

ソイルセメント壁の芯材を利用した合成構造に関する実験的研究

竹内 博幸* 富田 祐介**

要 旨

ソイルセメント壁の芯材と鉄筋コンクリート造地下壁をスタッドコネクタで一体化した合成壁は、構築後に合成梁のような形状となり、地下工事の合理化および本設壁厚の低減に有効である。既報^{1)~3)}では、スタッド量などをパラメータにした構造実験により合成梁としての構造性能が確認された。一方、大深度掘削を行う工事の場合、芯材(H形鋼)を建て込む際に鉛直方向の精度を確保しても、スタッドが壁筋に届かない場合がある(精度 1/200で、芯材長が 20mを超える場合など)。また、既往文献^{5),6)}にも示されるように、地下外壁では外防水工法が採用される事例も多く見られる。本研究では、このような条件下で合成壁としての構造性能を把握するために、当該部分を模擬した試験体により曲げせん断実験を行った。本報では、既往の実験結果とも整合させて、スタッドと壁筋のあき、および芯材と地下壁間の防水層が合成梁の構造性能に及ぼす影響についてそれぞれ検証した。

1. はじめに

RC 壁と芯材(H形鋼)からなる合成壁(本報では、これを「RCS 合成壁」と称する。)の曲げせん断性能の評価において、既報^{1)~3)}による各種実験により、下記に示す①~⑧の項目について構造性能を確認した。

今回は、既報^{1)~3)}の曲げせん断実験において明確化されていない、許容誤差内でシアコネクタと壁筋が離れた場合について(⑨)、および地下外壁において防水層が形成された場合について(⑩)、合成壁の構造性能を確認することを目的とし、計4体の試験体につき曲げせん断実験を実施した。

なお、今回の実験は、短期設計荷重までの性能確認とするが、載荷自体は終局(最大耐力の確認)まで実施している。

(1) 既報^{1)~3)}の曲げせん断実験での確認項目

- ① コンクリート強度の影響
- ② シアコネクタ壁筋の位置関係による影響
- ③ 合成度の影響
- ④ 残留応力の影響
- ⑤ 芯材とコンクリートとの界面付着の影響
- ⑥ 形鋼コネクタを用いた合成壁の挙動
- ⑦ シアコネクタ(頭付きスタッド)の配置による影響
- ⑧ 曲げモーメントの方向による影響

(2) 今回の曲げせん断実験での確認項目⁴⁾

- ⑨ シアコネクタと壁主筋が離れた場合の構造性能
許容施工誤差内で壁筋とスタッドが離れた場合の合成壁の性能を確認する。離れは、50mm、100mmとした(芯材 H形鋼:L=20m、同建て込み精度:1/200 に準拠)。
- ⑩ 界面に防水材料を適用した場合の構造性能
RC 壁-芯材界面に吹付け式防水材料(厚み=4mm)を施工

した場合の構造性能を確認する。

なお、合成度、鋼材およびコンクリートの材料試験値、RC 壁のせい等が若干異なるために厳密な比較はできないが、定性的な傾向を確認するため、既報^{1),3)}の試験体 No.1(鉄筋との離れがない標準モデル)および No.17(界面にテフロンシートを施工)を比較対象としている(表-2参照)。

また、地下合成壁への Fisher 式(式(1)参照)⁷⁾の適合性に関しては、既往の(一般)評定時に実施した実験(直接せん断試験)で確認されていることから、本実験では曲げせん断実験で Fisher 式を基に算定した設計荷重を満足すること、および既往の実験結果と同等の変形性状、構造性能を有することで、その適合性を確認する。

$$q_s = 0.5 s_c a \sqrt{F_c \cdot E_c} \quad (1)$$

記号 $s_c a$: 頭付きスタッドの軸部断面積

E_c : コンクリートのヤング係数

F_c : コンクリートの設計基準強度

q_s : 頭付きスタッドのせん断耐力

2. 実験概要

2.1 試験体

今回の試験体諸元を表-1に示す。また、既報^{1)~3)}の試験体諸元を表-2に示し、これまでの性能検証の経過を示すとともに、今回の試験体との関係性を図示した。

また、各試験体の形状と実験因子の関係を図-1~4に示す。試験体は、実大規模とし、いずれも芯材となる H 形鋼(H-400×200×8×13)を 450mm 間隔で配置した合成壁の一部を抜き出した形状の計 4 体とした。

* 技術研究所 建築技術開発部

** 建築本部 技術部

表一 試験体諸元(本報)

No.	F _c (N/mm ²)	シアコネクタ					RC 配筋 (W)	RC 壁厚 (mm)	残留 応力	加力 方向	界面 付着
		種類	本数	配置	合成度	長さ(mm)					
1	24	頭付き スタッド	26	均等	0.5	120	3-D16	400	無	正	有
2			26		0.5			450			
3			52		1.0			450			
4			26		0.5			400			無(防水材)

鉄筋とスタッドの離れ
:50mm、100mm

表二 試験体諸元(既報^{1)~3)})

防水材とテフロンの違い

No.	F _c (N/mm ²)	シアコネクタ					RC 配筋 (W)	RC 壁厚 (mm)	残留 応力	加力 方向	界面 付着	
		種類	本数	配置	合成度	長さ(mm)						
1	24	頭付き スタッド	26	均等	0.5	120	3-D16	300	無	正	有	
2			40		0.75				有			
3			52		1.0				無			
4			26	端部集中	0.5	180	3-D16	350**	無	正		
5												負
6										有		
7												正
8			負									
9				有								
10			正									
11	負											
12		有										
13	正											
14		負										
15	有											
16		正										
17	負											
18		有										
19	正											
20		負										
21	有											
22		正										
14	48		22	0.5	120	3-D16	300	無	正	有		
15	14	0.25										
16	24	端部集中	8	0.15	3-D16	400	無	正	有			
17										14	0.25	200
18												
19										300	有	
20	無											
21		形鋼	@400	均等	0.3	—	300	有	正	有		
22	コネクタ	@800	0.15	—	無							

