

論文 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

吉武 謙二^{*1}・前 孝一^{*2}・小川 晃^{*2}・磯田 和彦^{*3}

要旨：土留め壁のH形鋼芯材を本体利用した合成壁に，防水材や良好なせん断補強効果が確認されている拡径部を有する異形鉄筋，Tヘッドバーをスタッド材として用いた場合の構造性能を把握することを目的として曲げ試験および非線形有限要素解析を実施した。その結果，防水材により最大荷重に差異は見られないが初期剛性は2割程度減少すること，考案したスタッドは良好なずれ止め兼せん断補強効果を有することが確認できた。また，解析により防水材やスタッド本数の違いが荷重 - 変位関係やひび割れ発生状況などに及ぼす影響を良好に再現できることが明らかになった。

キーワード：合成壁，曲げ試験，防水材，Tヘッドバー，スタッド，非線形有限要素解析

1. はじめに

近年，都市再生が国家の重要な課題となっており，駅前などの狭隘地域における地下空間の有効利用促進が求められている。また，近年社会資本整備を実施する際の環境への負荷低減が求められている。このような背景から従来仮設材として用いられてきた土留め壁のH形鋼芯材に，シアコネクタを設置して鉄筋コンクリート壁（以下，RC壁）と合成し，本体構造材として利用する工法が開発されている（図 - 1(a)）¹⁾。H形鋼を構造材として用いることにより，RC壁厚が大幅に削減できるため，地下利用空間の拡大，地下外壁工事や残土排出量の低減が可能となる。

既往の研究においては，吉本ら²⁾は柱列式土留め壁のH形鋼芯材を本体利用した不完全合成壁の正曲げおよび負曲げ試験体の曲げ耐力および初期剛性を評価している。また，山浦ら³⁾や小川ら⁴⁾らは芯材H形鋼の仮設時先行応力についても検討している。しかし，本技術は現在開発段階にあり，設計・施工の両面において解決すべき課題が残されている。

土留め壁は通常の合成はりなどと異なり，高い止水性が要求される場合があるが，H形鋼を本体利用した場合の適切な防水工法およびその構造性能評価に関する検討はなされていない。ま

た，既往の実験¹⁾ではRC壁部がせん断破壊に至っている。そこで，止水性の課題に対してはソイルセメント面にゴムアスファルト系の防水材を吹き付けること，せん断破壊の課題に対しては良好なコンクリートのせん断補強効果が確認されているTヘッドバー⁵⁾をスタッド（以下，THBスタッドと称する。）として用いることを考案した（図 - 1(b)）。長尺のTHBスタッドを用いることにより芯材の建込み精度が悪く，スタッドが壁筋に届かない場合にも対応可能である。本報では上述の対策案の妥当性を検証するために実施した合成壁一般部の曲げ試験⁶⁾および非線形有限要素解析の結果について報告する。さらに，シアコネクタ本数や加力方向，せん断補強筋量などが構造性能に及ぼす影響についても明らかにした。

