

CUW 工法における頭付きスタッドのせん断耐力に関する実験的研究

山黒 寛矢 岸 俊甫
土佐内 優介

概 要

CUW工法は山留め壁とRC地下外壁を頭付きスタッドで一体化させ地下構造物を合理化した合成地下外壁である。山留め壁施工時の倒れにより頭付きスタッドが壁筋にのみ込まれない際はRC地下外壁に補強筋を設けることや、地下室への漏水を防ぎたい際はRC地下外壁と山留め壁の間に防水材を設けることもある。しかし、これらが頭付きスタッドのせん断耐力に及ぼす影響に関する報告は少ない。本報告ではRC地下外壁の補強筋や防水材の設置が頭付きスタッドのせん断耐力に及ぼす影響の確認を目的として実験を実施した。

その結果、補強筋は頭付きスタッドのせん断耐力を向上させるのに有効であること、防水材の設置は頭付きスタッドせん断耐力を減少させることを確認した。

Study on the Shear Strength of Headed Studs in the CUW Method

Abstract

The CUW method is a composite underground wall system that integrates earth-retaining and RC underground walls, streamlining underground structures using headed studs. In cases where headed studs cannot fully engage with the wall reinforcement due to deformation during the retaining wall construction, reinforcement bars are added to the RC underground wall. Additionally, when preventing water leakage into basements is a priority, waterproofing materials are placed between the RC underground wall and the earth-retaining wall. However, few reports show how these factors affect the shear strength of headed studs. This study aimed to examine the effects of reinforcing bars in the RC underground wall and the installation of waterproofing materials on the shear strength of headed studs through experimental testing.

The results demonstrated that reinforcement bars effectively enhance the shear strength of headed studs, while the installation of waterproofing materials reduces their shear strength.

キーワード：山留め壁、応力材、押し抜きせん断実験、
合成壁、シート防水、頭付きスタッド

§1. はじめに

仮設構造物として建物外周に施工された山留め壁は工事終了後も地中に残置されるのが一般的である。文献¹⁾では図1に示す山留め壁応力材に頭付きスタッドなどのシアコネクタを打設し、後打ちRC地下外壁と一体化させる合成地下外壁(CUW工法)について、応力材が土圧の一部を負担することができ、RC地下外壁の躯体数量を削減、地下構造物の合理化が可能であることを示している。

合成地下外壁を施工する際の掘削による山留めの倒れにより、図2のように頭付きスタッドがRC地下外壁の壁筋にのみ込まれない場合がある。頭付きスタッドの耐力が小さくなるため、RC地下外壁内に頭付きスタッドに直交する方向に補強筋を設置、もしくは頭付きスタッドを壁筋にのみ込まれるまで長くするなど補強を施す。また、地下室への漏水を防ぎたい場合、図3のようにRC地下外壁と山留めとの界面にシート防水を設けるなどして止水性を向上させるなどの対策を施す場合がある。しかし、RC地下外壁に補強を設けた際の補強効果や、防水材による頭付きスタッドへのせん断耐力への影響を確認した研究は少ない。

筆者らは「頭付きスタッド先端がRC地下外壁の壁筋にのみ込まれないことにより補強を設けた場合」、「山留め壁とRC地下外壁の間に防水材を施工した場合」が頭付きスタッドのせん断耐力に与える影響を確認するため、押し抜きせん断実験を実施した。本報告では実験の概要および実験結果について示す。

§2. 押し抜きせん断実験概要

2.1 試験体および実験ケース

図4に全試験体の概要を、表1に実験ケース一覧を示す。計24体の試験体について押し抜きせん断実

験を実施した。パラメータは、開き止めの有無、応力材から壁筋までの距離、頭付きスタッドにかかる補強筋の種類および位置、頭付きスタッドの径および長さ、コンクリート強度、防水材の種類である。試験体は山留め壁の応力材を模したH形鋼(H-200×200×8×12)の両フランジ面に、2行2列で頭付きスタッドを溶接し、RC地下外壁を模したコンクリートスタブ(300×470×400)を打設して製作した。表2に頭付きスタッドの引張試験結果を示す。頭付きスタッドのピッチは150 mm、ゲージは100 mmとした。載荷板には両フランジの上部のみが接するように、H形鋼の