実験因子としては、スタッドと壁筋の離隔距離、合成度(n_p/n_r)、防水材の有無とし、RC 壁は離隔距離に応じた厚さとした。なお、合成度とは、 n_p (合成梁の1スパンに配置された頭付きスタッドの本数)と n_r (完全合成梁の1スパンに必要な頭付きスタッドの本数)の比を示す。また、防水材には、厚さ4mmのゴムアスファルト系の塗膜材を使用し、試験体 No.4 のみを対象に RC 壁と芯材の界面に吹き付けた。スタッドは、長さ120mmの頭付きスタッドを150mm間隔で均等に配置し、試験体 No.3 のみ合成度を1.0にするため2列とした。

試験体に使用した鋼材およびコンクリートの材料試験結果を表-3、4に示す。

表三 材料試験結果(鋼材)

部材	呼び名 板厚	材質	降伏 応力 (N/mm ²)	降伏 ひずみ (μ)	ヤング 係数 ($\times 10^5$ N/mm ²)	引張 強さ (N/mm ²)	破断 伸び (%)
壁筋	D16	SD295A	357.1	2099	1.75	502.2	18.6
H形鋼 ウェブ	8mm	SS400	346.4	1737	1.96	478.5	33.9
H形鋼 フランジ	13mm	SS400	269.5	1374	2.09	454.6	41.4

表四 材料試験結果(コンクリート)

試験体	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
No.1	24.2	2.58	2.46
No.2	24.8	2.61	—
No.3	24.8	2.56	—
No.4	25.2	2.69	2.31

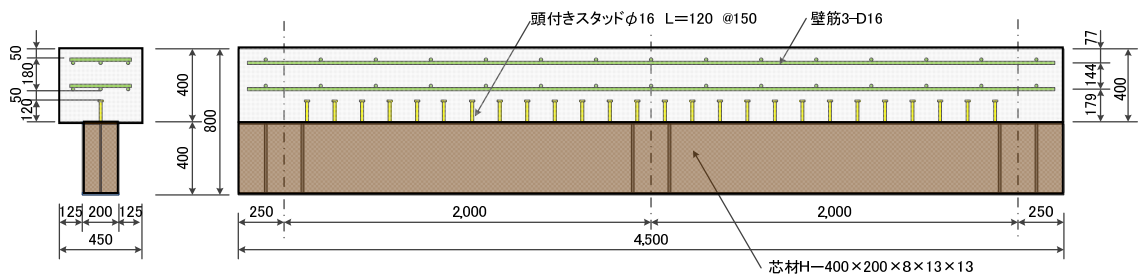


図-1 試験体 No.1(鉄筋離れ=50mm、合成度=0.5)

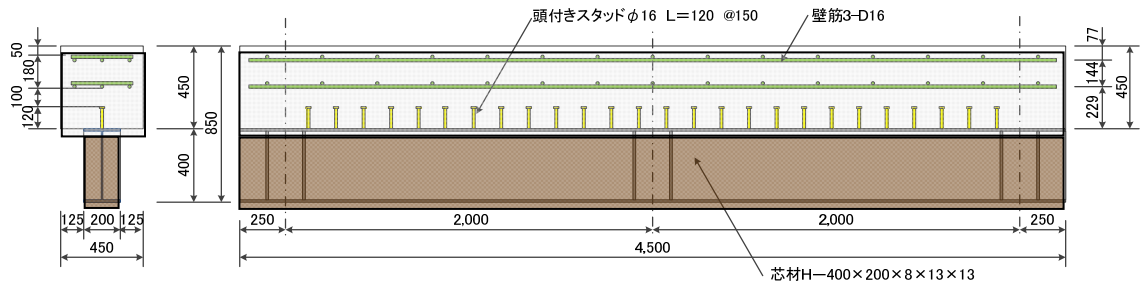


図-2 試験体 No.2(鉄筋離れ=100mm、合成度=0.5)

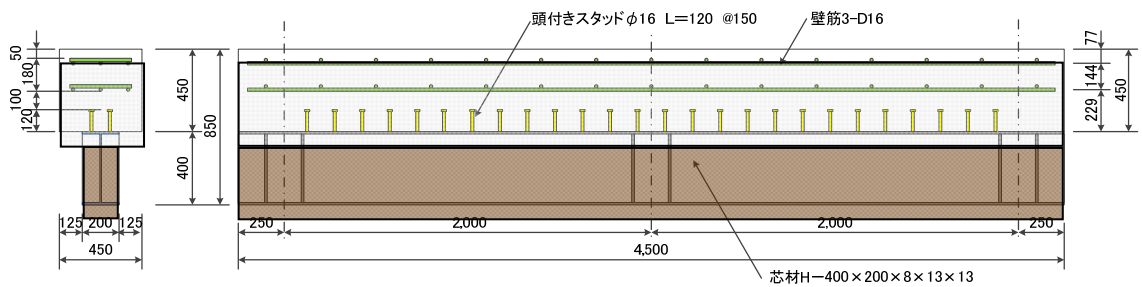


図-3 試験体 No.3(鉄筋離れ=100mm、合成度=1.0)

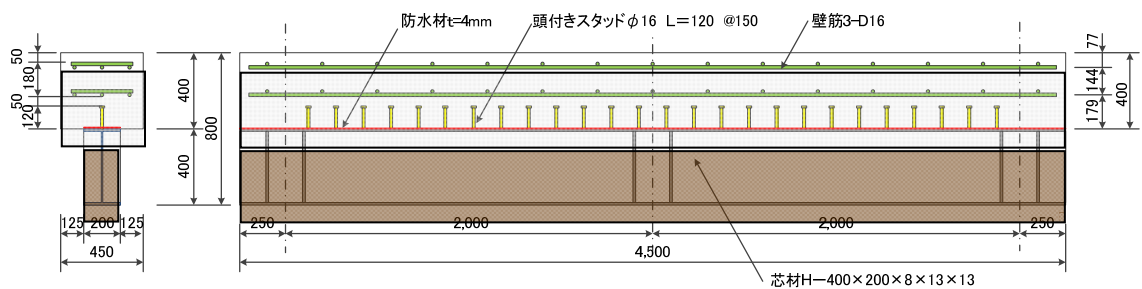


図-4 試験体 No.4(鉄筋離れ=50mm、合成度=0.5、防水材:t=4mm)

