

5. ハイブリッド地下壁工法に関する研究 ～ 性能確認実験 ～

内井 栄二 富岡 章*
木村 建治 恩村 定幸
森 浩二

要 旨

ソイルセメント柱列壁に使用している芯材を、スタッドコネクタで本設の地下壁と連結し一体化して合成構造とするための設計法を確立するのを目的として、押し抜きせん断試験と曲げせん断試験を行った。その結果、スタッドの終局せん断耐力の算定にはJ.W.Fisherらが提案した式を適用できることなどを確認した。

キーワード

地下壁／ソイルセメント柱列壁／合成構造／スタッド／ハイブリッド

目 次

1. はじめに
2. 工法の概要と設計上の問題点
3. 押し抜きせん断試験
4. 曲げせん断試験その1
5. 曲げせん断試験その2
6. 総 括
7. あとがき

5. STUDY ON HYBRID BASEMENT WALL METHOD ～ PERFORMANCE VERIFICATION TEST ～

Eiji Uchii Akira Tomioka
Kenji Kimura Sadayuki Onmura
Koji Mori

Abstract

For the purpose of establishing a design method for integrating soil cement mixing wall into a hybrid structure by connecting H-shaped steels used as core material in the soil cement mixing wall with the permanent underground wall with stud connectors, push-out tests and bend-shear tests were conducted. The results include the confirmation of applicability of the equation proposed by J. W. Fisher and others to the calculation of the ultimate shear strength of stud connector.

* 大阪本店建築部

1. はじめに

建物の地下工事を行う場合、山留め壁にソイルセメント柱列壁を用いることが多いが、そのソイルセメントの中にH形鋼が芯材として挿入されている。H形鋼は山留め壁にかかる側圧を負担するために挿入されたものであり、一般に地下工事が完了しても、埋め殺されたままになっている。このH形鋼を仮設材として使用するだけでなく、本設の構造物として活用できれば、コストの低減は勿論、資源の活用にもつながることから、「ハイブリッド地下壁研究会」を組織して工法の開発に取り組んだ。本報では、当工法の概要と設計法確立のために実施した各種試験結果について報告する。

2. 工法の概要と設計上の問題点

2.1 工法の概要

「ハイブリッド地下壁 (Hybrid Basement Wall) 工法」とは、建物の構造体であるRCの地下外壁とソイルセメント柱列壁のH形鋼とを、コネクタ (以下スタッドという) を用いて接合一体化した工法である。図-1にハイブリッド地下壁の平面詳細を示す。

本工法は、以下のような特長を持つ。

- 地下外壁のコンクリートと鉄筋の量を減らすことができ、躯体のコストダウンが図れる。
- 従来埋め殺していたH形鋼を活用できるので、資源の有効利用にもつながる。
- 地下外壁の壁厚を薄くできることから、地下階の床面積が増加する。

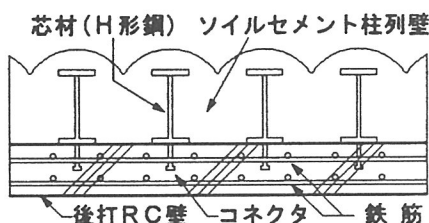


図-1 ハイブリッド地下壁平面詳細

2.2 設計上の問題点

既知の通り、H形鋼とRC部材をスタッドで接合することにより、両者が一体となって曲げに抵抗する構造は、上部構造においては「合成ばり」として確立 (日本建築学会「各種合成構造設計指針・同解説」) されている。ハイブリッド地下壁工法の考え方もこれに準拠しているが、地下構造物であるがゆえに、その設計方法をそのまま使用するには以下のような問題 (不明) 点が考えられた。

- ①地下壁に高強度コンクリートを用いた場合の耐力への影響
- ②スタッドの配置 (ピッチ) による影響
- ③H形鋼の建て込み精度が悪い場合のスタッドの位置による影響
- ④スタッドに防錆剤を塗布した場合の影響
- ⑤掘削時の側圧によって先行応力を受けているH形鋼に、応力を受けていないRC壁を接合した場合の影響

設計方法を確立するためには、上記問題点を解決することが必要であった。

3. 押し抜きせん断試験

3.1 試験の目的

コンクリート中に埋め込まれたスタッドの終局せん断耐力は理論的にはまだ十分に解明されていないが、このハイブリッド地下壁構造を設計するにあたり、J.W.Fisherらが整理・提案した次の実験式を採用することとした。

$$q_s = 0.5 a_{sc} \sqrt{F_c \cdot E_c} \quad \dots\dots\dots \text{式(1)}$$

記号 q_s : スタッドの終局せん断耐力 (kgf)

a_{sc} : スタッドの軸部断面積 (cm²)

