

山留め H 形鋼を本設利用する「ATOMiK 合成壁」の開発

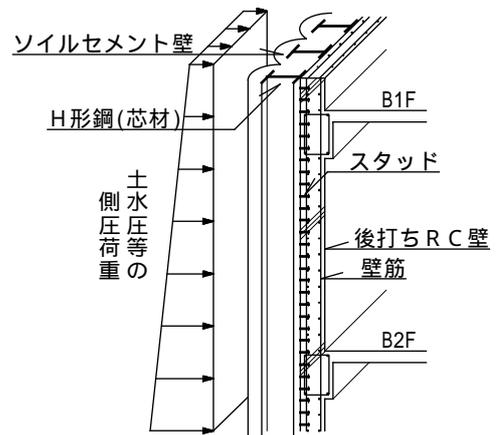
本社 黒澤 明
本社 古澤顯彦

概要：従来、仮設材としてのみ使用されてきた山留め H 形鋼を、頭付きスタッド（以下スタッド）を介して後打ち鉄筋コンクリート壁（以下後打ち RC 壁）と一体化することにより合成壁とし、本設の地下外壁として利用できる技術（ATOMiK 工法）の開発を行った。合成壁としての構造性能は、スタッドの本数（合成度）、正曲げ・負曲げにおける剛性・耐力、山留め使用時にかかる先行応力の影響をパラメータとして、実大試験体による実験を行い確認した。その結果、ATOMiK 工法は、土水圧等の側圧荷重に対し、合成壁として一体化していることを確認した。なお、本構法は、株式会社新井組、大木建設株式会社、株式会社熊谷組、東洋建設株式会社との共同研究により開発し、(財)日本建築総合試験所において建築技術性能証明を取得している。

キーワード：合成構造，頭付きスタッド，地下外壁，合成度

1. はじめに

仮設構造物である山留め壁に使用される H 形鋼は、かつては地下構造構築後引抜き、再利用することが一般的であった。しかし、山留め工法におけるソイルセメント壁工法の台頭、材料のコスト低下、近接施工箇所の増加、工期短縮によるメリット等の理由により、埋殺することが一般的になってきた。この仮設構造物である H 形鋼を、スタッドにより地下外壁と一体化し、合成壁とすることにより本設構造物として再利用するとともに、地下外壁の厚さを減少させ、地下空間の増大を図ることができる。本報告では、実物大試験体による曲げせん断実験について報告する。



2. 構法概要

図-1 に構法概要を示す。本構法は、仮設山留め壁の H 形鋼のフランジ面にスタッドを溶接し、後打ち RC 壁を打設して H 形鋼と RC 壁との一体化を図り、合成壁として本設の地下外壁とする構法である。

合成壁(梁)とは、鋼材と RC 壁(スラブ)をスタッドにより一体化し、壁厚(梁成)を大きくすることで剛性・断面性能を高める構造形式である。本構法の既存類似技術に対する特徴を以下に記す。

- 1) 形鋼材にソイルセメント壁工法の芯材の他親杭横矢板工法の H 形鋼を対象としている。
- 2) 完全合成梁の 1 スパンに必要なスタッド本数(n_i)に対する、配置したスタッド本数(n_p)の比率を合成度と定義し、合成度(n_p/n_i)を最小 0.25 としている。
- 3) スタッドと後打ち RC 壁との鉄筋の位置関係について特に規定を設けていない。

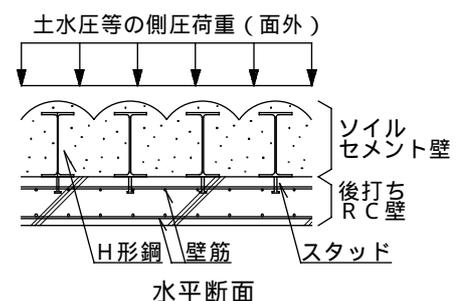


図-1 ATOMiK合成壁の概要



黒澤 明
技術本部
建築技術第二部



古澤顯彦
建築本部
建築部

3. 実験計画

(1) 試験体のパラメータ

本構法は、スタッドによるH形鋼とRC壁との合成構造であり、日本建築学会「各種合成構造設計指針・同解説」¹⁾(以下、合成構造指針)に準拠するが、本構法は土水圧に対する地下外壁を目的としているため、以下の点に着目し、試験体のパラメータを設定した。