2.2 載荷および計測

合成壁(芯材+地下壁)の外力と応力状態(例)を図-5に示す。この状態における曲げモーメントの最大値は、正曲げ区間で発生するため、本実験は正曲げ(RC壁:圧縮、H形鋼:引張)を対象に実施した。本実験に用いる載荷装置の概要を図-6に示す。

加力方式は、試験体両端を4mスパンのピンローラー支持とする単調載荷とした。載荷は、最大耐力までは荷重制御とし、最大耐力以降は、変位60mmまで変位制御とした。

本実験では、以下の計測項目について測定を行った。図-7に変位計、図-8にひずみゲージの貼付位置を示す。

【計測項目】

- ・荷重:ロードセル(載荷点)
- ・変位:載荷点変位、鉄骨フランジ面たわみ(鉛直方向)
鉄骨部とRC部の界面の相対ずれ(鉛直・水平方向)
- ・ひずみ:鉄骨の上下フランジ、鉄筋、スタッド、コンクリート面
- ・破壊状況:ひび割れ計測、カメラ撮影

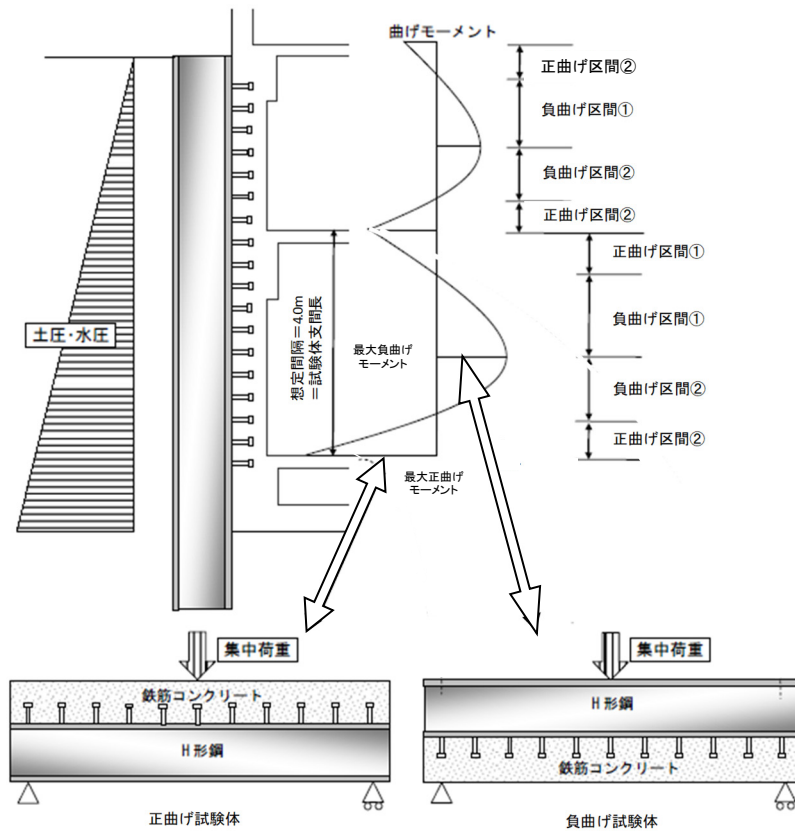


図-5 合成壁(芯材+地下壁)の応力状態と構造実験の関係

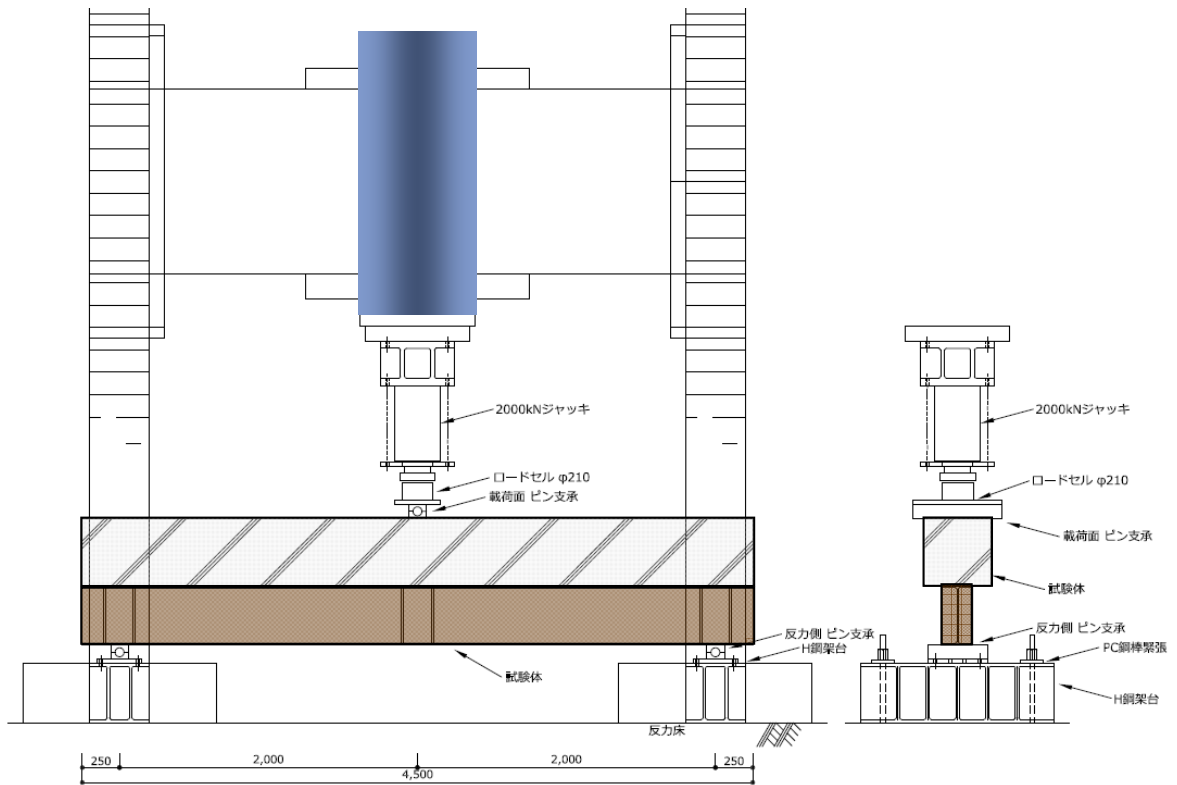