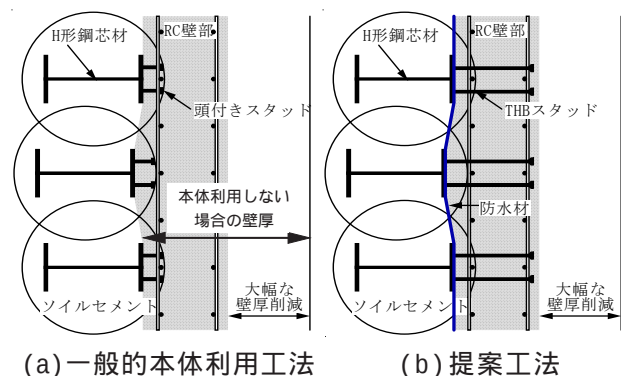


図 - 1 工法概念図

*1 清水建設（株） 技術研究所 （正会員）

*2 清水建設（株） 土木事業本部 （非会員）

*3 清水建設（株） 建築事業本部 （非会員）

表 - 1 試験体および試験結果一覧

試験体 No.	スタッド 種類	スタッド 長さ (mm)	スタッド 本数	合成度*1 np/nf	防水	RC壁部 せん断 補強筋比 (%)	加力 方向	破壊 モード	降伏 荷重 (kN)	降伏時 変位 (mm)	最大 荷重 (kN)
B1	頭付き スタッド (φ16)	120	13	0.25 (0.23)	有り	0.38 (3-D10)	正	載荷板付近の コンクリート圧壊	606.4	14.8	708.5*2
B2			33	0.6 (0.54)				載荷板付近の コンクリート圧壊	721.3	11.5	933.5
B3			54	1.0 (0.89)				載荷板付近の コンクリート圧壊	855.3	11.5	1008.5
B4			33	0.6 (0.54)	無し	0.38 (3-D10)	負	RC壁部の 斜め引張破壊	753.2	12.4	813.3
B5								載荷板付近の コンクリート圧壊	829.8	13.0	953.2
B6								上フランジの 座屈	517.0	12.6	578.2
B7	THBスタッド (D16)	270	33	0.4 (0.36)	有り	0.35 (1-D16)	正	スタッドの破断	766.0	13.0	874.0
B8	THBスタッド (D13)					0.23 (1-D13)		スタッドの破断	676.6	13.6	753.2

*1)括弧内は実験時のコンクリート材料試験結果による補正值, *2)試験体B1は最大荷重以前に加力を終了した。

2. 研究概要

2.1 実験概要

(1) 試験体概要

試験体一覧を表-1に,代表的な試験体の配筋図を図-2に示す。試験パラメータは,防水を有する場合の合成度,RC壁部のせん断補強筋比,防水の有無,加力方向(H形鋼引張を正加力とする),スタッドの種類の5つで,試験体はそれらを組み合わせたB1~B8の8体である。合成度0.6で防水材を有する試験体B2を基準試験体とし,合成度の及ぼす影響を試験体B1,B2,B3で,RC壁部のせん断補強筋比の及ぼす影響を試験体B2,B4で,防水材の及ぼす影響を試験体B2,B5で,加力方向の及ぼす影響を試験体B2,B6で検証した。なお,せん断補強筋量は文献1)より求めたRC壁部の分担せん断力を基に決定した。試験体B7,B8では長さ270mmのTHBスタッドを用いて,ずれ止め兼せん断補強効果を検証した。なお,試験体B7のせん断補強量は試験体B2と同等とした。

試験体は全長4,500mmのH-400×200×8×13のフランジ面にスタッドを溶接し,スタッドを養生後,試験体B5を除き防水を施し,その上面に幅450mm,高さ300mmのRC壁を構築することにより製作した。なお,THBスタッドは溶接性向上のため成分を調整しており,通常の

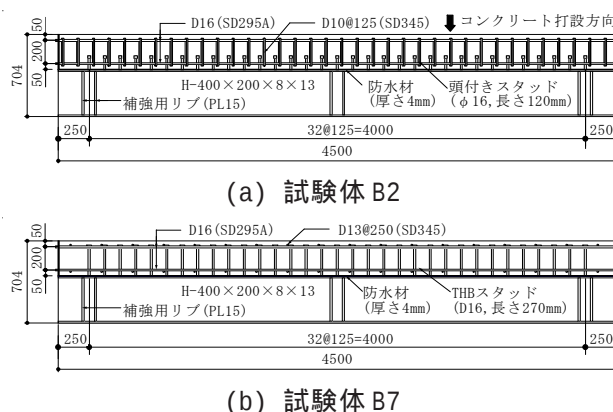


図 - 2 試験体の形状および配筋

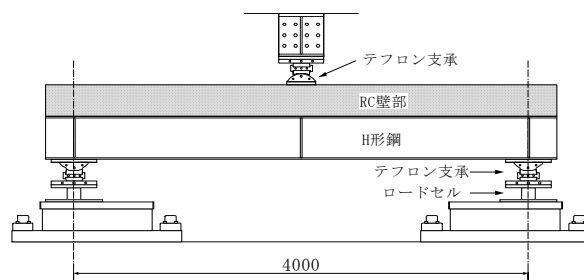


図 - 3 加力装置

スタッド溶接によりフランジ面に設置した。防水材にはゴムアスファルト系のものを用い,H形鋼のフランジ面に吹き付けた。防水材の厚さは4mmとした。コンクリートは最大粗骨材寸法20mmとし,H形鋼のフランジ面と直交方向に打設した(図-2(a))。コンクリートの圧縮強度は20.4N/mm²,弾性係数は28.6kN/mm²であった。使用鋼材の材料試験結果を表-2に示す。

