

頭付きスタッド押抜き試験の FEM 解析による耐荷特性の検討

A study for load transfer mechanism of the headed stud push-out test through FEM analysis

北武コンサルタント(株) ○正 員 宮本真一 (Shinichi Miyamoto)
 北武コンサルタント(株) 正 員 坂口淳一 (Junichi Sakaguchi)
 北武コンサルタント(株) 正 員 渡邊忠朋 (Tadatomo Watanabe)

1. はじめに

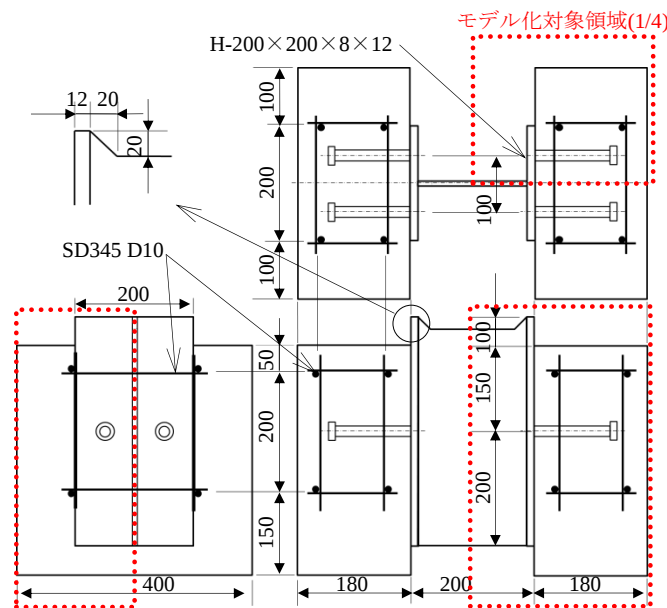
現状のスタッドのせん断耐力は、押抜き試験結果に基づいた算定手法が用いられている。しかし、実構造物のスタッドは種々の応力下で適用されており、押抜き試験の応力状態とは必ずしも一致していないため、その適用性が課題とされている。

そこで、スタッドの押抜き試験の荷重伝達状態を把握し、耐荷メカニズムを解明することを目的として、解析的検討を実施した。

2. 検討方法

2.1 解析対象

試験体構成の模式図を図-1 に示す。この設定は JSSC 頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)¹⁾ を参考にした。



注：試験治具は省略，単位：mm

図-1 試験体構成

2.2 解析モデル

解析モデルは図-1 に示す 1/4 の領域でモデル化した。解析モデル概要を図-2 に示す。H 鋼および頭付きスタッド(JIS B 1198-1995)は表-1 に示す寸法とした。図-3 にスタッドの要素分割を示す。溶接部は余盛りをモデル化せず、スタッドを H 鋼フランジに剛結しスタッド軸径と同一とした。図-4 に境界条件を示す。線支持の場合、板厚 10 mm のプレートもモデル化した。なお、鉄筋はモデル化していない。