- 1) 合成構造指針では、短期荷重である地震時を想定し、合成梁が塑性化する状態でのスタッド本数を定め、完全合成梁とすることを原則としている。しかしながら、本構法は土圧や水圧の長期荷重を想定し、弾性状態での使用を目的としている。したがって、完全合成梁として設計する必要はない。ただし、不完全合成梁とした場合、スタッドの弾性状態での耐力を確認する必要があるため、スタッド本数(合成度)による剛性・耐力を明確にする(CASE1~CASE3)。
- 2) 合成構造指針には、加力方向の異なる正曲げ・負曲げの設計が記されている。本実験では、次項に記述する先行応力導入試験体との比較を主目的として、加力方向の相違による剛性・耐力の確認を含めて設定した(CASE3~CASE4)。
- 3) H形鋼は後打ちRC壁を打設して合成壁を構築する前に、山留め壁として土水圧による応力を負担する必要がある。したがって本設地下外壁は、H形鋼に土水圧による先行応力が存在している状態で完成することとなる。この先行応力が合成壁の剛性・耐力に及ぼす影響を確認する必要がある。また、地下外壁は上下階のスラブで拘束されるため、正曲げ・負曲げの区間が明確に現れる。したがって、合成構造では一般的ではない負曲げの状態に関する剛性・耐力を確認することとした(CASE3・CASE6 および CASE4・CASE5)。
- 4) 山留め壁は、施工上本設躯体より掘削深さに応じて背面側に逃げ(クリアランス)を設定せざるを得ない。したがって、スタッドが壁筋に拘束されない状態で試験体を作成し、剛性・耐力に影響がないことを確認することとした(全試験体)。

表-1に、それに基づいて定めたパラメータを記述する。

表-1 試験体パラメーター一覧

試験体名	H形鋼	RC壁		スタッド		合成度 (n_p/n_f)	先行応力	加力方向
		圧縮強度	壁主筋	径・長さ	ピッチ・ゲージ			
CASE1	H-400 × 200 × 8 × 13	Fc 27N/mm ²	3-D16W	16 L=80	150W	1.0	なし	正曲げ
CASE2					300S	0.25		
CASE3					150S	0.5		
CASE4			800S		あり		負曲げ	
CASE5			150S					
CASE6			3-D16W		150S	あり	正曲げ	

(2) 試験体の形状および使用材料

試験体形状のうち、CASE3を図-2に示し、先行応力を考慮したCASE6を図-3に示す。

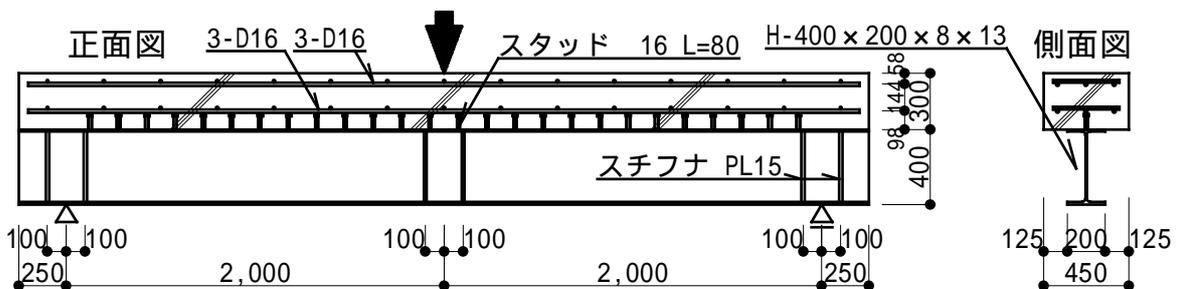


図-2 試験体形状(CASE3)