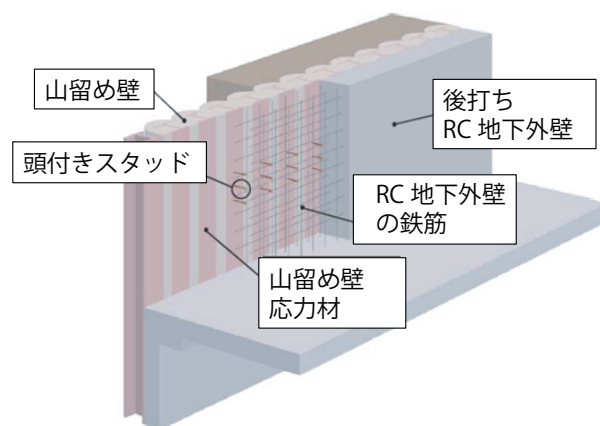


図1 合成地下外壁

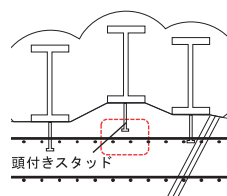


図2 頭付きスタッドが壁筋にのみ込まれない場合

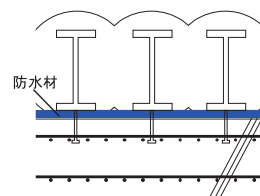


図3 防水材を施工した場合

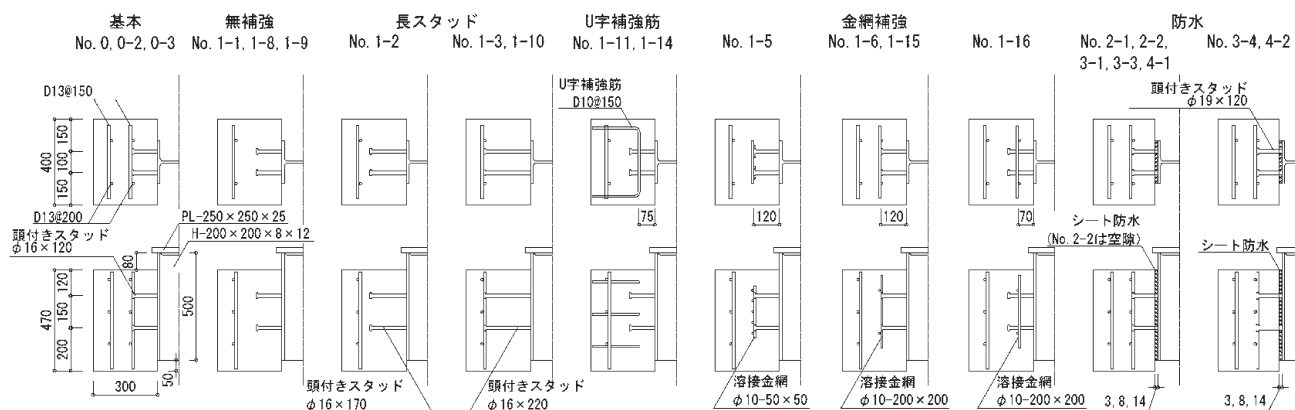


図4 試験体概要(上段:水平断面、下段:鉛直断面)

ウェブに切欠き加工を行いフランジ面に隅肉溶接で接合した。コンクリート打設方向は実際のRC地下外壁に合わせて試験体上面からとした。

補強筋を設けた試験体（No.11～12、14～16）について、No.1-16は頭付きスタッド軸部中央に補強筋がかかるように、そのほかの試験体は頭付きスタッド先端に補強筋がかかるように作製した。補強筋は目が細かい溶接金網（ $\phi 10-50 \times 50$ ）、目が粗い溶接金網（ $\phi 10-200 \times 200$ ）、およびU字補強筋（D10）の3種類の補強筋を使用した。

頭付きスタッドの長さを変えた試験体について、No.1-2は頭付きスタッド先端が壁筋までのみ込まれない位置に、No.1-3は頭付きスタッド先端が壁筋にのみ込む位置になる長さとした。