表-1 鋼材の寸法

鋼材	寸法
H 型鋼	200×200×8×12
スタッド	軸径 19×長さ 130×頭部径 32×頭部厚 10

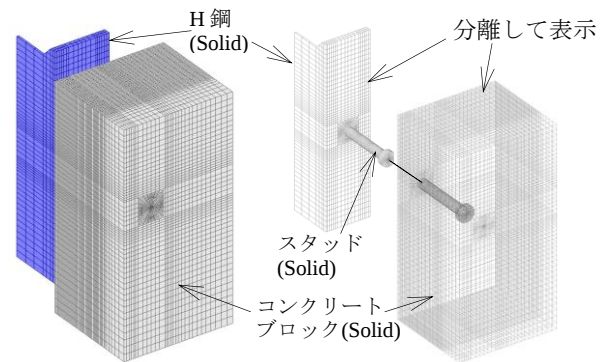


図-2 解析モデル概要

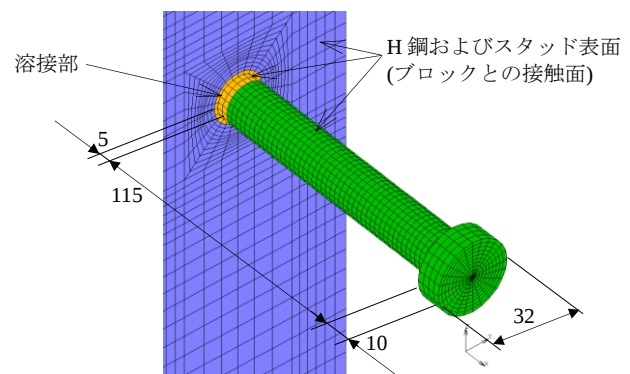


図-3 スタッドのモデル化 単位：mm

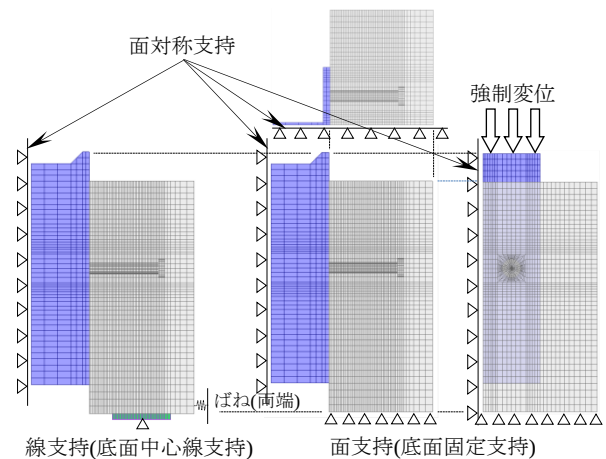


図-4 境界条件

表-2 材料特性

鋼材	ヤング係数：200kN/mm ² 、ポアソン比：0.3 スタッド降伏点：235N/mm ² (バイリニア)
コンクリート	圧縮強度：50N/mm ² ヤング係数：33000 N/mm ²
コンクリート (非線形)	分散ひび割れ・テンションスティフニング ひび割れ応力：3.12N/mm ²

コンクリートの非線形性はコンクリート標準示方書²⁾に準拠

2.3 解析ケース

本検討では基礎的なパラメータの影響を解析的にみることを目的とし、ブロックの拘束条件、コンクリートの材料特性(線形・非線形、ひび割れ)、スタッド降伏の有無、摩擦について耐荷機構への影響を検討することとした。適用した材料特性を表-2に示し、解析ケースを表3に示す。解析ケースはA, B, Cシリーズに分けた。Aではすべて線形とし拘束条件を変えた。Bではコンクリートを非線形、スタッドを線形とした。B5はB3に対しブロック下端部に鉄筋を巻き付け、回転を拘束することを模擬したものである。Cはスタッドの降伏の影響をみるために設定したケースである。

H鋼および溶接部は線形とした。本検討では溶接部の形状はモデル化せず、スタッド軸を直接H鋼に剛結するようにモデル化しヤング係数で剛性を模擬した。A, Cシリーズは直径で6mm増を想定しヤング係数を3倍としたが、BシリーズはH鋼およびスタッドと同一とした。Cシリーズは、スタッドを降伏させるため軸径の増加により剛性が増える分、剛性を上げたものである。AはCと比較するため同じ条件とした。Bは本検討ではスタッドは降伏させないため局所的な剛性変化を避ける狙いでスタッドと同じヤング係数とした。なお、接触の摩擦モデルはクーロンモデル(変位)を適用した。荷重は強制変位とし、漸増載荷による静的解析を実施した。

3. 検討結果

3.1 ブロックの支持条件と変形

荷重-変位曲線についてケースAを図-5に、ケースB

表-4 解析結果(スタッド降伏ひずみ到達点)

ケース	荷重(kN)	ずれ(mm)	鉛直変位(mm)
A1	106.8	0.14	0.27
A2	107.1	0.13	0.25
A3	106.9	0.17	0.30
A4	106.1	0.13	0.27
B1	36.85	0.13	0.18
B2	38.32	0.13	0.18
B3	37.98	0.17	0.21
B4	37.55	0.12	0.18
B5	47.08	0.15	0.21

を図-6に示す。ずれはスタッド頭と軸先端の鉛直変位の差から求め、荷重はスタッド1本あたりを示す。途中までの曲線は強制終了または発散による。また、ケースA, Bについてスタッド軸が降伏ひずみに到達した際の荷重とその時のずれを表-4に示し、スタッドの鉛直変位分布を図-7, 図-8に示す。