F_c : コンクリートの設計基準強度 (kgf/cm²)

E_c : コンクリートのヤング係数 (kgf/cm²)

この式の適用範囲は

$5000 \text{ kgf/cm}^2 \leq \sqrt{F_c \cdot E_c} \leq 9000 \text{ kgf/cm}^2$ として、この上限を越えるものは 9000 kgf/cm^2 とする。

上記提案式が下記にあげるケースにあてはめられるかどうか、その妥当性を確認するための試験を行うことにした。

- ①後打ち壁に高強度コンクリートを使用して式(1)の $\sqrt{F_c \cdot E_c}$ が 9000 kgf/cm^2 を越えた場合

②H形鋼の建て込み精度等により壁筋とスタッドの位置関係が設計時と異なった場合（無筋位置にスタッドを配置した）

③スタッドに防錆剤を塗布した場合

④スタッドの打ち直し等で打設ピッチが狭くなった場合

3.2 試験体

Fisherらが提案した実験式に試験結果をプロットすることを念頭において、表－1にあげるケース1～5の試験体（Eurocodeをアレンジ）を各ケース毎に3体（a, b, c）ずつ作製した。表－1にその試験体の種類を、図－2に試験体の詳細を示す。なお、合成面の摩擦をキャンセルするために、いずれの試験体においてもコンクリート打設前に鉄骨表面にグリースを塗布した。試験体に使用した材料の物性を表－2に示す。

3.3 荷重方法等

荷重方法は一方向漸増とし、加圧板を介して鉄骨のフランジのみに加力した。荷重の測定はロードセルで行った。図－3に計測項目とずれの測点を示す。

3.4 試験結果

(1) 荷重－ずれ関係

各試験体の荷重－ずれの関係を図－4に示す。ずれは鉄骨部とRC部の相対ずれであり、試験体の8測点（各スタッド近傍）を平均した値である。

Case 1（標準）、Case 3（防錆剤塗布）は、 $P=40tf$ 程度まで線形を示し、終局荷重は式(1)で算出（図－4に表示）した値にほぼ等しい。

無筋状態のCase 2は、 $P=60tf$ 程度まではCase 1と近似した挙動を示したが、3体とも式(1)の計算値まで至らずに試験を終了した。

高強度コンクリートを使用したCase 4は、初期剛性がCase 1より若干高く、線形を示す荷重も45tf程度までであった。スタッド破断した試験体aのみが式(1)の計算値を若干下回った。

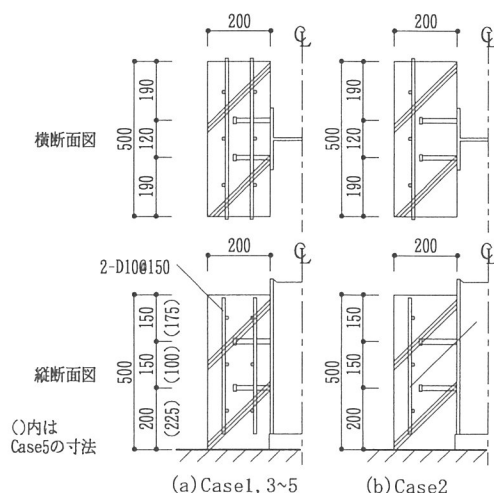
スタッドピッチを狭くしたCase 5もCase 1と同等の結果を得た。

Case 1, 4, 5の各試験では試験体bとcの2体ずつ横筋に歪みゲージを取り付けた。図－4中の横筋の降伏点に▼印を示したが、試験体の剛性の変化（ずれ）と横筋の降伏はほぼ無関係のようである。無筋状態のCase 2の結果と照し合せると鉄筋は主としてコンクリートの拘束に寄与しているものと考えられる。

表－1 押し抜きせん断試験体種類

試験体	H形鋼	F_c (kgf/cm ²)	配筋	防錆剤	スタッド
Case 1	200	240	ダブル	なし	8-φ16 ゲージ@120
Case 2			シングル		
Case 3	*200*8	420	ダブル	あり	ピッチ@150
Case 4	*12			なし	ピッチ@100
Case 5					

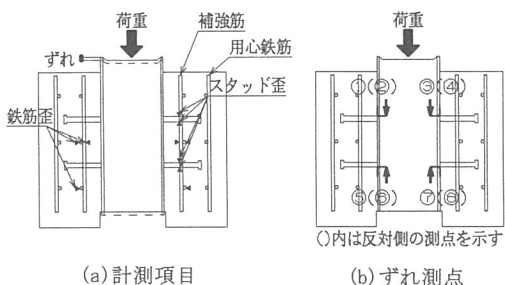
注) 配筋のシングル（Case 2）とは、無筋位置にスタッドを配置した場合（無筋状態）を想定したもの