(2) 加力および計測方法

加力装置を図-3に示す。加力は試験体をテ

表 - 2 材料試験結果一覧

H形鋼 フランジ	降伏点	317.1	配力筋 (D13)	降伏点	368.9
	引張強さ	440.5		引張強さ	520.9
H形鋼 ウェブ	降伏点	353.5	頭付き スタッド	降伏点	278.0
	引張強さ	462.1		引張強さ	474.8
主鉄筋 (D16)	降伏点	363.4	THB スタッド (D16)	降伏点	426.5
	引張強さ	526.2		引張強さ	578.8
フープ筋 (D10)	降伏点	396.8	THB スタッド (D13)	降伏点	351.6
	引張強さ	565.0		引張強さ	513.6

単位 (N/mm²)

フロン支承により支持し、試験体上面のテフロン支承を介して実施した。載荷は単調漸増とし、6MN試験機を用いて実施した。試験体のコンクリート面とテフロン支承間には石膏を敷き不陸を低減させた。試験体下面での鉛直変位やRC壁部とH形鋼の水平方向の相対ずれおよび断面ひずみ分布を計測した。

2.2 解析概要

(1) 解析方法および有限要素メッシュ

試験体B1～B6を対象とし、コンクリートの弾塑性および軟化挙動およびH形鋼とRC壁部とのずれを考慮した非線形有限要素解析⁷⁾を実施した。ポストピーク以降の軟化挙動も捉えるため変位増分にて解析を行い、線形弾性剛性法を用いて収束計算を行った。有限要素メッシュを図 - 4 に示す。RC壁部は定ひずみ三角形平面応力要素により、H形鋼部は4節点四角形アイソパラメトリック要素によりモデル化した。スタッドはRC壁部とH形鋼間に水平および鉛直方向のバネを設置してモデル化した。

(2) 材料モデル

コンクリートの圧縮軟化塑性モデルおよび引張軟化モデルは、CEB-FIP MODEL CODE 1990⁸⁾を参考に設定した。なお、ひび割れ帯幅はコンクリート部における代表的な二等辺三角形要素の最長辺を底辺とした高さと考えた。ひび割れ発生後、せん断剛性は1%に低減させた。主鉄筋の上下のコンクリートは、鉄筋とコンクリートの付着による引張硬化を考慮した前川⁹⁾のモデルにより応力 - ひずみ関係を設定した。スタッドの水平方向の構成則は図 - 5 に示すよう

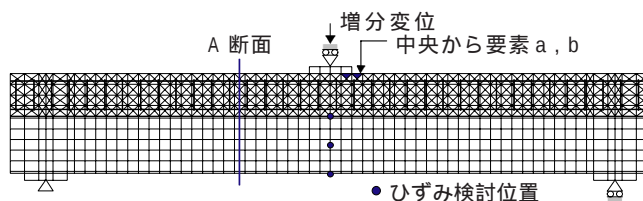


図 - 4 要素メッシュ (試験体 B3)

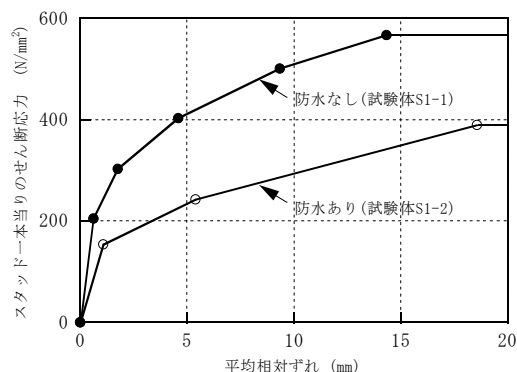


図 - 5 スタッドのせん断モデル

に押抜き試験結果¹⁰⁾を多直線近似して設定した。材料定数は材料試験結果を基に設定した。

圧縮状態におけるコンクリートの降伏および破壊には、Kupfer¹¹⁾等の実験に基づき、等二軸圧縮強度を $1.16f_c$ (f_c : 一軸圧縮強度)として、関連流れ則を仮定したDrucker-Pragerの条件を用いた。引張 - 圧縮状態、二軸引張状態では、最大主応力 σ_{ci} が引張強度 f_t を超えるとひび割れが発生すると仮定した。