防水材を施工した試験体はH形鋼の界面にシート防水を設け、シートの厚さ分コンクリートスタブを薄くする構成とした。防水材は改質アスファルト系シート防水（防水①）、ベントナイト系シート防水（防水②）およびコンクリート改質系シート防水（防水③）の3種類を用いた。それぞれの設置状況を以下に示す。写真1～3に各シート防水の設置状況写真を示す。

防水①：改質アスファルト系シート防水（No.2-1）

H形鋼側に下地ボード、コンクリート側にアスファルト系防水シートを、頭付きスタッドの部分を取り抜いて設置した。下地ボードはH形鋼フランジ面に接着せず、型枠にはめ込み、防水シートはバーナーで炙り、下地ボードに溶着した。頭付きスタッド根元周囲にアスファルト系のシール材を充填した。下地ボードと防水シートの厚みは合計14mmであった。

表1 実験ケース

No.	分類	試験日 σ_B [N/mm ²]	スタッド 径-長 [mm]	補強筋 位置 [mm]	開き 止め
0	基本	21.4	16-120	-	無
0-2	基本	26.3	16-120	-	有
0-3	基本	35.2	16-120	-	有
1-1	無補強	21.4	16-120	-	無
1-8	無補強	26.4	16-120	-	有
1-9	無補強	26.4	16-120	-	無
1-13	無補強	36.2	16-120	-	有
1-2	長スタッド	21.5	16-170	-	無
1-3	長スタッド	21.5	16-220	-	無
1-10	長スタッド	26.8	16-220	-	有
1-11	U字補強筋	26.3	16-120	75	有
1-14	U字補強筋	36.2	16-120	75	有
1-5	金網補強_目細	21.7	16-120	120	無
1-6	金網補強_目粗	21.7	16-120	120	無
1-12	金網補強_目粗	26.1	16-120	120	有
1-15	金網補強_目粗	36.7	16-120	120	有
1-16	金網補強_目粗軸部	26.1	16-120	70	有
2-1	防水①	21.2	16-120	-	無
2-2	防水①_空隙	21.2	16-120	-	無
3-1	防水②	21.6	16-120	-	無
3-3	防水②	26.7	16-120	-	有
3-4	防水②	26.7	19-120	-	有
4-1	防水③	26.5	16-120	-	有
4-2	防水③	26.5	19-120	-	有

表2 頭付きスタッドの引張試験結果

頭付き スタッド	降伏 応力度 [N/mm ²]	ヤング 係数 [N/mm ²]	降伏 ひずみ [μ]	引張強度 [N/mm ²]	伸び [%]
$\phi 16$	313.7	202200	1551	460.1	21.9
$\phi 19$	306.3	201800	1518	452.4	23.0



写真1 改質アスファルト系シート防水



写真2 ベントナイト系シート防水



写真3 コンクリート改質系シート防水

防水②：ベントナイト系シート防水 (No.3-1、3-3、3-4)

ベントナイト系のシール材を塗布したフランジ面にベントナイトが封入されている不織布を、頭付きスタッド部をくり抜いて設置した。頭付きスタッド根元周囲はベントナイト系のシール材を充填した。防水シートの厚みは約 8 mmであった。

防水③：コンクリート改質系シート防水 (No.4-1、4-2)

コンクリートを改質し緻密化する作用を有する化合物を含浸させた不織布を、頭付きスタッド部をくり抜いて設置し、シート外周を両面テープによって固定した。頭付きスタッド根元はシール材などを充填せず、頭付きスタッドの中央部に水の侵入を防ぐための止水リングを設けた。防水シートの厚みは約 3 mmであった。

2.2 実験方法

図 5 に実験装置の概要を示す。門型フレームの梁中央部に3000kN ジャッキを取り付け、球座を介して H 形鋼上部に設置したプレートを鉛直下向きに単調載荷を行った。開き止めを行ったケースは、実際の RC 地下外壁は面内方向に連続していることから、スタブ上部と前後にそれぞれ鉛直方向の開き止め、水平方向の開き止めを設けた。鉛直方向の開き止めは加力フレームと別の片持ちフレームを設置し鉛直方向に押さえている。水平方向の開き止めは試験体下部を前後方向へ押さえるように溝形鋼を設け、加力フレームに固定した。