図-6 荷装置概要

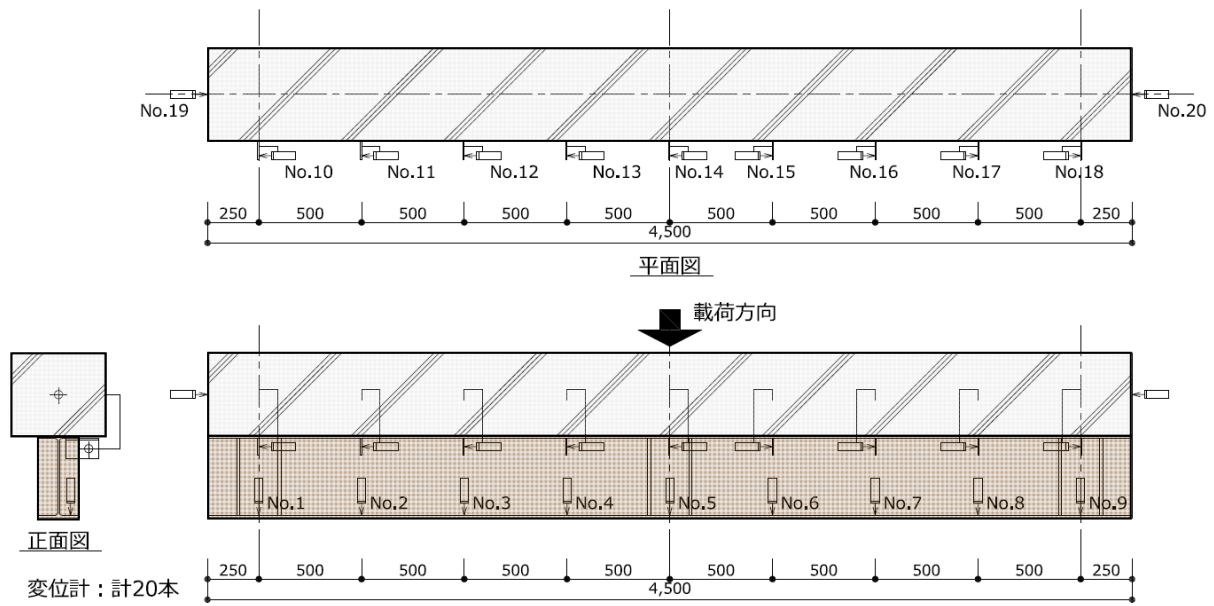


図-7 変位計配置位置

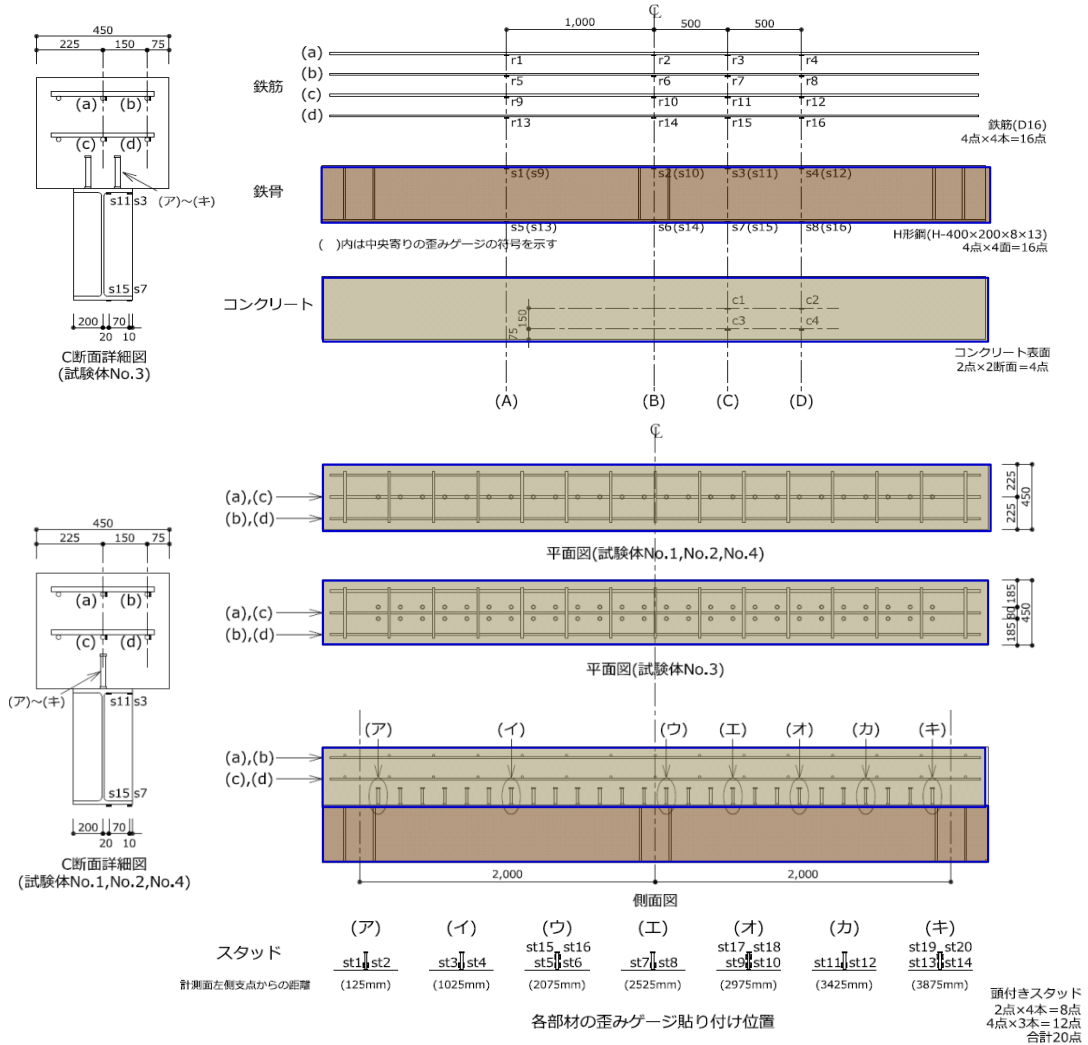


図-8 ひずみ計取付け位置

3. 実験結果

3.1 破壊性状

各試験体の荷重終了後の破壊状況を写真-1に示す。なお、本稿で示す計算値(長期・短期設計荷重)は、材料試験結果より算定した合成度に基づき、日本建築学会「各種合成構造設計指針・同解説」⁷⁾(以下、「学会指針」と呼ぶ)に準拠して計算した値である。

本実験での破壊過程はすべての試験体において共通であり、大きなきしみ音とともに荷重点直下のRC部下端に曲げひび割れが発生し、その後荷重の進行に伴い、芯材下端(下フランジ)の降伏およびRC壁の曲げせん断ひび割れの進行が視られ、せん断破壊により最大耐力が決定している。また、曲げひび割れは、荷重が長期設計荷重の約0.5倍に達したときに発生したが、それに伴う耐力低下等の変化は特に認められなかった。試験体No.1~No.3は斜め方向のせん断ひび割れ、試験体No.4は荷重点直下の曲げひび割れの進展が顕著であった。