3. 実験および解析結果

3.1 最終破壊状況

試験結果一覧を表 - 1 に示す。なお、表 - 1 内の降伏荷重は、実験の初期勾配と降伏後の2次勾配の交点とした。全試験体の載荷荷重と試験体中央の鉛直変位との関係を図 - 6 に、試験体B1～B6に関する実験と解析結果の比較を図 - 7 に示す。

試験体中央部におけるH形鋼の上下フランジおよびウェブのひずみを試験体B3を例として図 - 8 に示す。実験では正曲げを受ける試験体では試験体中央部の下フランジおよびウェブが降伏した付近で、荷重 - 変位関係の勾配が緩やかになり部材としての降伏挙動を示した。解析は実験でのH形鋼のひずみ挙動を概ね再現した。なお、負曲げを受ける試験体では試験体中

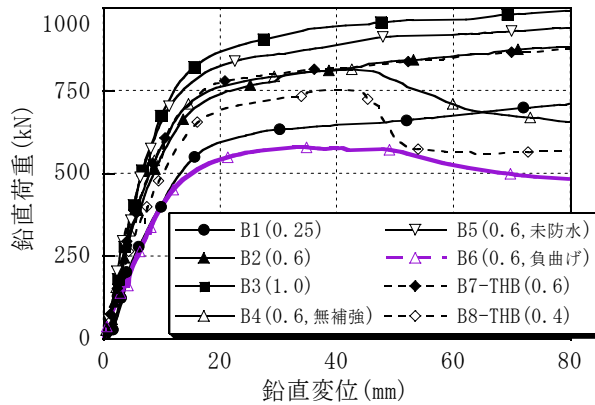
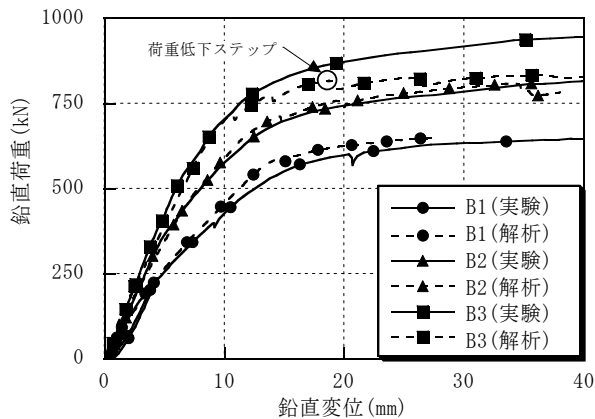
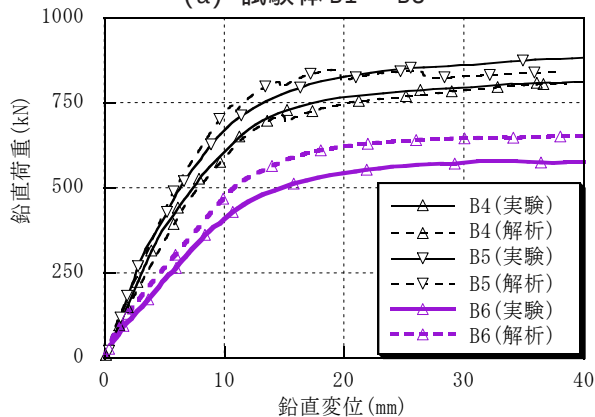


図 - 6 荷重 - 変位関係まとめ



(a) 試験体 B1 ~ B3



(b) 試験体 B4 ~ B6

図 - 7 荷重 - 変位関係

中央の下側のフランジが降伏した付近で降伏挙動を示した。実験では試験体B1は最大荷重以前に加力を終了したが、B2, B3, B5は載荷板付近でのコンクリートの圧壊、試験体B4はRC壁部の斜め引張破壊、試験体B6は上フランジの座屈、試験体B7, B8はスタッドの破断により最大荷重に至った。

正曲げ試験体の解析での荷重低下メカニズムを試験体B3を例として示す。図 - 4内の載荷板近傍のコンクリート要素a, bの主応力履歴を図 - 9に示す。また、図 - 7(a)内の荷重 - 変位関