図 6 に計測方法を示す。ジャッキに取り付けたロードセルによって載荷荷重を、載荷板に取り付けた変位計により鉛直変位 4 点を計測した。図 7 に頭付きスタッドに取り付けたひずみゲージの位置を示す。片側スタブの頭付きスタッド 4 本の根元部（コンクリートスタブと応力材の界面から10mm）、中間部（根元部と先端部の中間）、先端部（先端部から11mm）の上下に計 6 枚/本のひずみゲージを貼付した。

§3. 実験結果

3.1 実験結果概要

図 8 に開き止めの有無の比較として、開き止めを設置しなかった No.0、1-1、1-9 と、開き止めを設置した No.0-2、1-8 の荷重変形関係を示す。縦軸はロードセルで計測された荷重、横軸は載荷板 4 点で計測した平均鉛直変位である。初期剛性はほぼ同等の結果となった。最大荷重後は、開き止め無しのケースは変

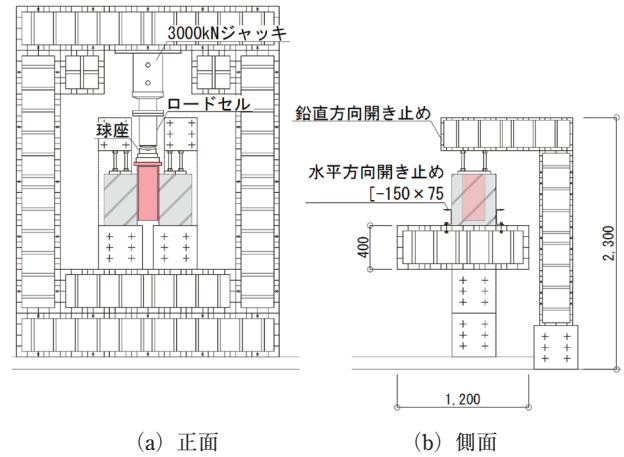


図 5 実験装置

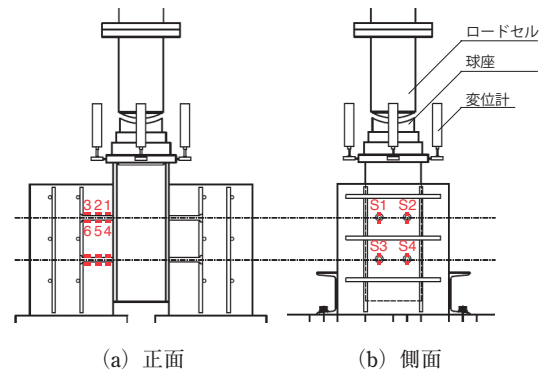


図 6 計測方法

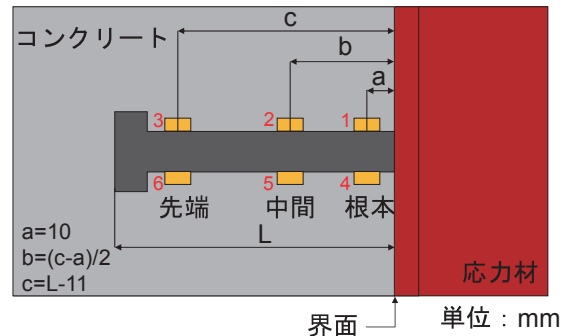


図 7 ひずみゲージの位置

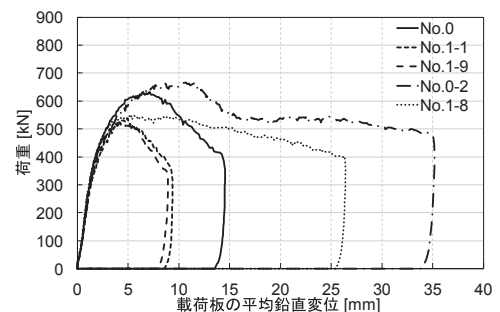


図 8 荷重変形関係（開き止めの影響）

形が大きくなるとともに荷重が低下したが、開き止め有りのケースは荷重を保持する傾向があった。開き止めは最大耐力にはほぼ影響がなく、変形性能を付与するものである。

図9に基本、無補強、U字補強、金網補強_目粗の比較としてNo.0-2、1-8、1-11、1-12の荷重変形関係を示す。初期剛性はほぼ同等の結果となった。基本（No.0-2）は無補強（No.1-8）に比べ最大荷重が1.21倍となっていた。U字補強筋（No.1-11）、金網補強_目粗（No.1-12）は無補強（No.1-8）に比べ、最大荷重が1.28倍、1.10倍となっており、一定の補強効果が確認できた。