なお、試験体No.4のみ荷重点直下の曲げひび割れ幅が拡大した。ここで、曲げひび割れが生じる直前の応力状態、すなわち長期設計荷重の0.3~0.4倍時点での断面内ひずみ分布を図-9に示す。図-9に示すように、他の試験体と比べてNo.4では界面に防水材料があるため、RC

壁とH形鋼が平面保持を維持できず、RC壁に作用する引張応力が大きくなったためと考えられる。

3.2 実験値と計算値の比較

実験結果一覧を表-5に示す。同表中に示される計算値(設計荷重)は、前節での経過を経て算定された値であり、各試験体いずれにおいても、実験値の降伏耐力 P_y (芯材の下フランジの降伏により決定する)が短期設計荷重を上回っており、学会指針による計算方法を適用することで、実験値の耐力を安全側に評価できることを確認した。

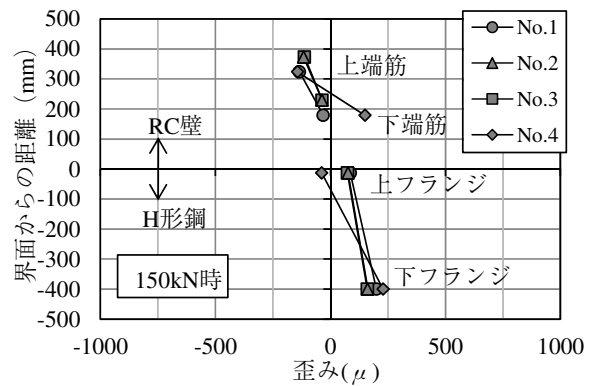


図-9 断面内のひずみ分布(荷重点直下)

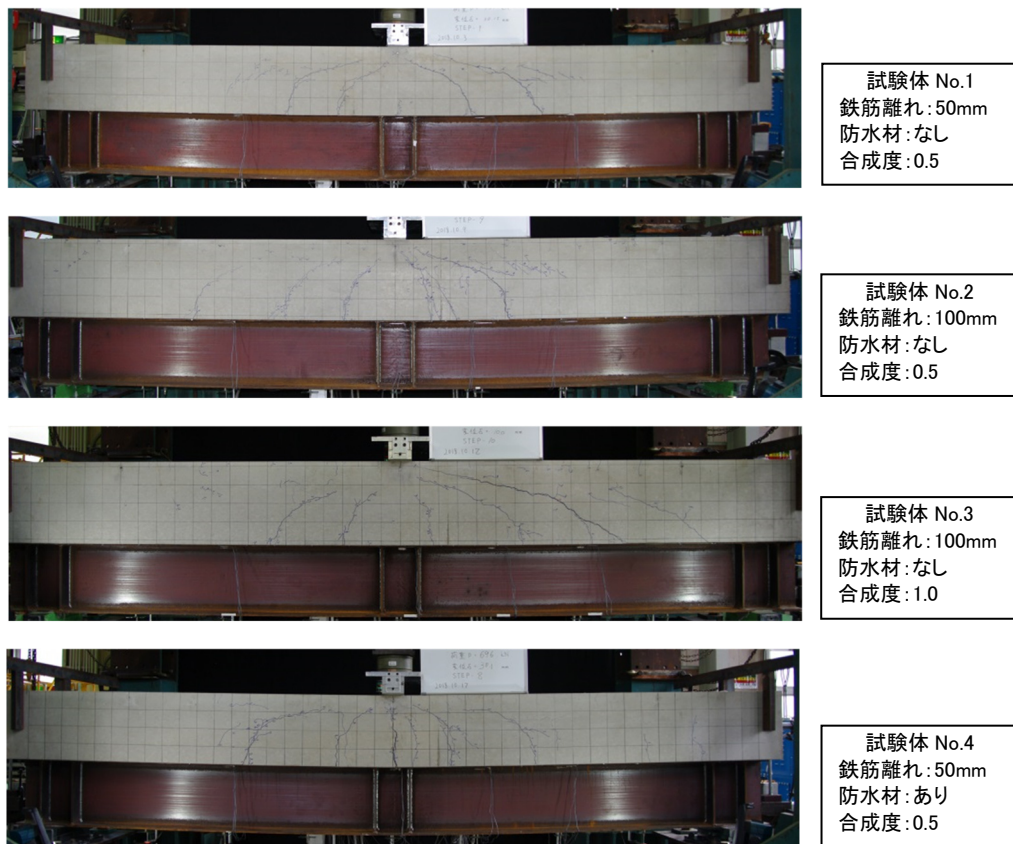


写真-1 最大耐力到達時の破壊(試験体 No.1~No.4)