図－2 押し抜きせん断試験体詳細（単位mm）

表－2 使用材料の物性

材料名	項目	Case 1 ～3, 5	Case 4
コンクリート	圧縮強度 (kgf/cm ²)	302	452
	ヤング係数 ($\times 10^4$ kgf/cm ²)	2.706	2.753
スタッド (φ16)	降伏強度 (kgf/cm ²)	3862	
	引張強度 (kgf/cm ²)	4440	



図－3 計測項目とずれの測点

(2) Fisher式適用の妥当性について

図-5にFisherらの研究成果と今回の試験結果をまとめて示す。無筋状態のCase 2を除くすべての試験体の終局せん断耐力は計算値をほぼ上回った。このことから以下のことが考察される。

- ①スタッドに防錆剤を塗布しても終局せん断耐力に影響はない。
- ②高強度コンクリートを使用した試験体の終局せん断耐力はほぼ計算値と同じである。
- ③今回の試験体程度の打設ピッチの減少では、スタッドの終局せん断耐力には影響を与えない。
- ④Case 2の終局せん断耐力は計算値をすべて下回っており、この結果は(1)荷重—ずれ関係でも述べたように、鉄筋がないためにコンクリートが拘束できなかったことに起因する。しかし既往の試験結果のばらつきの範囲内にはある。また、「各種合成構造設計指針・同解説」の86頁にもあるように、実際の地下壁ではスタッドの周辺は連続したコンクリートで拘束されているのに対して、今回の試験体は周辺が解放状態であることから考えると、スタッドの壁筋に対する呑込み長さが設計時と異なった（短くなった）状態になっても、その終局せん断耐力は式(1)の計算値を満足するものとする。

4. 曲げせん断試験その 1

4.1 試験の目的

ハイブリッド地下壁の面外曲げせん断挙動を把握するとともに、耐力算定式や考え方の妥当性を検証する目的で合成梁の試験を行った。具体的な検討項目は下記の通りである。このうち③については次章の「5. 曲げせん断試験その 2」で報告する。

- ①施工の関係上、スタッドの配置を集中させた場合
- ②後打ち壁に高強度コンクリートを使用した場合
- ③鉄骨に先行応力を与えた場合の応力負担状況

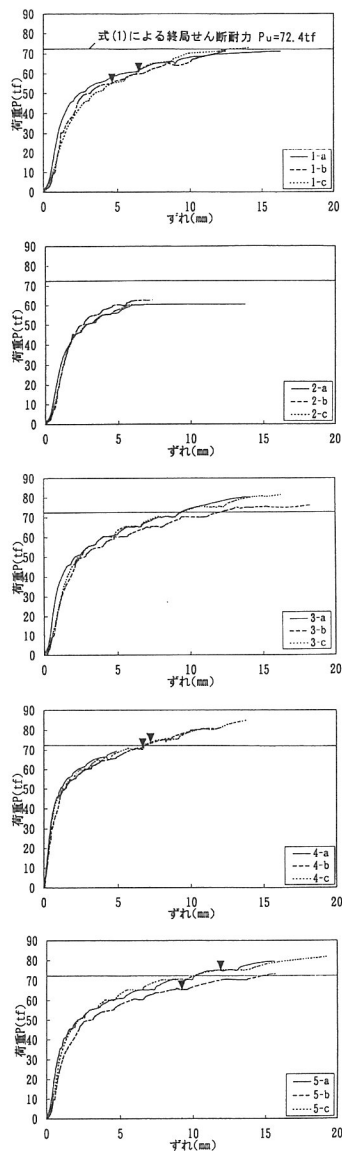


図-4 荷重—ずれ関係

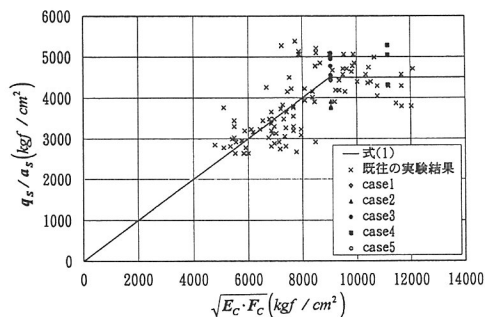
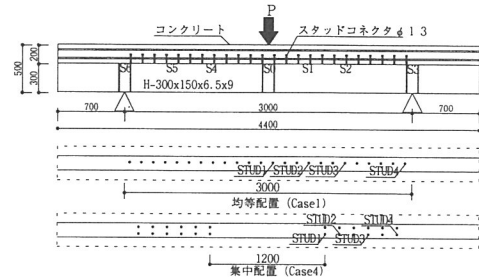