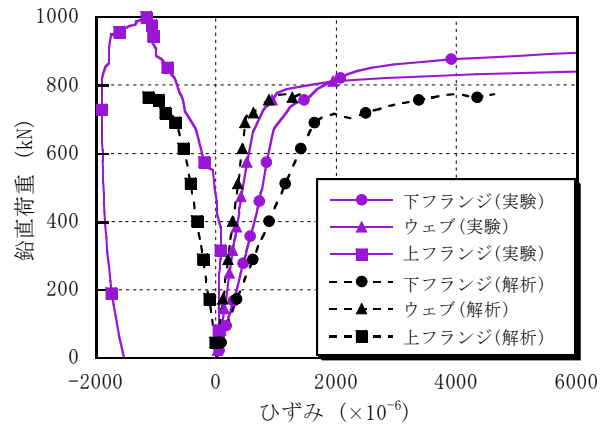


図 - 8 H形鋼のひずみ (試験体 B3)

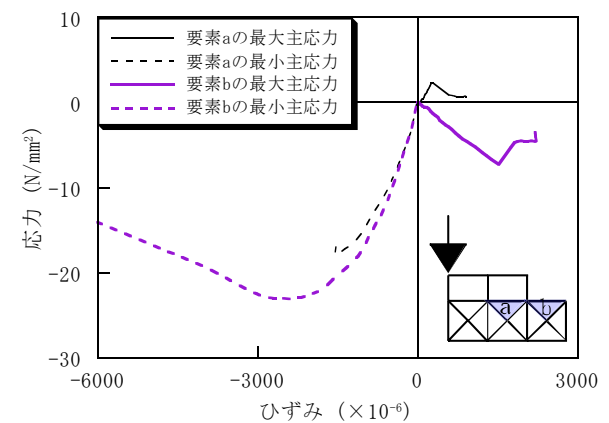


図 - 9 主応力履歴 (試験体 B3)

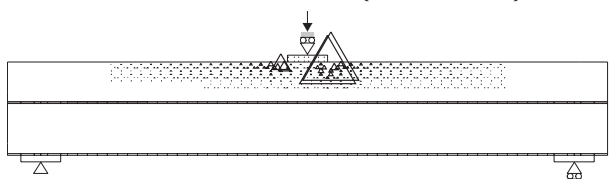


図 - 10 相当塑性ひずみ (試験体 B3)

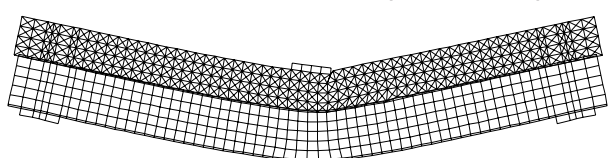


図 - 11 増分変位 (試験体 B3)

係における荷重低下ステップでの相当塑性ひずみと増分変形をそれぞれを図 - 10, 図 - 11に示す。相当塑性ひずみより載荷板近傍に局所的な圧縮塑性領域が形成されている様子が伺える。さらに、増分変形やコンクリートの主応力履歴より載荷板近傍のコンクリートの局所的な圧縮軟化破壊により試験体B3は荷重低下が生じたことが確認できる。