表－5 実験値と計算値の比較

試験体	合成度 n_p/n_f	実験値			計算値(設計荷重)			k_e/k_c	P_y/P_s
		初期剛性 k_e^{*1} (kN/mm)	降伏耐力 P_y^{*2} (kN)	最大耐力 P_{max} (kN)	初期剛性 k_c (kN/mm)	長期 P_L (kN)	短期 P_s (kN)		
No.1	0.46	148	743	758	135	393	596	1.10	1.25
No.2	0.47	139	715	779	158	434	652	0.88	1.10
No.3	0.93	124	957	959	207	449	785	0.60	1.22
No.4	0.48	93	641	705	137	401	602	0.68	1.06
No.1 (既報)	0.34	142	672	795	92	299	448	1.54	1.50
No.17(既報)	0.26	88	567	801	86	266	399	1.02	1.42

※1: 初期剛性の実験値は、長期設計荷重(P_L)の1/3の点から、その点をさらに3等分した割線剛性の平均値を採用した⁸⁾。

※2: A～D断面のいずれかが降伏した荷重、全ての試験体でH鋼芯材の下フランジが降伏した。

3.3 初期剛性

各試験体の長期設計荷重の1/3の範囲の割線勾配を初期弾性とし、学会指針⁷⁾に示された下式の断面2次モーメント評価式を考慮して、材料試験結果を用いて算定した結果を図－10に示す。

$$eI = sI + \sqrt{\frac{n_p}{n_f}}(cI - sI) \quad \text{断面2次モーメント評価式(2)}$$

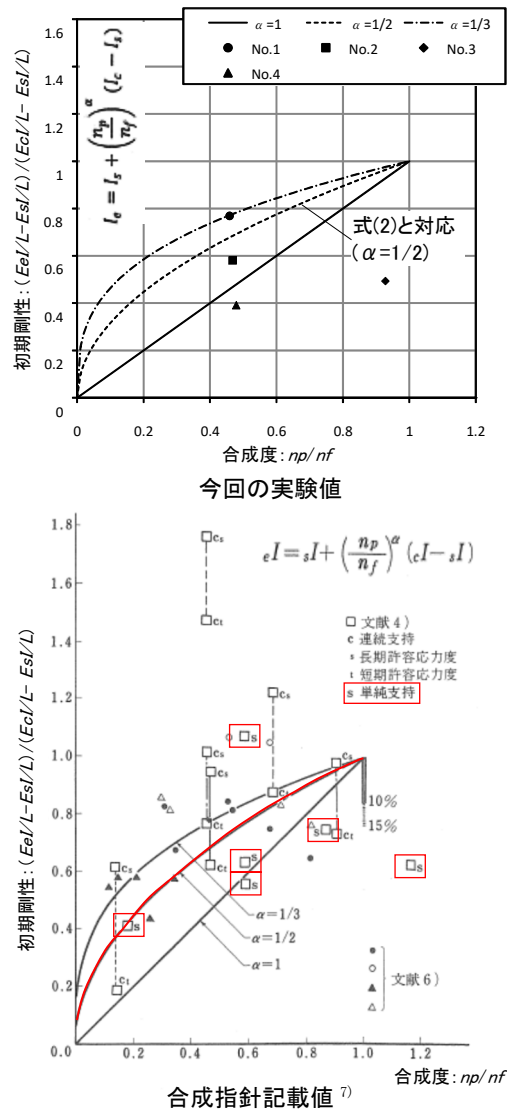
- eI : 不完全合成梁の断面二次モーメント
- sI : 鉄骨梁の断面二次モーメント
- cI : 完全合成梁の断面二次モーメント
- n_f : 完全合成梁の1スパンに必要な頭付きスタッドの本数
- n_p : 合成梁の1スパンに配置された頭付きスタッドの本数

実験結果より、試験体 No.1 以外の試験体は、何れも初期剛性の実験値が計算値($\alpha=1/2$)を下回っていることが分かる。ここで、各種合成構造設計指針⁷⁾に示される単純梁形式の試験結果においても、1体を除くすべての試験体で実験値が計算値を下回っている。これより、合成梁の初期剛性については、学会指針⁷⁾に示される試験結果と同様の傾向を示すことが分かった。

3.4 RCS 合成壁の曲げせん断実験結果: 面外方向

ここでは、まず「⑨シアコネクタと鉄筋の離れ」が RCS 合成壁の面外方向の構造性能に及ぼす影響について確認する。

- ⑨ 鉄筋の離れの違いー試験体 No.1: 鉄筋の離れ 50mm
試験体 No.2: 鉄筋の離れ 100mm
既報の試験体 No.1: 鉄筋の離れ 0mm



図－10 初期剛性と合成度の関係

図-11 に鉄筋の離れの異なる試験体の荷重-変形関係の比較を示す。試験体により RC 壁の厚みが異なるため一概には評価できないが、長期設計荷重に到達するまでの剛性に大きな違いは見られなかった。また、最大荷重についても大きな差は見られなく、鉄筋の離れによる影響はほとんど見られないことが確認された。