図-5 Fisherらの研究成果との比較

4.2 試験体

表－3 に試験体の種類、図－6 に試験体の詳細の一例を示す。表－3 には試験計画時の計画最大荷重を併記した。試験体に使用した材料の物性を表－4 示す。

試験体はハイブリッド地下壁の一部を取出した3/4模型である。パラメータとしては、応力状態、コンクリート強度、スタッド量およびスタッド配置であり、試験種類毎に3体（A，B，C）の試験体を作製した。載荷方法は一方向漸増とした。加力・支点位置は図－7 の通りである。



図－6 曲げせん断試験詳細（一例、単位mm）

表－3 曲げせん断試験体種類

試験体	応力	Fc	スタッド量 (np/nf)	スタッド 配 置	計 画 最 大 荷 重 (tf)
Case 1	正	240	24-φ13 (0.522)	均 等	24.1
Case 2			58-φ13 (1.261)		40.6
Case 3		420	20-φ13 (0.526)		24.1
Case 4	負	240	24-φ13 (0.522)	集 中	24.1
Case 5 Case10			6-φ13 (0.750)	均 等	14.9
Case 6			12-φ13 (1.500)		21.9
Case 7			28-φ13 (1.073)		46.2
Case 8			正負	56-φ13 (0.519)	
Case 9			28-φ13 (0.750)	正 規	46.2

注）表中の語句の説明

イ）応力

正（曲げ）：合成梁のRC部が圧縮側となる状態

負（曲げ）：上記の逆の状態

正負（曲げ）：試験区間に正曲げと負曲げの部分が両方存在する場合

ロ）Fc：コンクリート圧縮強度（kgf/cm²）

ハ）スタッド量（np/nf）

np：合成梁の1スパンに配置されたスタッドの本数

nf：完全合成梁としたときに1スパンに必要なスタッドの本数

ニ）スタッド配置

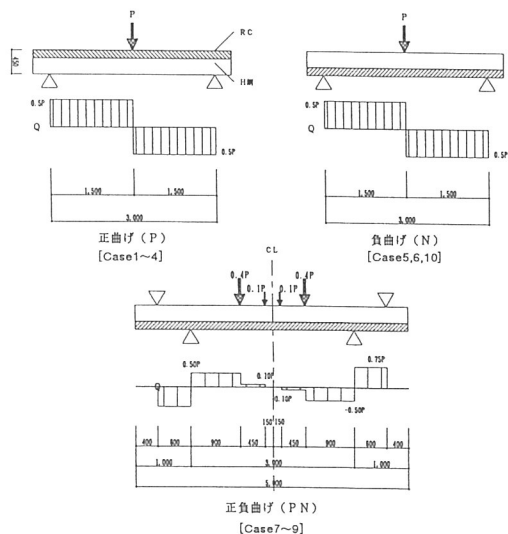
均等配置：スタッドの必要本数を全スパンで等間隔に配置したもの

集中配置：同上の本数を端部支点に集中して配置したもの

なお、Case10は5章の「曲げせん断試験その2」の試験体であるが、この表に記す。

表－4 使用材料の物性値

材料名	項 目	Case				
		1, 2	3	4	5, 6	7～10
コンクリート	圧縮強度 kgf/cm ²	341	462	299	340	269
	ヤング係数 tf/cm ²	270	276.3	231.3	272.3	226.3
スタッド (φ13)	降伏強度 kgf/cm ²	3,236				
	引張強度 kgf/cm ²	4,410				
鉄 筋 (2-D13)	降伏強度 kgf/cm ²	3,350				
	ヤング係数 tf/cm ²	2,100				
鉄 骨 (H300* 150*6.5)	降伏強度 kgf/cm ²	2,400				
	ヤング係数 tf/cm ²	2,100				



図－7 応力状態（単位mm）

4.3 試験結果

(1) スタッド配置による比較（正曲げ、正負曲げ）

スタッド配置に関する比較パラメータは、均等配置（Case 1）と集中配置（Case 4）である。前述したが、均等配置とはスタッドの所要本数を全スパン（この場合は左右対称な 0 モーメント～最大曲げモーメント点間）で等間隔に配置したものである。集中配置とは均等配置と同数のスタッドを端部支点（0 モーメント付近）に集中して配置する方法である。また、Case 1 と Case 4 のその他の諸元は全く等しい。表－5 に比較試験体の諸元および材料実強度から算出した設計荷重を示す。