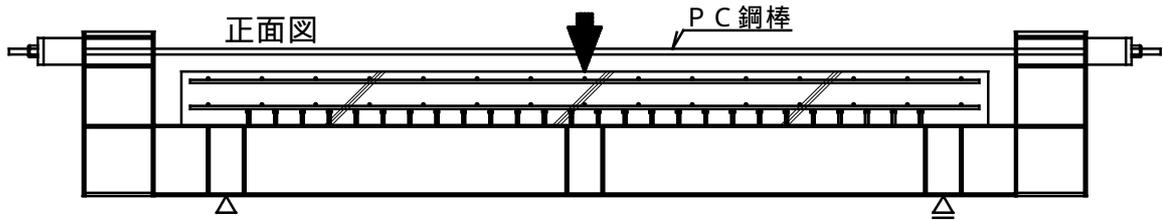


図 - 3 試験体形状 (CASE6)

試験体は合成壁とした地下外壁から取り出した実物大の形態とした。H形鋼は、ソイルセメント壁工法に使用されることが多いサイズとピッチである、H-400×200×8×13、@450mmとした。RC壁の厚さは地下2階程度を想定し300mmとし、スタッドは必要本数を均等配置した。また、加力時の座屈止めとして荷重点にスチフナを設けた。

図 - 3 に示した先行応力を導入する試験体では、PC 鋼棒をジャッキで緊張し、H形鋼に圧縮軸力と曲げモーメントを導入した後、コンクリートを打設した。導入する応力は、H形鋼最外縁 (RC壁と反対側) の応力度が 160N/mm^2 (長期許容応力度相当) となるまでとした。写真 - 1 に先行応力導入状況を示し、表 - 2 に使用材料の試験結果を示す。



写真 - 1 先行応力導入状況 (CASE6)

表 - 2 試験体材料の試験結果

試験体名	コンクリート(Fc27)		鉄筋(SD295A)		鉄骨(SS400)		スタッド	
	圧縮強度 (N/mm^2)	ヤング係数 ($\times 10^4 \text{N/mm}^2$)	降伏強度 (N/mm^2)	引張り強度 (N/mm^2)	降伏強度 (N/mm^2)	引張り強度 (N/mm^2)	降伏強度 (N/mm^2)	引張り強度 (N/mm^2)
CASE1	26.8	2.88	379(D16)	546(D16)	275	457	319	456
CASE2	33.4	3.21						
CASE3	27.0	2.94						
CASE4	34.7	3.18	376(D13)	534(D13)				
CASE5	34.8	3.16						
CASE6	35.2	3.22						

(3)実験方法

加力装置の概要を図 - 4 に示す。試験体は単純梁形式で支持し、加力は中央集中の一方向単調載荷 (鉛直方向下向き) とした。正曲げ試験体では RC 壁 (CASE1・2・3・6) が上側に、負曲げ試験体 (CASE4・5) では RC 壁が下側に位置するように設置した。なお、先行応力を有する試験体 (CASE5・6) は、先行応力導入用の治具を取り付けた状態で加力を行った。加力制御は荷重制御で行い、設計短期荷重を超えてから変位制御とした。