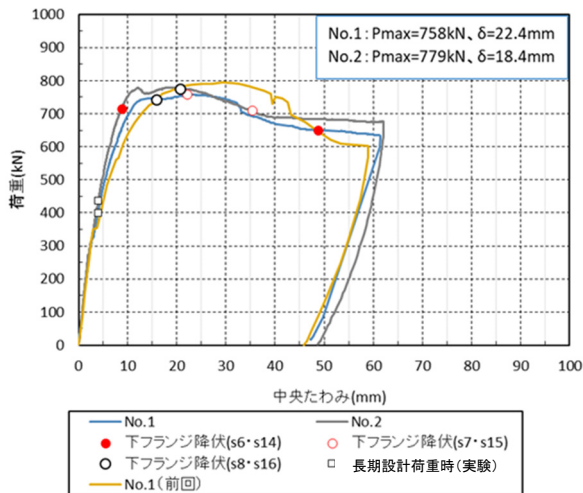


図-11 鉄筋の離れによる影響:面外方向

続いて、「⑩ 界面に防水材料を適用した場合の構造性能」について確認する。

⑩ 界面の違い—試験体 No.1:RC 壁と芯材が一体

(∵ コンクリートによる付着)

試験体 No.4:防水材料使用

既報³⁾の試験体No.17:テフロンシート使用

RC 壁—芯材界面の異なる試験体の荷重-変形関係の比較を図-12 に示す。長期設計荷重に到達するまでの剛性は、試験体 No.1 に比べて防水材料を使用した試験体 No.4 が低くなった。最大荷重についても、試験体 No.1 に対して、試験体 No.4 がやや低い値となった。

また、参考として既報³⁾の実験 (No.17) と今回の実験 (No.4) で得られたそれぞれの荷重-変形関係を比較した図-15 を参照すると、シアコネクタの配置や試験体の寸法 (RC 壁の厚み) が大きく異なるため、一概には比較できないが、鉄筋の離れおよび界面の材料の違い (テフロンシートと防水材料) があっても、荷重-変形関係は短期レベルまでは概ね同じ履歴を示していることが分かる。

3.5 RCS 合成壁の曲げせん断実験結果:面内方向

図-14 に、「⑨ 鉄筋の離れ」による影響を比較した載荷荷重-界面の水平変位の関係を示す。図中には、長期設計荷重を実線、短期設計荷重を破線で表示している。また、

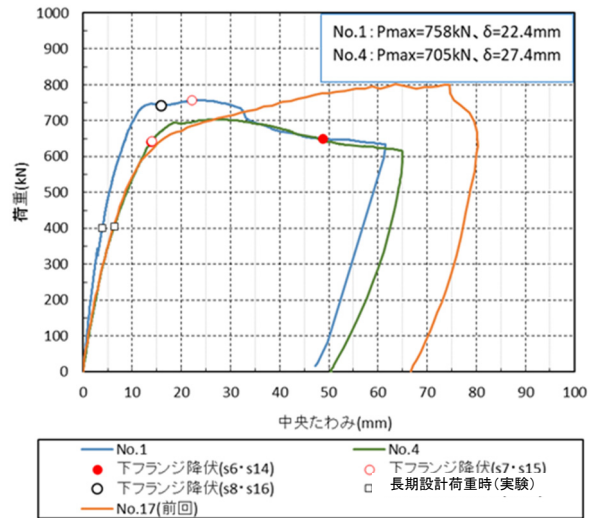


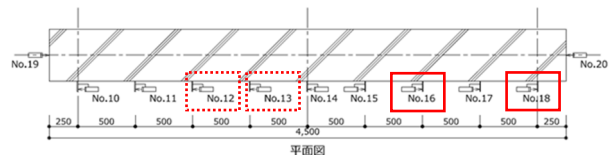
図-12 界面の違いによる影響:面外方向

比較した変位計位置 (No.16 と No.18) は、図-13 の変位計配置図に示されている。なお、既報²⁾の実験 (既報²⁾ 試験体 No.1) とは、変位計の設置位置が約 50mm 異なる部分があるものの、定性的な比較の範囲では、それほど影響を及ぼさない範囲と推察される。

これより、鉄筋の離れが 100mm (今回試験体 No.2) であっても、同 50mm (今回試験体 No.1、既報²⁾ 試験体 No.1) と荷重-変位の立ち上がり傾向は大差なく、また、短期設計荷重までは、水平変位が顕著に増加することはなかった。このことから「⑨ 鉄筋の離れ」は、この範囲であれば、合成壁の構造性能へ有意な影響を及ぼすものではないと推察される。

図-15 に、「⑩ 界面の違い」による影響を比較した載荷荷重-界面の水平変位の関係を示す。図中には長期設計荷重を実線、短期設計荷重を破線で表示している。また、比較した変位計位置は、やはり図-13 の変位計配置図に示されている。なお、これも既報²⁾の実験とは、変位計の設置位置が約 50mm 異なる部分があるが、定性的な比較にはそれほど影響を及ぼさない範囲と推察される。

図-13 に示す変位計の設置位置の中、鉄筋の離れによる影響は、部材端部と同中央部における構造的な性状の違いが分かるようにし、界面の違いによる影響は、各材料の付着性状が最も大きく顕れると考えられる部材中央部近傍とした。



□:鉄筋の離れによる影響(図-11)
□:界面の違いによる影響(図-12)

図-13 変位計の設置位置

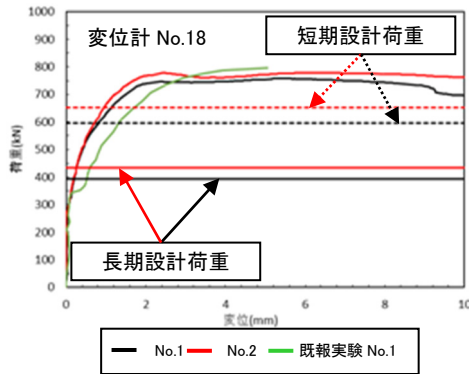
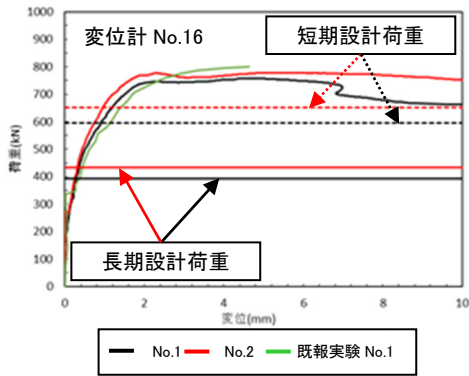