(a) 荷重－たわみ関係

図－8 に荷重－中央部たわみ関係を示す。最大荷重は設計最大荷重 (P_U) を大きく上回っており、破壊モードは概ね鉄骨下端の降伏であった。初期剛性は Case 1 で $7.3 \sim 7.5 \text{ tf/mm}$ 、Case 4 で $7.1 \sim 9.1 \text{ tf/mm}$ となり若干集中配置の方が剛性が高くなっているが、あまりばらつきはない。また、弾性剛性の計算値を図中に破線で示しているが、いずれの試験体も不完全合成梁の剛性を若干下回っている。これは、試験体端部のずれを拘束していないために、曲げによって累積されるずれの影響がためである。

(b) 荷重－相対ずれ関係

図－9 に荷重と鉄骨－RC の相対ずれ関係の代表例を示す。ずれの量は、同じ荷重階で比較すると均等配置（Case 1）の方が大きくなるが、これはスタッド配置の影響によるものであると思われる。ただし、ずれが顕著に確認されたのはいずれも短期許容荷重 ($P_S = 18.7 \text{ tf}$) 以降であった。

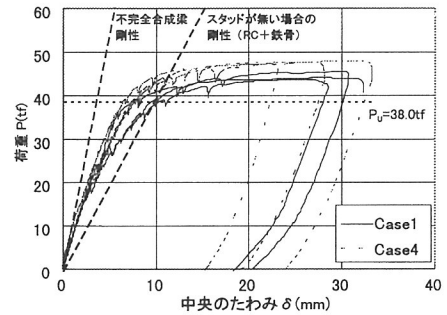
(c) スタッドの曲げ相当ひずみ分布

図－10 にスタッドの曲げ相当ひずみ分布（図のスタッド（STUD 記号）の位置は図－6 参照）を示す。短期許容荷重 ($P_S = 18.7 \text{ tf}$) 以降において、集中配置（Case 4）では接合面に発生するせん断力が全スタッドに均等に伝達されているのに対して、均等配置（Case 1）では端部ほどスタッドにせん断力が大きく働くような不均等分布になっている。さらに同位置でのスタッド同士を比較すると、集中配置の方が均等配置に比べてひずみが小さくなり、せん断力を有効に負担していることがわかる。これは(a)でも述べたように試験体端部のずれを拘束していないためと思われる。また、両試験体ともに長期

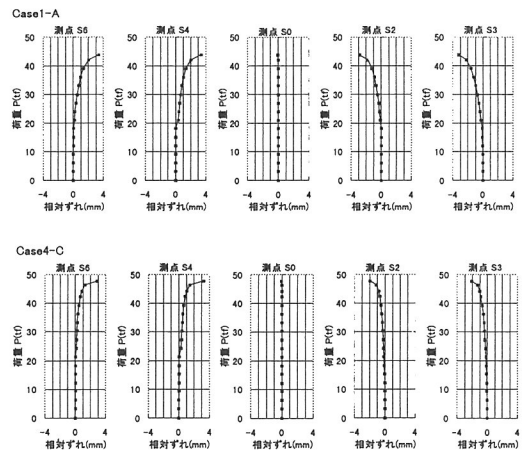
許容荷重 ($P_L = 12.4 \text{ tf}$) 以降にコンクリートと鉄骨の付着が切れてずれが増加しはじめるが、スタッドの塑性化が始まるのは短期許容荷重 ($P_S = 18.7 \text{ tf}$) 以降のようである。

表－5 試験体諸元、設計荷重

試験体	スタッド		設計荷重 (tf)		
	本数 (本)	スタッド量 (n_p/n_t)	長期 P_L	短期 P_S	終局 P_U
Case 1, 4	24	0.632	12.4	18.7	38.0



図－8 荷重－中央たわみ関係



図－9 荷重－相対ずれ関係

（測点No.位置は図－6 参照）

(d)まとめ

試験結果を比較して以下のことがわかった。

- ①不完全合成梁のスタッドを均等配置した場合でも、0 モーメント点（曲げ反曲点付近）に集中配置した場合でも、短期荷重時までは同等の性能が期待できる。
- ②不完全合成梁が曲げモーメントを受ける場合、最大曲げモーメント点から0 モーメント点（曲げ反曲点付近）に向かってずれが累積される傾向がある。コンクリートと鉄骨の付着強さにも依存するが、単一部材としてのせん断力分布と、スタッドのずれ量（曲げ）分布は必ずしも一致しない。