図10に金網補強の目の粗さ、位置の違いによる比較として、No.1-5、1-6およびNo.1-12、1-16の荷重変形関係を示す。目の粗さの違いに着目すると、目細（No.1-5）が目粗（No.1-6）に比べ最大荷重が0.85倍程度となっている。これは頭付きスタッドと補強筋のあきが小さく、コンクリートの充填不足が起因していると考えられる。金網補強の位置の違いに着目すると、軸部に配置したケース（No.1-16）は頭部に配置したケース（No.1-12）に比べ最大荷重が大きいことが確認できた。

図11に頭付きスタッドの長さによる比較としてNo.1-1、1-2、1-3の荷重変形関係を示す。最大荷重まではほぼ同等の剛性であった。最大荷重は、壁筋に頭付きスタッド先端がのみ込まれない試験体であるNo.1-1とNo.1-2は同等程度であったのに対し、頭付きスタッド先端に壁筋がのみ込まれる試験体であるNo.1-3はNo.1-1に比べ1.11倍となっており、頭付きスタッド先端が壁筋にのみ込まれるまで長くすることで補強効果が現れることが確認できた。

図12にコンクリートの強度による比較として基本（No.0-2、0-3）と無補強（No.1-8、1-13）の荷重変形関係を示す。剛性はコンクリート強度ごとに最大荷重までは同等となっており、コンクリート強度が高いほど剛性も高くなる。最大荷重もコンクリート強度が高いほど大きくなっている。また、コンクリート強度の低いケースでは、無補強（No.1-8）が基本（No.0-2）に比べ最大荷重が小さくなっているのに対し、コンクリート強度の高いケースでは無補強（No.1-13）も基本（No.0-3）と同等の最大荷重となる結果であった。No.1-8では頭付きスタッドの周囲に鉄筋がないことで、頭付きスタッドの抜け出しによる引張破壊が起こっていたが、No.1-13はコンクリートの強度が上がったことにより基本と同様に頭付きスタッド軸部の支圧破壊となったことが起因していると推察できる。