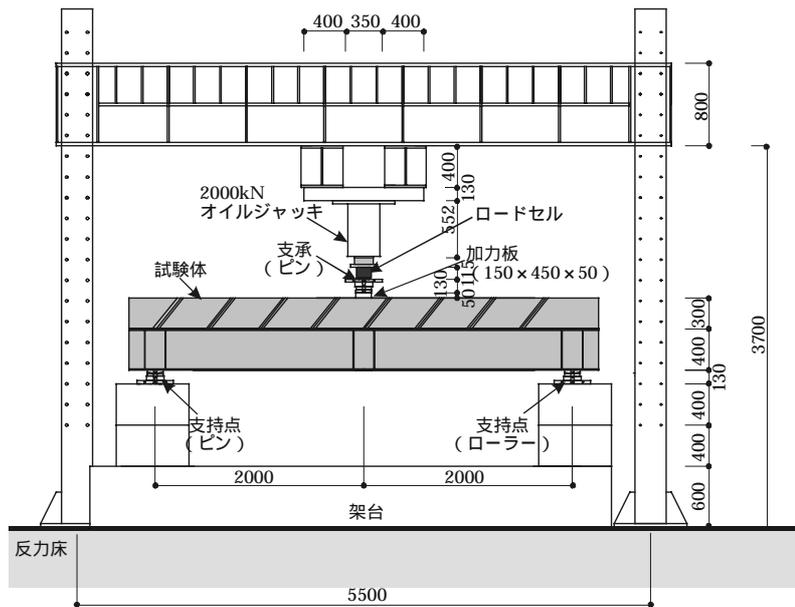


図 - 4 加力装置の概要

4. 実験結果

(1) 実験結果一覧

各試験体の実験結果一覧を表-3に示す。ひびわれ発生荷重は、目視によってひび割れ発生を確認した荷重としている。H形鋼とRC壁のずれ発生荷重は、H形鋼とRC壁の相対変位と、鉄骨、鉄筋およびスタッドのひずみ計測結果から判断した荷重である。

なお、同表には参考として、長期設計荷重、短期設計荷重を示す。ただし、設計荷重は、合成構造指針における合成梁の有効等価断面2次モーメントから縁応力度を算定し、その値が許容応力度に達する時の荷重として示した。

表-3 実験結果一覧

試験体名	実験条件			実験結果(kN)							計算値(kN)	
	合成度	先行応力	加力方向	曲げひびわれ発生荷重	H形鋼・RC壁のずれ発生荷重	せん断ひびわれ発生荷重	鉄骨の降伏荷重	鉄筋の降伏荷重	スタッドの降伏荷重	最大荷重	設計長期荷重	設計短期荷重
CASE1	1.0	なし	正曲げ	319	301	720	692	-	773	815	342	513
CASE2	0.25			315	341	500	514	657	351	706	263	394
CASE3	0.5			250	331	520	526	688	542	694	295	443
CASE4	0.5	あり	負曲げ	5	-	530	351	400	340	542	217	321
CASE5			正曲げ	20	-	500	208	330	300	571	217	321
CASE6			正曲げ	270	301	550	200	720	581	728	295	443

(2) 合成度による比較

スタッド本数が異なる正曲げ試験体(CASE1~CASE3)の荷重変位関係を図-5に示す。荷重-変位の勾配は、加力開始からずれ発生まで合成度による差は見られず、ほぼ線形となった。ずれ発生以後、合成度が減少するのに伴い、剛性低下が大きくなった。合成度0.5と0.25の試験体は剛性低下が徐々に進行し、最大荷重の前後も荷重の変化は少なかった。合成度1.0の試験体は、剛性低下は緩やかであったが、最大荷重以後急激に荷重が低下した。図-6に加力点における断面ひずみ分布を示す(図は合成度順に並べている)。下のグラフは縦軸の0の部分がH形鋼とRC壁の境界面であり、その上がRC部分、下が鉄骨部分のひずみを表している。