なおここでは実験の結果は割愛するが、Case 7 ～ Case 9 の正負曲げの試験に関しても同等の性能が確認されたことを報告する。

(2) コンクリート強度による比較（正曲げ）

コンクリート強度に関する比較パラメータは、通常よく使用される強度のコンクリート（Case 1）と高強度コンクリート（Case 3）である。スタッドの配置はともに均等配置である。表－6 に試験体の諸元および部材性能を示す。

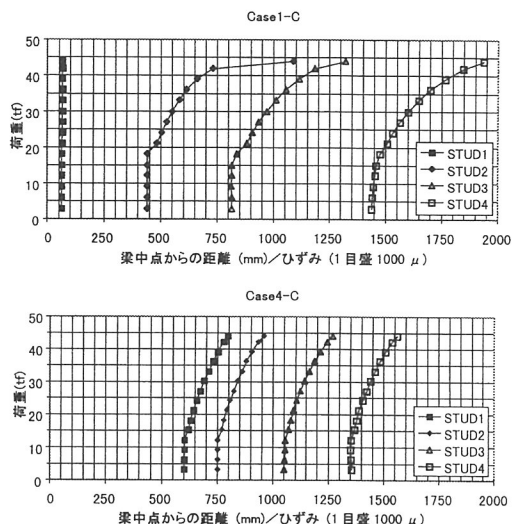
(a)荷重－たわみ関係

図－11 に荷重－中央たわみ関係を示す。図中には弾性剛性の計算値および設計最大荷重(P_u)を示した。終局荷重は、それぞれの設計最大荷重を大きく上回っており、ともに44～45tfと顕著な差はみられなかった。

(b)スタッドの曲げひずみ分布

図－12 にスタッドの曲げ相当ひずみ分布を示す。

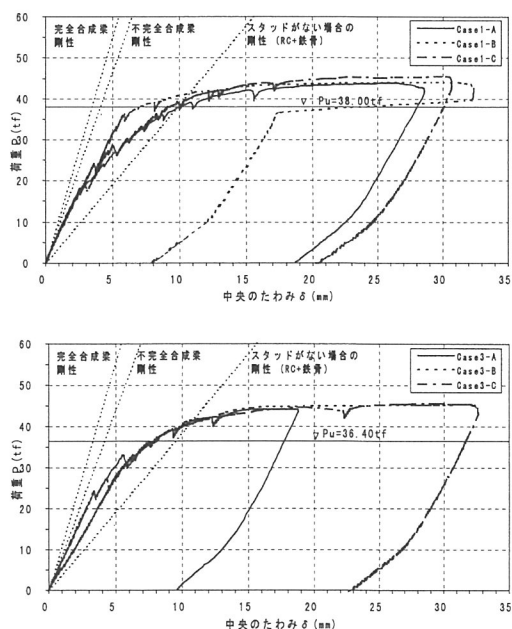
Case 3－C は、過大な予備荷重によって初期荷重からスタッドに曲げひずみが現れている。同荷重で比較してみると、Case 3 よりCase 1 の曲げひずみ量が総じて大きく、スタッドの本数の違いも考え合わせると、Case 3 の方が剛性が高いことがわかる。スタッドの曲げ相当ひずみは、鉄骨面で作用している水平せん断力によるものであるから、Case 3 の方がずれ剛性が高いことがわかる。



図－10 スタッドの曲げ相当ひずみ分布

表－6 試験体諸元、部材性能

試験体	コンクリート ヤング係数 (kgf/cm ²)	断面 2 次モーメント		スタッド せん断耐力 (tf/本)
		完全 梁 (cm ⁴)	不完全梁 (cm ⁴)	
Case 1	272300	29523	24943	5.973
Case 3	275300	29628	23473	5.973