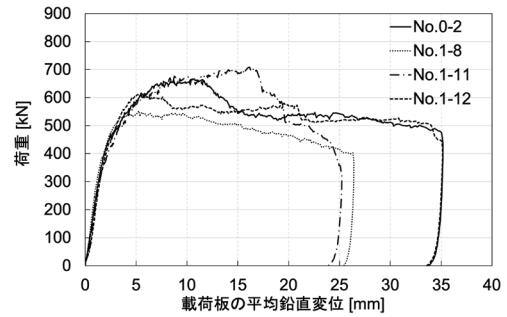


図9 荷重変形関係（補強筋の影響）

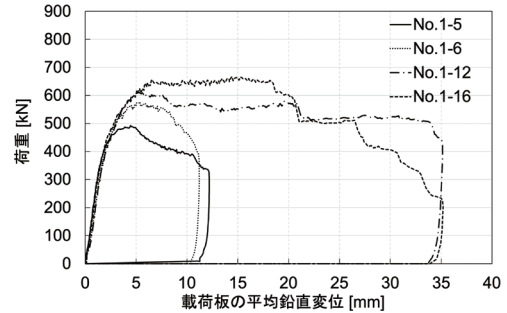


図10 荷重変形関係（金網補強位置の影響）

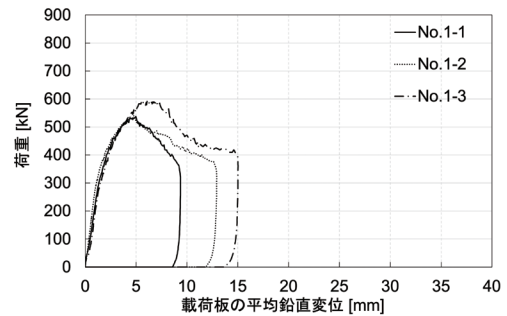


図11 荷重変形関係（スタッド長さの影響）

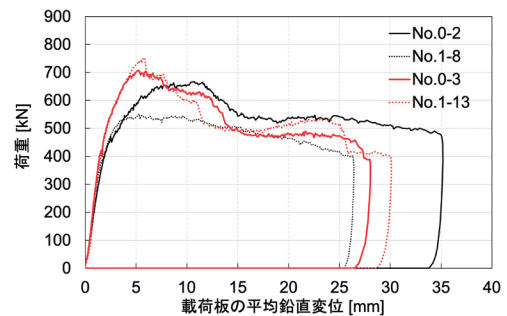


図12 荷重変形関係（強度の影響）

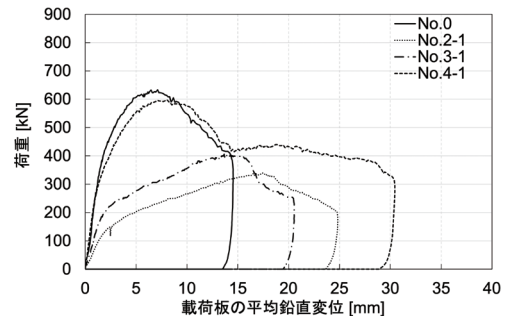


図13 荷重変形関係（シート防水の影響）

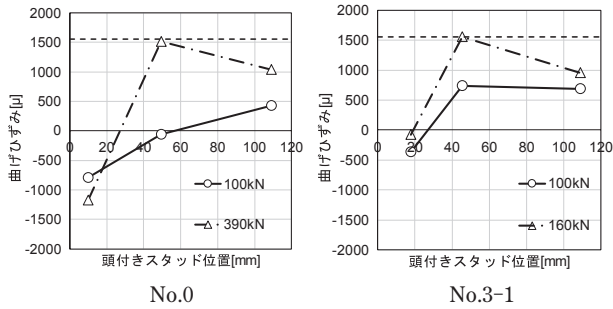


図14 平均曲げひずみ分布

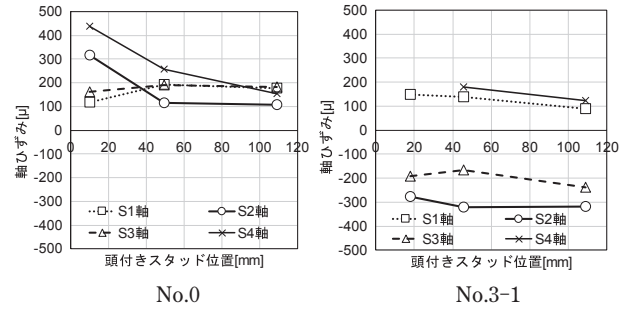


図15 軸ひずみ分布

図13に基本ケースと防水ケースの比較として、No.0、2-1、3-1、4-1の荷重変形関係を示す。No.2-1、3-1、4-1の順にシート防水が薄くなっており、芯材とRC地下外壁の離れの距離に応じて剛性が小さくなる結果が得られた。図14にNo.0とNo.3-1の載荷荷重が100kNと頭付きスタッドが降伏に達した時のS1～S4の平均曲げひずみ分布を示す。No.0は荷重が390kN時、No.3-1は荷重が160kN時に頭付きスタッドの中間部が降伏ひずみに達しており、防水ケースは基本ケースに比べ低い荷重で頭付きスタッドが降伏ひずみに達している。図15に曲げひずみが降伏ひずみに達した時のS1～S4の頭付きスタッドの軸ひずみ分布を示す。軸ひずみは+が引張、-が圧縮の値を示している。No.0ではすべての頭付きスタッドの軸ひずみが引張の値を示したのに対し、No.3-1ではS2とS3の軸ひずみが圧縮の値を示した。防水材料はコンクリートと比較して剛性が非常に小さく、頭付きスタッド根元部付近が空隙に近い状態になっていることで、試験体に回転やねじれが生じ、シート防水を施していない試験体とは異なるモードで変形が進行したと推察できる。