3.2 パラメータが曲げ特性に及ぼす影響

合成度の異なる試験体B1, B2, B3では合成度が大きくなるにつれ、初期剛性、最大荷重ともに高くなった。解析では試験体B3で荷重が

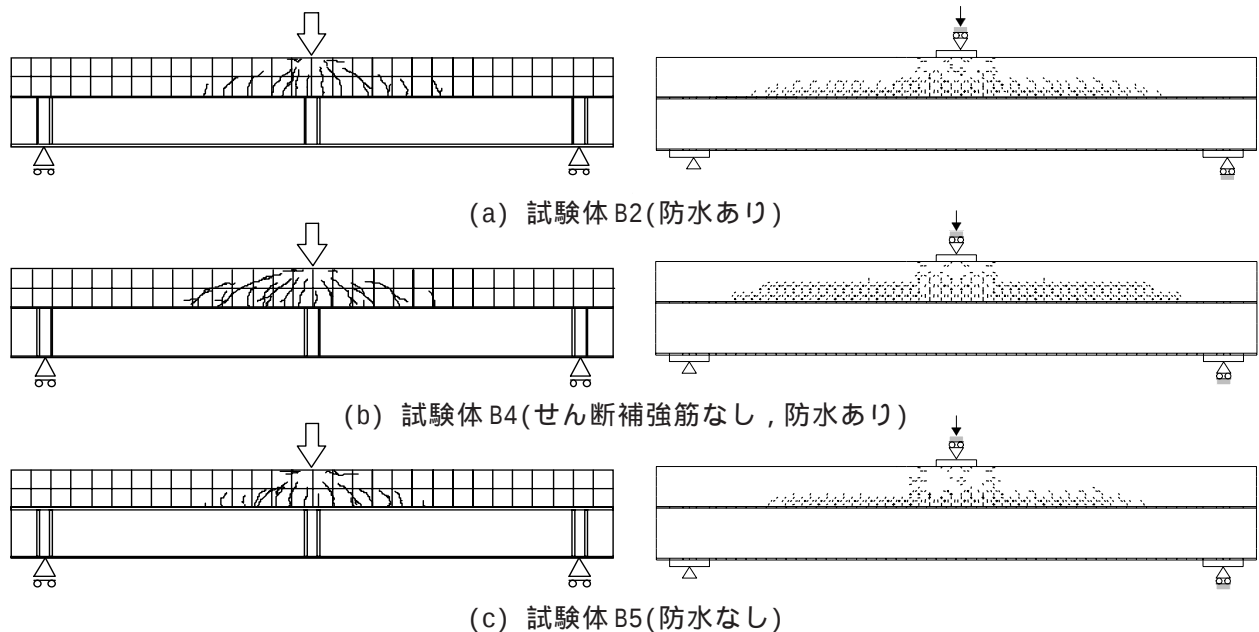


図 - 12 鉛直変位 40mm におけるひび割れ進展状況 (左: 実験, 右: 解析)

低下したため最大荷重を若干低く評価したが, その他の試験体では実験を良好に再現した。

試験体 B2, B4, B5 の鉛直変位 40mm におけるひび割れ発生状況を図 - 12 に示す。試験体 B2 と B4 を比較すると, 実験・解析ともに最大荷重までは両者の荷重 - 変位関係にほとんど差異は見られなかった。しかし, せん断補強筋のない試験体 B4 の方が実験・解析ともにひび割れが多く発生し, 最終的に実験では鉛直変位が約 42mm でせん断ひび割れが進展し荷重が低下した。よって, 文献 1) により算定した RC 部の分担せん断力に対してせん断補強筋を配置することで, せん断破壊が防止でき変形性能が大幅に向上することが確認できた。

防水材の影響を試験体 B2 と B5 で比較すると, 剛性の低い防水材を施すことにより, 初期剛性は 2 割程度減少し, また, 部材降伏後の剛性も低下することが明らかになった。解析においても防水材のある試験体 B2 は, 初期剛性, 最大荷重ともに小さくなった。ひび割れ発生本数は実験と解析の両方で防水がない試験体 B5 の方が少なかった。図 - 4 内の A 断面における断面ひずみ分布を図 - 13 に示す。ひずみ検討位置は, H 形鋼の上下フランジとウェブ中央, 引張および圧縮主鉄筋である。防水を施すことにより H 形鋼と RC 部で不連続になっている。よって, 防

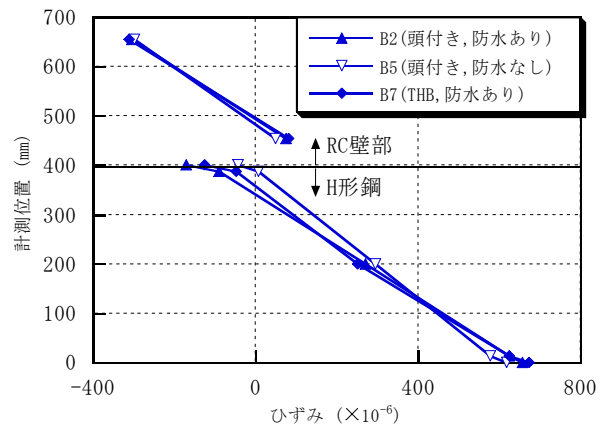


図 - 13 断面ひずみ分布 (400kN 時)

水のない試験体 B5 の方が完全合成体に近く RC 部に発生する引張応力が少ないため, ひび割れ本数が減少したと推測される。

負曲げの試験体 B6 では載荷板付近の上フランジが座屈するまでは延性的な曲げ挙動を示した。負曲げを受ける試験体 B6 では解析の方が初期剛性, および最大荷重が大きくなった。負曲げ状態ではコンクリートのひび割れのために, 頭付きスタッドのせん断特性は低下すると考えられる。よって, 初期剛性および最大荷重の相違の原因は, ひび割れ発生によるシアコネクタのせん断特性の変化をモデル化していないことに起因していると推測される。

