のひずみ分布

終局強度時を除いて、定性的には一体壁の分布とほぼ同様な性状を示した。終局強度時のひずみ分布は、転倒モーメントによる圧縮力が作用する領域では、単位地中壁とつなぎばりとで構成する矩形ラーメンとして個々に挙動する傾向が認められた。この傾向は、第4サイクル以後の縦筋頭部にも認められ、耐力が上昇するに従って、合成壁の一体性が徐々に失われていったことを示しているものと考えられる。また、内壁側のひずみ分布は、終局強度時まで一体壁の分布とほぼ同じ性状であった。定量的には、内壁側のひずみが地中壁側よりもやや大きい値を示しており、これは、内壁と地中壁とでせん断力の負担割合が多少相違することを示唆している。

$p_s=0.2\%$ のはり接合筋を配したCS-1とCC-3のひずみ分布は、転倒モーメントによる圧縮力が大きく作用する外端を頂点とする三角形分布を示した。外端近傍の接合筋にかなり大きいひずみが生じているものの平均値的には比較的小さく、接合部は、終局強度時においても破壊に至る兆候は認められず健全であった。これに対して、 $p_s=0.11\%$ を配したCC-2のひずみ分布には、中間部の接合筋が降伏ひずみに達するなどかなり大きい値が生じており、はり接合筋比の影響が認められた。

今回の実験では、はり全接合面積の0.20%をはり接合筋として配することをはり接合部設計の基本方針としたが、この実験結果から、 $p_s=0.20\%$ のはり接合筋を配すれば、壁部分がせん断破壊する以前に、はり接合部が致命的な破壊に至ることはないと考えられる。

4. 結び

地中壁とこれに接して後打ちする本体内壁とを一体化した合成壁による地下耐震架構が地震時の面内水平力を受けた時の構造性能について、縮尺（実物の約1/10）模型の合成壁による架構の水平加力実験を行ない検討した。この実験結果をまとめると以下ようになる。

- (1) 地中壁がカッティングジョイント壁体の合成壁は、試験パラメータ①地中壁の種類、②はり接合筋比、③単位地中壁の長さ幅比および④地中壁と脚部つなぎばりとの接合法などの影響をほとんど受けることなく、通常の一休壁とほぼ同等の強度性状と変位性状を有する。
- (2) 地中壁がスクリーン壁体の合成壁における終局強度は、壁接合筋を配さないと一休壁の終局強度よりも小さくなるが、壁接合筋として $p_s=0.1\%$ 程度配すれば一休壁とほぼ同等の強度を発揮する。
- (3) 合成壁の地中壁と脚部つなぎばりとの接合部は、はり接合筋として $p_s=0.2\%$ 程度配すれば、終局強度時においても健全で、終局強度以後の大変形時においても、はり接合部が致命的な破壊に至ることはない。
- (4) 合成壁の地中壁と内壁とでせん断力の負担割合は均等でなく、地中壁の負担割合が内壁よりやや小さい傾向にあるが、合成壁は一休壁として評価できる。その終局強度は、既往のせん断終局強度式で評価できる。

謝 辞

この研究の一部は、東京電力(株)の委託により、東電設計(株)と共同で実施したものであり、関係各位の御協力、御助言に対し、深く感謝致します。

参考文献

- 1) 武田, 小畠: 地中連続壁の地下構造体としての利用, コンクリート工学, Vol. 13, No. 2, (Feb. 1975), pp. 12~21
- 2) 入沢, 菊地, 小畠, 武田: カッティング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
- 3) 日本建築学会: 壁式プレキャスト鉄筋コンクリート造設計規準・同解説, (1982)
- 4) 広沢雅也: 既往の鉄筋コンクリート造耐震壁に関する実験資料と解析, 建築研究資料, No. 6, (1975)