3.2 既往の実験式との比較

実験で得られた頭付きスタッドのせん断耐力を「各種合成構造設計指針」²⁾の評価式である式(1)(以下、Fisher式)および「鋼・コンクリート機械的ずれ止め構造設計指針」³⁾の評価式である式(2)(以下、ずれ止め指針式)と比較した。表3に全ケースの頭付きスタッド1本あたりの既往の評価式と実験結果の一覧表を示す。また、図16および図17に既往評価式と実験結果の比較を示す。実験における頭付きスタッドのせん断耐力は式(3)に示すように最大荷重 P_{max} を試験体に打設した頭付きスタッドの本数8本で除した値とした。

$$cal1q_u = 0.5a\sqrt{\sigma_B E_c} \quad (1)$$

$$cal2q_u = 2.75a(\sigma_B E_c)^{0.3}\sqrt{L/d} \times 0.85 \quad (2)$$

表3 頭付きスタッドの1本あたりのせん断耐力

No.	分類	試験日 σ_B [N/mm ²]	$expq_u$ [kN]	$cal1q_u$ [kN]	$cal2q_u$ [kN]
0	基本	21.4	79.2	67.3	64.6
0-2	基本	26.3	83.3	77.2	70.2
0-3	基本	35.2	88.4	86.9	78.9
1-1	無補強	21.4	67.3	67.3	64.6
1-8	無補強	26.4	69.0	77.4	70.3
1-9	無補強	26.4	65.4	77.4	70.3
1-13	無補強	36.2	94.1	86.9	79.7
1-2	長スタッド	21.5	67.5	67.5	77.1
1-3	長スタッド	21.5	74.4	67.5	87.7
1-10	長スタッド	26.8	81.3	78.2	95.7
1-11	U字補強筋	26.3	88.6	77.2	70.2
1-14	U字補強筋	36.2	104.1	86.9	79.7
1-5	金網補強_目細	21.7	61.5	67.9	65.0
1-6	金網補強_目粗	21.7	72.1	67.9	65.0
1-12	金網補強_目粗	26.1	76.3	76.8	70.0
1-15	金網_目粗	36.7	84.9	86.9	80.2
1-16	金網補強_目粗軸部	26.1	83.3	76.8	70.0
2-1	防水	21.2	42.5	66.9	64.4
2-2	防水_空隙	21.2	38.3	66.9	64.4
3-1	防水	21.6	50.7	67.7	64.9
3-3	防水	26.7	58.9	78.0	70.6
3-4	防水	26.7	63.8	110.0	91.4
4-1	防水	26.5	74.6	77.6	70.4
4-2	防水	26.5	88.1	109.5	91.1

$$expq_u = P_{max}/8 \quad (3)$$

$cal1q_u$: 試験体のFisher式による設計耐力 [N]

$cal2q_u$: 試験体のずれ止め指針式による設計耐力 [N]

$expq_u$: 頭付きスタッド1本あたりの最大耐力 [N]

P_{max} : 実験で計測された最大荷重 [N]

a : 頭付きスタッドの軸部断面積 [mm²]

σ_B : 試験日のコンクリート圧縮強度 [N/mm²]

E_c : コンクリートのヤング係数 [N/mm²]

ただし、 $500 \leq \sqrt{\sigma_B E_c} \leq 900$

L : 頭付きスタッドの軸部長さ [mm]

d : 頭付きスタッドの軸径 [mm]

長スタッドの実験結果について、Fisher式を上回る結果が得られたが、ずれ止め指針式は10%以上下回った。両評価式の違いに着目すると、ずれ止め指針式は頭付きスタッドの軸径と長さの比をせん断耐力の評価式に含めていることが挙げられる。また、防水を施工したケースの結果について、Fisher式ではすべてのケースで評価式を下回っていたが、ずれ止め指針式では厚さ3mmの防水③ケースは評価式を上回る結果となった。その他の試験体は無補強のケースの一部を除き評価式の $\pm 10\%$ 以内に収まる結果となった。