図－11 荷重－中央たわみ関係

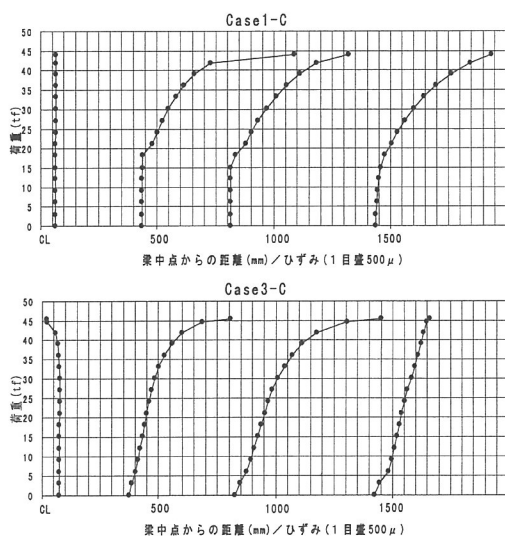


図-12 スタッ드의曲げ相当ひずみ分布

(c)まとめ

試験結果の比較から以下のことがわかった。

高強度コンクリートを用いた場合、普通強度コンクリートを用いた場合と比較して、合成率 (n_p/n_f) が同じであれば、スタッドの変形量が小さくなり、また、鉄骨とRCとのずれ量が小さくなってずれ剛性が高くなる (3. 押し抜きせん断試験でも確認されている)。これは、強度が大きくなればスタッド位置での支圧強度が大きくなるため、コンクリートの変形が小さくなり、スタッドの変形が抑えられるためである。

5. 曲げせん断試験その2

残留応力のある試験体 (負曲げ)

5.1 試験の目的

芯材のH形鋼に作用した応力が、後打ちコンクリート壁と一体になった場合にでも依然として鉄骨に残留している。この応力を残留 (先行) 応力という。ハイブリッド地下壁において、この残留応力が一体壁にどのような影響を与えるかは非常に重要な問題である。この場合の鉄骨とRCの応力負担状態を把握するために、4章 (表-3) ですでに紹介したCase10 (A, B, Cの3体) の試験を行った。

5.2 試験体の製作

残留応力のある試験体 (Case10) の概要を図-13に示す。試験体の製作 (残留応力の導入) 手順は、以下の通りである。

- ① フランジ外側に取付けたPC鋼棒 (ゲビンドスタープ) にプレストレス (導入緊張力 $P_e = 16.6 \text{ tf}$) を導入することで、H形鋼 (山留め壁芯材に相当) に、偏心曲げモーメントと圧縮軸力を導入。
- ② コンクリート (地下外壁に相当) を打設
- ③ コンクリートが所要強度以上となった時点でPC鋼棒の緊張力を開放

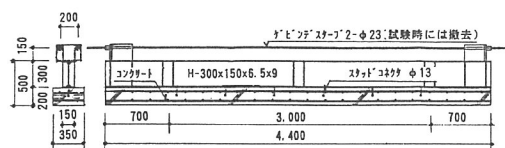


図-13 試験体概要 (単位mm)

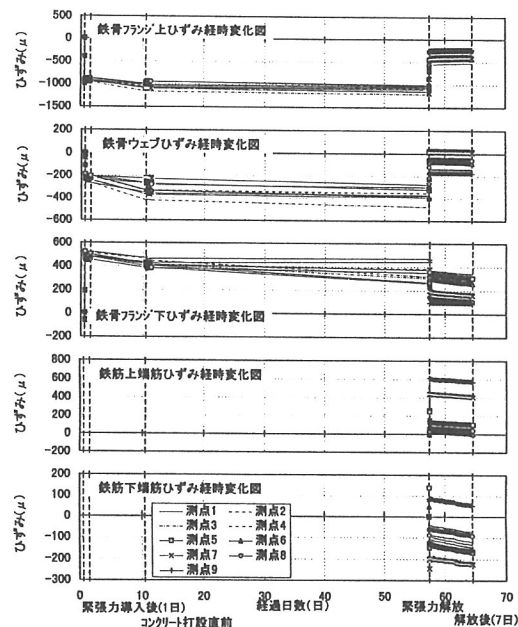


図-14 緊張力導入から除荷までのひずみの経時変化

5.3 残留応力の推移

PC鋼棒によるプレストレス導入からコンクリート硬化後のプレストレス除荷までの各部のひずみの経時変化の例を図-14 (Case10A) に示す。

合成前の試験体に先行応力をプレストレスで導入して、後打ちコンクリート打設後に除荷することで、合成壁には残留応力がある状態となる。ここで、一連の応力 (ひずみ) 推移過程を、以下の手順で評価した。

- ①初期値はプレストレス導入直後の鉄骨実測縁ひずみ値とし、曲げモーメントと軸力に換算。
- ②合成壁の断面に、それぞれの逆符号値を作用させ、縁応力を算出しひずみに換算。
- ③初期断面と合成壁断面の中立軸の差による偏心曲げモーメントについても同様の処理を行う。
- ④平面保持条件で縁ひずみを結び、ひずみに応じて各部の応力を算出。
- ⑤応力の計算値を重ね合わせてひずみを換算し、残留ひずみとする。