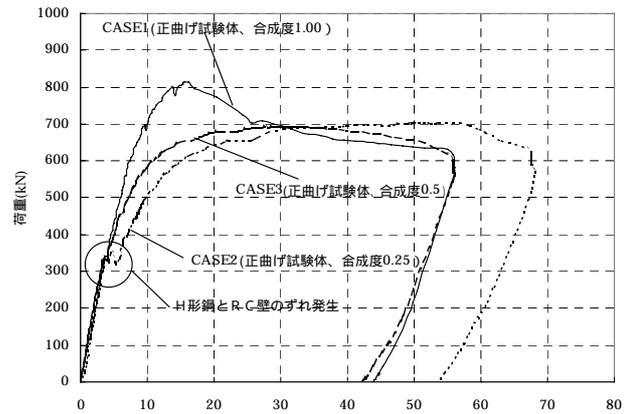


図-5 合成度の違いによる荷重-変位関係

下のグラフは縦軸の0の部分がH形鋼とRC壁の境界面であり、その上がRC部分、下が鉄骨部分のひずみを表している。

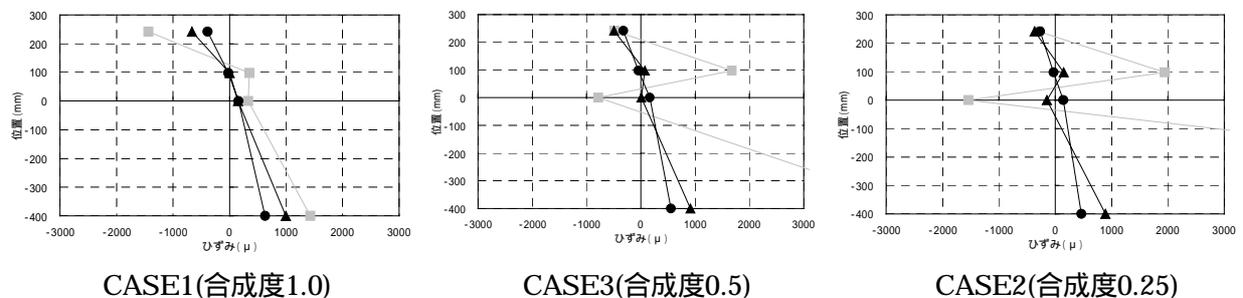
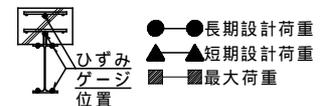


図-6 加力点における断面ひずみ分布



このグラフは、各測定点のひずみを結ぶ線が直線に近いほど平面保持が成立していることを表している(断面全体が一体化している)。これに対し、H形鋼とRC壁との間で線が折れている(稲妻型である)とずれが生じており、H形鋼とRC壁が別々の挙動を示していることになる(断面全体が一体化していない)。このことから、合成度が低くなるにしたがって、平面保持が成立しにくくなっていることがわかった。合成度1.0の試験体は、短期設計荷重時までほぼ直線を示し、H形鋼とRC壁は一体となって挙動した。また、最大荷重時に至っても平面保持が成立していた。これに対し、合成度0.5・0.25の試験体は、長期設計荷重時まででは直線を示すが、短期設計荷重時には、特に合成度0.25の試験体は稲妻型のひずみ分布を示した。さらに、最大荷重時には平面保持が成立せず、重ね梁の状態となった。写真-2に試験体セット時、写真-3に加力終了後の状況を示す。



写真 - 2 試験体セット時(正曲げ)

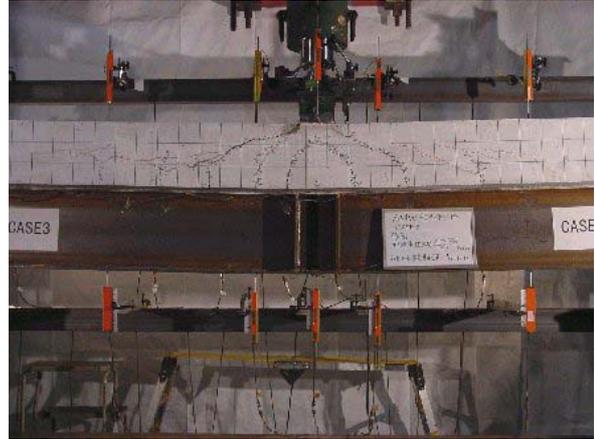


写真 - 3 加力終了時(正曲げ)

(3) 先行応力の有無による比較

先行応力の有無における正曲げ試験体(CASE3・CASE6)の荷重変位関係を図-7に示し、負曲げ試験体(CASE4・CASE5)の荷重変位関係を図-8に示す。

正曲げ・負曲げの試験体とも、先行応力の有無による剛性低下の状況や荷重変位の関係に、顕著な差は認められなかった。また、表-3に示したように、鉄骨の降伏荷重を除いて各ひびわれ発生荷重、降伏荷重、および最

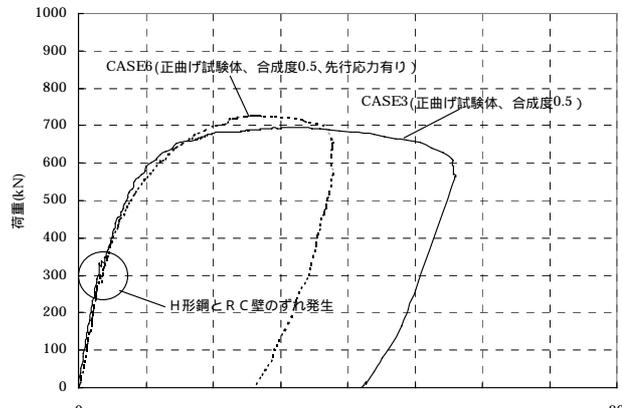


図 - 7 先行応力の有無による荷重 - 変位関係 (正曲げ)