§ 4. まとめ

「頭付きスタッド先端がRC地下外壁の壁筋にのみ込まれないことにより補強を設けた場合」、「山留め壁とRC地下外壁の間に防水材を施工した場合」を模擬した試験体について押し抜きせん断実験を行った。得られた知見について以下に示す。

- ・頭付きスタッド先端に金網補強およびU字型の補強筋を設けた場合、頭付きスタッド先端が壁筋にのみ込まれない場合に比べ、せん断耐力が向上する。また、Fisher式、ずれ止め指針式の両評価式を概ね満足する結果となった。
- ・頭付きスタッド先端がRC地下外壁の壁筋にのみこまれるように長くした場合、頭付きスタッドが壁筋にのみ込まれない場合に比べ、せん断耐力が向上する。また、Fisher式の評価式は概ね満足する結果となったが、ずれ止め指針式の10%以上評価式を下回る結果となった。
- ・コンクリート強度を高くした場合、初期剛性とせん断耐力ともに向上することが確認できた。
- ・応力材とコンクリートの間にシート防水を施した場合、シート防水を施していない場合と比較し、異なる破壊モードになるため、せん断耐力が減少する。また、ほぼ全てのケースでFisher式、ずれ止め指針式の両評価式を下回っていたが、防水の厚さが3mmのケースのみずれ止め指針の評価式を上回る結果となった。

謝辞

本研究は安藤ハザマ様、佐藤工業様、西松建設様、三井住友建設様との共同研究成果の一部をまとめたものです。また、田島ルーフィング様、ボルクレイ・ジャパン様、リバコンテック様にはシート防水のご提供をいただきました。ここに記して感謝いたします。

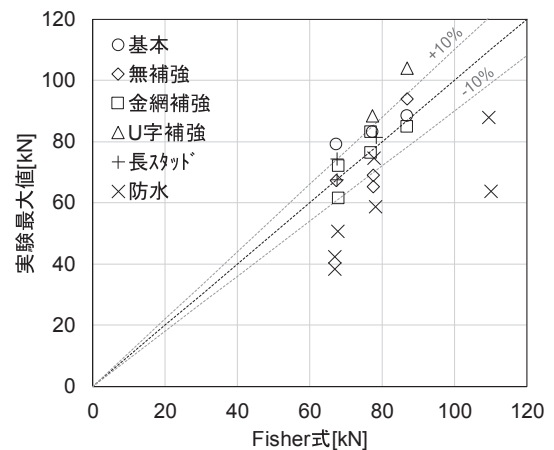


図 16 実験結果と Fisher 式の比較

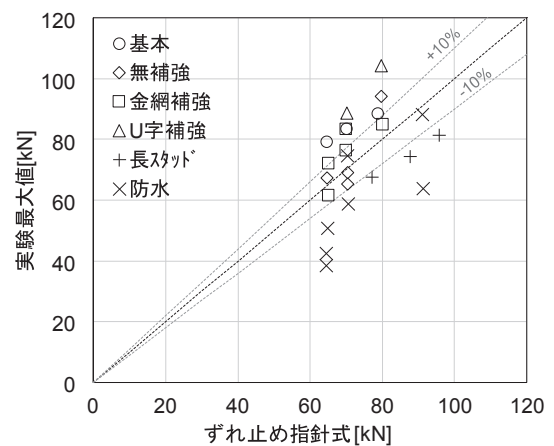


図 17 実験結果とずれ止め指針式の比較

参考文献

- 1) 佐藤ほか：山留め壁応力材を有効利用した合成地下外壁の開発－土水圧の作用に着目した面外長期荷重に対する設計法の提案－、日本建築学会技術報告集 第16号、123-128、2002.1
- 2) 日本建築学会：各種合成構造設計指針・同解説、2023
- 3) 日本建築学会：鋼・コンクリート機械的ずれ止め構造設計指針、2022

ひとこと

CUW工法は仮設構造物を再利用して地下外壁の躯体数量を減らし地下構造物を合理化する工法です。今後は本工法の採用実績を増やし、CO₂の削減など社会に貢献していきたいと思ひます。



山黒 寛矢