この様にして得られた計算値と実測値を比較したものを図-15に示す。実測値にはコンクリートの付着力やスタッドのせん断力の影響がみられるが、計算値と比較的良好一致を示している。

5.4 試験結果

4章のCase 6 試験体とCase10の荷重-中央部たわみ関係を比較したものを図-16に示す。本来ならばCase 5の試験結果と比較すべきであるが、Case 5では全ての試験体の鉄骨圧縮側フランジが局部座屈したので、直接比較するには不相当と判断した。また、これにはCase10の試験体コンクリート強度が材令の影響で当初の計画より大きくなり、合成率 (n_p/n_f) が完全合成梁 (Case 6) に近くなったことも考慮している。なおCase 6 A およびCase10BにもCase 5と同様に局部座屈の影響があり、試験終了荷重は低い。しかし何れの場合も計画最大荷重 (Case 6 = 21.9, Case10 = 14.9tf) を越えており、Case間でも同等な荷重-たわみ関係および終局耐力を示していることを考えると、Case10には残留応力の影響は現れていないと判断できる。

5.5 まとめ

試験結果の比較から以下のことがわかった。

- ①鉄骨 (芯材) に導入した先行応力の開放により、合成壁に残留応力が生ずる一連の応力 (ひずみ) の推移過程を計算によってほぼ評価することができた。
- ②残留応力を持って合成壁となった後の荷重-たわみ関係および終局荷重は、残留応力のない場合と変わらないことが判明した。しかし、鉄骨とRC壁の応力分担が同等であるということではない。

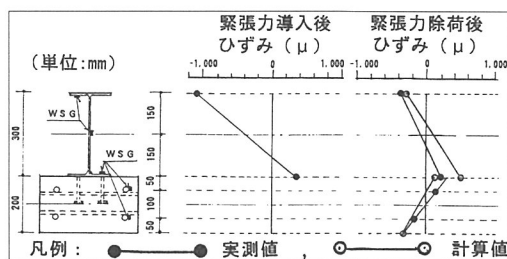


図-15 ひずみの実測値と計算値の比較 (Case10A)

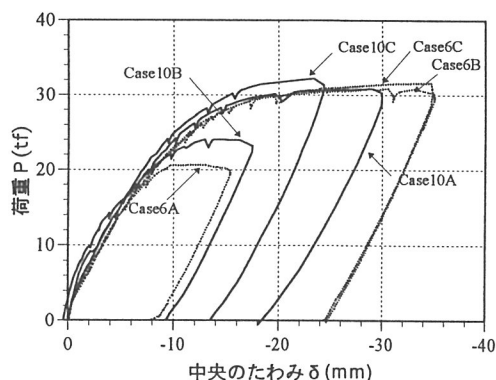


図-16 荷重-中央たわみ関係

6. 総括

一連の試験結果から以下の結論が得られた。

- ①コンクリート中のスタッドの終局せん断耐力は(1)式で評価できる。
- ②スタッドに防錆剤を塗布しても、スタッドピッチや壁筋の呑込み長さが設計時より若干減少するようなことがあっても、スタッドの終局せん断耐力にはさほど影響が起らない。
- ③不完全合成梁で設計した場合には、スタッドを均等配置しても、応力状態に応じて0モーメント点 (曲

げ反曲点付近)にスタッドを集中配置しても、短期荷重時までは同等の性能が期待できる。

- ④残留応力を持つハイブリッド地下壁（合成壁）の荷重－たわみ関係および終局荷重は、残留応力のない場合と同等である。（ただし、これは鉄骨とRC壁の応力分担も同等であるということではないので、注意が必要である）。

7. あとがき

「2.1 設計上の問題点」で述べたように、これらの一連の実験は施工上その他で起きる問題点を解決し、正しい設計方法を確立するために行ったものである。本報告は試験結果の全てを示したものでなく、一部割愛して報告したものであることをこたわっておく。

この研究は「㈱浅沼組、㈱奥村組、㈱鴻池組、㈱銭高組、㈱松村組（50音順）」の5社共同（名称：ハイブリッド地下壁研究会）で平成7年10月から平成9年10月にかけて行ってきたものである。研究会ではこの研究成果をもとにして「ハイブリッド地下壁設計指針」を作成したことを報告しておく。

最後に、研究会構成会社ほか関係各位の方々に厚くお礼を申し上げますとともに、実験に際して懇切丁寧にご指導等を頂きました摂南大学 永井興史郎教授に深く感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 日本建築学会「各種合成構造設計指針・同解説」
- 2) 筒井通剛他：ハイブリッド地下壁に関する実験的研究（その1～その6） 1997年 日本建築学会大会（関東）