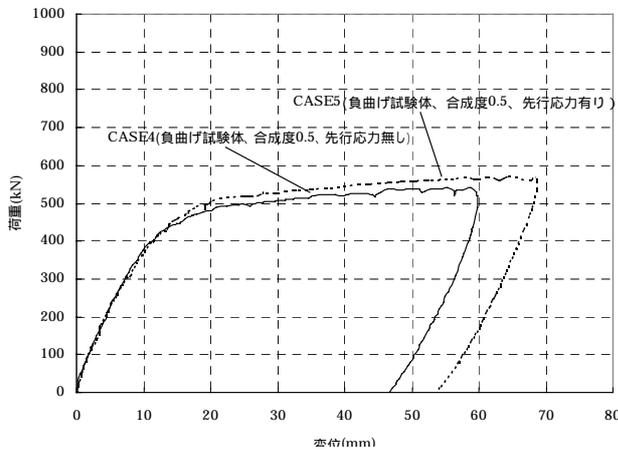


図 - 8 先行応力の有無による荷重 - 変位関係 (負曲げ)

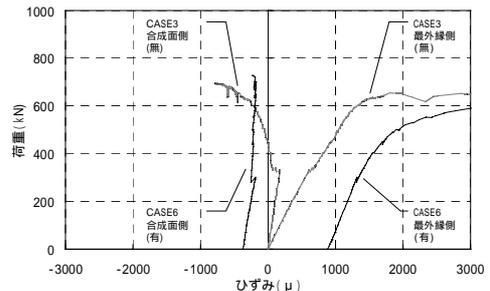


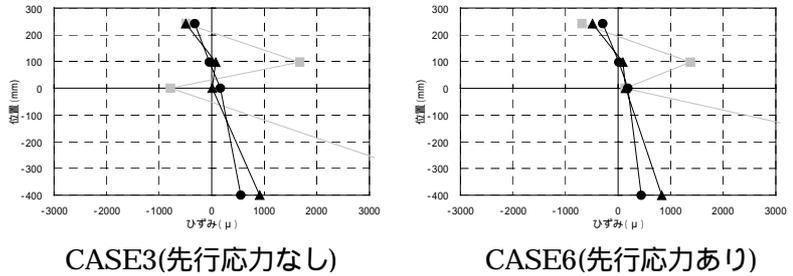
図 - 9 先行応力の有無によるH形鋼の荷重 - ひずみ関係

大荷重に顕著な差は認められなかった。図-9にH形鋼加力点のフランジ面に貼付したひずみゲージ状況を示す。先行応力ありの試験体では、先行応力に相当する分初期ひずみが大きくなっているが、載荷後の荷重-ひずみの関係には顕著な差は認められなかった。

図-10に加力点における断面ひずみ分布を示す。先行応力がある試験体は、H形鋼のひずみは初期ひずみからの差分量で示している。

長期設計荷重時までは直線を示し、短期荷重時にもほぼ直線を示した。しかしながら、最大荷重時では、平面保持が成立せず、重ね梁の状態となった。この実験結果からは、先行応力の有無による平面保持の差は認められなかった。

図-11~13に加力終了時のCASE3(正曲げ),CASE4(負曲げ),CASE6(正曲げ,先行応力あり)のひび割れ状況図をそれぞれ示す。



CASE3(先行応力なし) CASE6(先行応力あり)