図-14 鉄筋の離れによる影響:面内方向

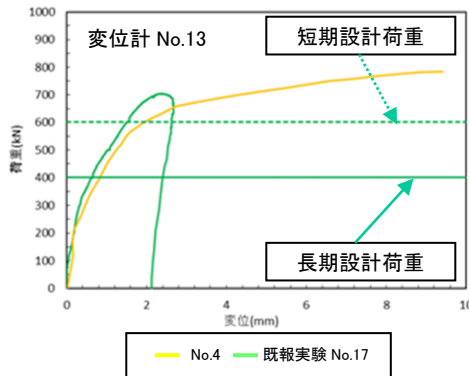
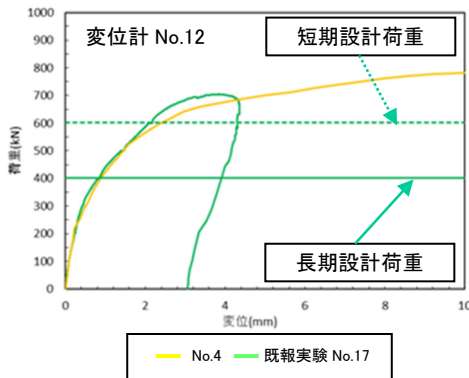


図-15 界面の違いによる影響:面内方向

図-15において、既報³⁾の実験値と今回の実験値を比較すると、界面の材料の違い(テフロンシートと防水材)があっても、荷重-変形関係は短期設計荷重までは概ね同じ値を示しており、いずれも水平変位が顕著に増加することはなかった。

以上より、当該実験の結果、⑨ 鉄筋の離れ、⑩ 界面の違い(防水材とテフロンシート)があっても、いずれも荷重-水平変位(ずれ)の関係は短期レベルまでは概ね同じ履歴を示している。また、いずれも短期設計荷重までは、水平変位が顕著に増加することはなかった。これらのことから、今回の実験の範囲では、芯材・RC 壁の一体性に対して有意な影響を及ぼすものではないと推察される。

4. まとめ

本実験では RCS 合成壁の設計において、以下(2)、(3)に示す課題点を明らかにするため、合成梁形式 4 体の試験体に対し曲げせん断実験を行った。その結果について、下記(1)に示す評価式により、既報^{1)~3)}による実験結果と併せて検討した結果、得られた知見を以下に示す。

(1) 合成度を考慮した評価式

本実験における試験体の各降伏耐力は、合成度を考慮した学会指針⁷⁾の Fisher 式に基づく評価式による短期設計荷重を 4 体すべてが上回った。

(2) シアコネクタと壁主筋との離れ

頭付きスタッド先端と RC 壁主筋の離れが 100mm 以下であれば、短期設計荷重までの合成壁としての構造性能はこれまでのスタッド先端が壁主筋にかかる場合と同等の性能(耐力・界面のずれ)であることを実験により確認した。

(3) 界面における防水材施工による影響

防水材を使用した場合の短期設計荷重までの合成壁としての構造性能は、通常の試験体(界面にコンクリートの付着があるもの)に比べ若干耐力・剛性が低下するが、Fisher 式に基づき算定された設計荷重を満足していることを確認した。また、既評定時に性能を確認した試験体(テフロンシート使用)と比較すると、短期設計荷重までの合成壁としての構造性能(耐力・界面のずれ)がほぼ同等であることを確認した。

本研究は、2018 年度に実施された、五洋建設、鉄建建設、戸田建設の 3 社による共同研究の成果の一部をまとめたものである。

【参考文献】

- 山浦一郎, 村田義行, 藤原達夫, 阪井真人, 中村良雄, 金子治:ソイルセメント柱列壁の有効利用に関する研究(その1:研究概要および直接せん断試験), 日本建築学会大会学術梗概集, pp.607-608, 1999.

- 2) 保井美敏, 金子治, 上嶋忠孝, 藤原達夫, 山浦一郎, 山尾憲一朗:ソイルセメント柱列壁の有効利用に関する研究(その2:曲げせん断実験), 日本建築学会大会学術梗概集, pp.610-611, 1999.
- 3) 山浦一郎, 山尾憲一朗, 永岡高, 藤原達夫, 千葉脩, 金子治:ソイルセメント柱列壁芯材の有効利用に関する研究(その4:低合成度曲げせん断実験概要および結果(1)), 日本建築学会大会学術梗概集, pp.587-588, 2000.
- 4) 野畑茂雄, 石渡康弘, 尻無濱昭三, 竹内博幸, 福田健, 佐野大作, 田口智也:ソイルセメント壁芯材の有効利用に関する研究(その1:曲げせん断実験), 日本建築学会大会学術梗概集, Vol.58, No.1, pp.705-706, 2019.
- 5) 日本建築学会:建築地下外防水の設計と施工の考え方, 2018.
- 6) 吉武謙二, 前孝一, 小川晃, 磯田和彦:土留め壁のH形鋼芯材を用いた合成壁の曲げ挙動に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.27, No.2, pp.1273-1278, 2005.
- 7) 日本建築学会:各種合成構造設計指針・同解説, pp.102-106, 2010.
- 8) 平野道勝, 石川孝重:負曲げ区間を有する不完全合成梁の挙動にスタッドコネクタの配置が及ぼす影響に関する実験的研究, 日本建築学会論文報告集, 第314号, pp.71-81, 1982.