合成度が等しくシアコネクタ種類の異なる試験体 B4 と B7 を比較する。THB スタッドを用いた試験体 B7 は鉛直変位が約 80mm でシアコネク

タ根元の破断により最大荷重に至ったが、頭付きスタッドを用いた試験体 B4 で生じたせん断破壊が防止でき変形性能が約 2 倍に増加した。試験体 B8 は試験体 B7 と同様にシアコネクタ根元での破断で最大荷重に至った。しかし、合成度が低いにもかかわらず、試験体 B4 でせん断破壊が生じた約 42mm 程度まで RC 部のせん断破壊が生じず、THB スタッドが良好なせん断補強効果を有することが確認できた。

また、断面ひずみ分布より THB スタッドを用いた試験体 B7 は合成度が等しい試験体 B2 よりひずみが連続的であり、THB スタッドがせん断補強筋としてだけでなく、シアコネクタとしても良好に機能することが確認できた。

4. まとめ

合成壁一般部を対象として防水材を用いた場合や THB スタッドを用いた場合の曲げ耐力や変形性能などの構造性能を曲げ試験により検討した。さらに、シアコネクタ本数や加力方向、せん断補強筋量が構造性能に及ぼす影響についても明らかにした。また、非線形有限要素解析を実施し、破壊モードの把握や解析の妥当性を検証した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 正曲げ試験体では合成度が大きくなるにつれ、初期剛性、最大荷重ともに高くなる。
- (2) 防水材を用いることにより最大荷重に差異は見られないが、初期剛性は 2 割程度減少し、部材降伏後の剛性も低減する。
- (3) 非線形有限要素解析で、正曲げの場合は合成度や防水の違いが荷重 - 変位関係やひび割れ発生状況に及ぼす影響を良好に再現できる。一方、負曲げの場合は初期剛性、最大荷重を若干大きく評価する。
- (4) RC 部に適切にせん断補強筋を配することで、斜め引張破壊が防止でき変形性能が大幅に向上する。
- (5) THB スタッドは良好なずれ止め兼せん断補強効果を有し、RC 部の斜め引張破壊を防止し変形性能が大幅に向上する。

参考文献

- 1) 社団法人 日本トンネル技術協会：H 形鋼を芯材とする土留め壁本体利用の設計手引き，2002.
- 2) 吉本正浩，小川保，佐山順二，内藤幸弘，山本稔：スタッド本数をパラメータとした不完全合成梁の一体性確認載荷実験，土木学会第 55 回年次学術講演会，CS-43，2000.
- 3) 山浦一朗，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講演概要集（東北），pp.587-588，2000.
- 4) 小川敦，中澤明夫，小川雅，芳賀勇治，黒澤明：ソイルセメント山留め壁芯材と合成した地下壁に関する研究（その 1）各試験体の荷重 - 変位曲線と構成部材の降伏過程，日本建築学会大会学術講演概要集（関東），pp.545-546，2001.
- 5) 塩屋俊幸，中澤春生，長澤保紀，高岸正章：T ヘッドバー工法の開発，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.3，pp.1291 ~ 1296，2000.
- 6) 吉武謙二，小川晃，大崎雄作，藤江康司：土留め壁の H 形鋼芯材を用いた合成壁の曲げ特性，土木学会第 58 回年次学術講演会講演概要集，pp.483 ~ 484，2003.
- 7) 吉武謙二，長谷川俊昭：鉄筋コンクリートディープビームのせん断挙動に関する寸法効果解析，清水建設研究報告，第 72 号，2000.
- 8) “CEB-FIP MODEL CODE 1990”，CEB，pp.2-11 ~ 2-12，1991.
- 9) 岡村甫，前川宏一：“鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則”，技報堂出版，p.37，1991.
- 10) 吉武謙二，前孝一，小川晃，磯田和彦，山野辺宏治：土留め壁の H 形鋼芯材を用いた合成壁のシアコネクタに関する押抜き試験，構造工学論文集，Vol.51A，2005.
- 11) Kupfer，H.，Hilsdorf，H.K.，and Rusch，H.：“Behavior of Concrete Under Biaxial Stresses”，ACI Journal，Vol.66，No.8，pp.656 ~ 666，1969.