図-10 加力点における断面ひずみ分布

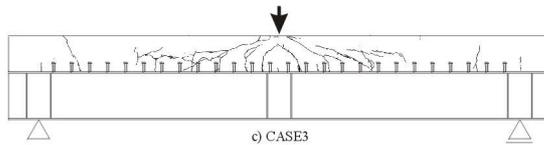


図-11 CASE3

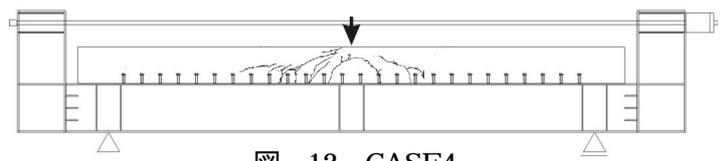


図-12 CASE4

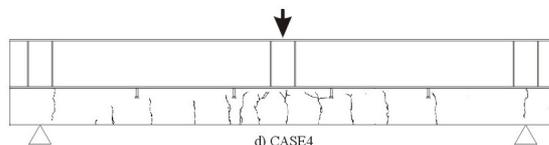


図-13 CASE6

5. 設計式

(1)終局強度における設計式の適用性

正曲げ試験体(CASE1~CASE3)および負曲げ試験体(CASE4)における最大荷重 P_{max} と、式(1)を用いて計算した各々の試験体の終局強度 dP の比較を図-14に示す。また、比較として、文献^{2,3}に示された既往の実験結果を加えた。なお、式(1)は、合成構造指針に基づいている。

$$P_u = sP + \sqrt{\frac{n_p}{n_f}} \cdot (cP_u - sP) \quad \dots\dots(1)$$

P_u : 終局強度

sP : H形鋼のみの終局荷重
($=4sM_p / l$)

sM_p : H形鋼のみの全塑性曲げモーメント
: 支点間距離

cP_u : 完全合成壁(梁)における終局荷重
($=4M_p / l$)

sM_p : 合成壁(梁)の全塑性曲げモーメント

n_p / n_f : 合成度

n_p : 設計合成壁(梁)に使用するスタッド本数

n_f : 完全合成壁(梁)とした場合に必要スタッド本数

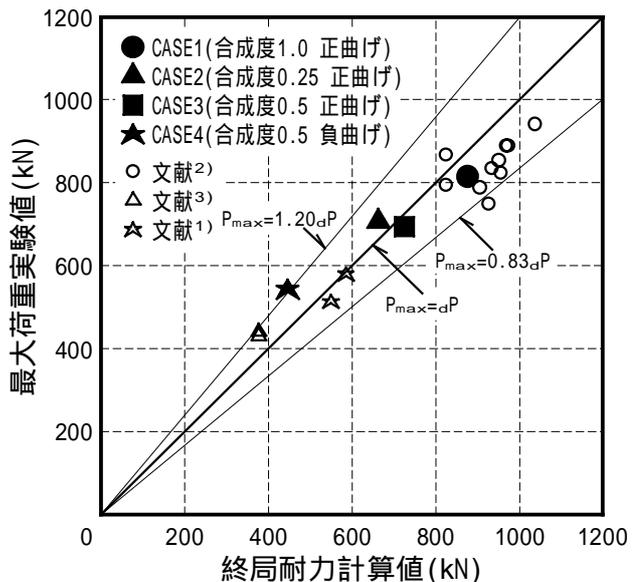


図-14 最大荷重実験値 - 終局荷重計算値関係

今回の実験では、最大荷重は式(1)に基づいて求めた計算値の0.83～1.2倍の範囲にあり、本合成壁における式(1)の使用の妥当性を示していると判断した。また、既往の実験結果とも差が認められなかった。本実験では、前述したように、スタッドをRC壁の鉄筋にのみこませているが、本実験の結果と合成構造指針による式との適合性が認められると判断できるため、スタッドのRC壁の鉄筋との位置関係は特に規定する必要はないと考えた。写真-4に実験終了後のスタッドの状況を示す。



写真-4 加力終了後のスタッド状況

(2) 許容応力度における設計式の適用性

正曲げ試験体(CASE1～CASE3)および負曲げ試験体(CASE4)における実験値と計算値の比較を図-15に示す。実験値の短期許容荷重は、圧縮または引張り側のいずれかの材料が許容応力度に達した時点の荷重とした。本実験では、正・負曲げいずれの場合も、鉄骨がRC壁の鉄筋に先行して降伏したため、鉄骨最外縁のひずみが降伏ひずみを示した時の荷重を短期許容荷重とした。また長期許容荷重は、鉄骨最外縁のひずみが降伏ひずみの2/3を示した荷重とした。計算値の長期・短期許容荷重は、材料試験結果(表-2)を使用して求めた。

実験値と計算値の比較から、短期荷重時ではCASE1を除きよく一致し、本合成壁における合成構造指針の式(2)～(5)の使用の妥当性を示したと判断した。長期荷重ではすべての試験体において実験値が計算値を上回っており、式(2)～(5)は安全側の結果を与えると判断した。

正曲げに関する式

$$\frac{M}{\frac{eZ}{f_b}} \leq 1.0 \quad \dots\dots(2)$$

$$\frac{M}{\frac{cZ_c}{f_c}} \leq 1.0 \quad \dots\dots(3)$$

負曲げに関する式

$$\frac{M}{\frac{eZ}{f_b}} \leq 1.0 \quad \dots\dots(4)$$

$$\frac{M}{\frac{cZ_t'}{f_t}} \leq 1.0 \quad \dots\dots(5)$$

f_b : 形鋼材の許容曲げ応力度 (N/mm²)

f_c : コンクリートの許容圧縮応力度 (N/mm²)

f_t : 鉄筋の許容引張り応力度 (N/mm²)

eZ : 合成壁(梁)の有効等価断面係数 (mm³)

cZ_c : 正曲げモーメントを受ける完全合成壁(梁)の圧縮側断面係数 (mm³)

cZ_t' : 負曲げモーメントを受ける完全合成壁(梁)の圧縮側断面係数 (mm³)

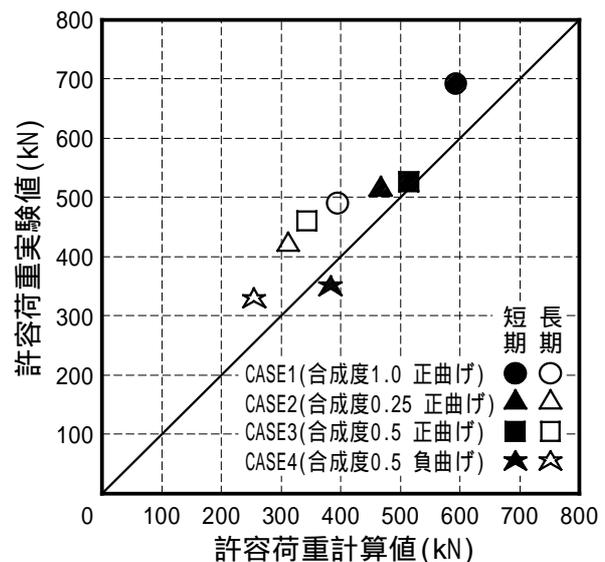


図-15 許容荷重実験値 - 許容荷重計算値関係

6, まとめ

ATOMiK 工法の開発を目的とした実験により、以下の結論を得た。

1. 合成構造指針の設計式に準拠して設計可能である。
2. 合成度は、地下壁に作用する応力に応じて 1.0 ~ 0.25 の値をとることが可能である。
3. H 形鋼は山留め壁として使用するため、施工時には土水圧による応力が H 形鋼のみに発生するが、その先行応力による影響は小さい。
4. H 形鋼に打設するスタッドは、必ずしも後打ち RC 壁の鉄筋にのみこませる必要はない。

以下に、ATOMiK 工法を採用するにあたっての留意事項を示す。

1. 設計が終了している際は構造体の変更を行う必要があり、建築確認を再提出する必要がある。
2. H 形鋼は新品材としなければならない。また、ロール発注となるため、納期も確認する必要がある。
3. スタッドの溶接姿勢は横向きとなる。通常の資格では、横向き溶接の場合スタッド径 16mm までとなっている。したがって、スタッド径が 19mm 以上の設計となっている場合は、あらかじめ技量試験を行い、合格者のみが施工を行う。

参考文献

- 1) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説, 1985
- 2) 保井他：ソイルセメント柱列壁形鋼材の有効利用に関する研究（その2）,（その3）曲げせん断実験（1）,（2）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.609 ~ 612, 1999
- 3) 筒井他：ハイブリッド地下壁に関する実験的研究（その1） ~ （その6）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.653 ~ 664, 1997