図-5は強制変位およびずれ変位で示しており、図-6はずれ変位で示している。図-5の強制変位では、同じ支持条件でも固定した方が剛性は大きく、線支持より面支持の方が剛性は大きい。しかし、ずれ変位では、A2とA4はほぼ同じ剛性を示しており、A1はそれらより低く、A3は最も低い剛性である。図-7でもこれらの傾向は明らかである。また、図-6では、ひび割れにより軟化した後剛性は低下するが、B5は軟化してからも他のケースに比べ低下せず、最も大きな荷重を示した。

図-8では、B1, B2, B4はほぼ同じ変位分布を示すが、B3は回転角が大きくなっている。B5は回転角は抑えられているが、接合部付近の変位変化が大きくなっており、せん断による荷重伝達が大きい状態を推測できる。

表4より、AとBで降伏荷重は大きく異なるが、ずれはほぼ同程度の範囲となった。Aでは全ケースでほぼ同じ荷重となり、BではB1~B4まではほぼ同じ降伏荷重であるが、B5は20%以上高い。図-6の変位0.4mm時点での変形を図-9に示す。B3では水平反力によりブロックが側方に押し出されている様子がわかる。

表-3 解析ケース

No.	支持条件 ブロック底	水平拘束 ブロック底	回転拘束(ブ ロック外側下端)	コンクリート (圧縮軟化)	コンクリート (引張側)	スタッド (降伏)	摩擦係数	接触分離力
A1	面支持	自由	—	線形	線形	線形	0.0	3.12 N/mm ²
A2	面支持	固定	—	線形	線形	線形		
A3	線支持	自由	—	線形	線形	線形		
A4	線支持	固定	—	線形	線形	線形		
B1	面支持	自由	—	非線形	非線形	線形		
B2	面支持	固定	—	非線形	非線形	線形		
B3	線支持	自由	—	非線形	非線形	線形		
B4	線支持	固定	—	非線形	非線形	線形		
B5	線支持	自由	拘束(ばね)	非線形	非線形	線形		
C1	面支持	固定	—	線形	線形	非線形		
C2	線支持	固定	—	線形	線形	非線形	0.3	
C3	面支持	固定	—	非線形	線形	非線形		
C4	線支持	固定	—	非線形	線形	非線形		
C5	面支持	固定	—	非線形	線形	非線形		
C6	線支持	固定	—	非線形	線形	非線形		

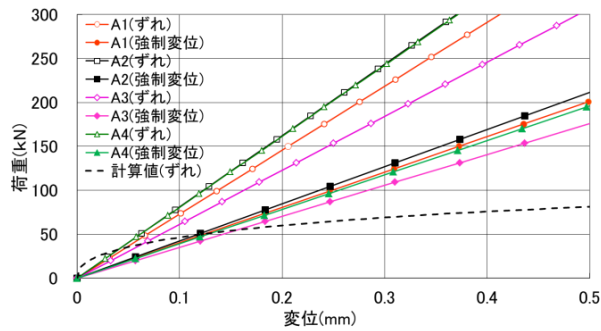


図-5 荷重－変位曲線(A シリーズ)

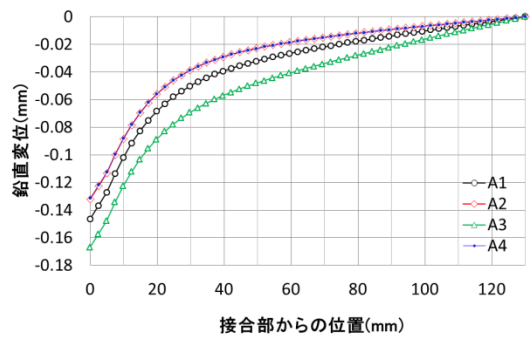


図-7 降伏ひずみ時のスタッド変位分布(A シリーズ)

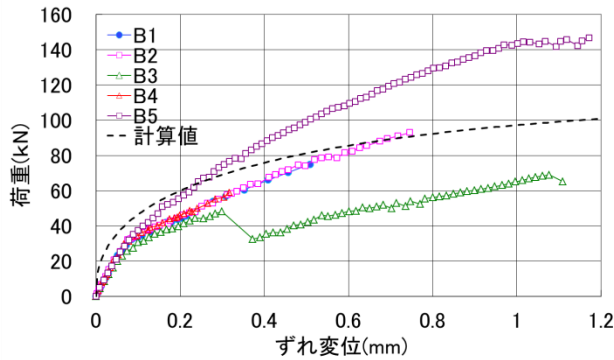


図-6 荷重－変位曲線(B シリーズ)

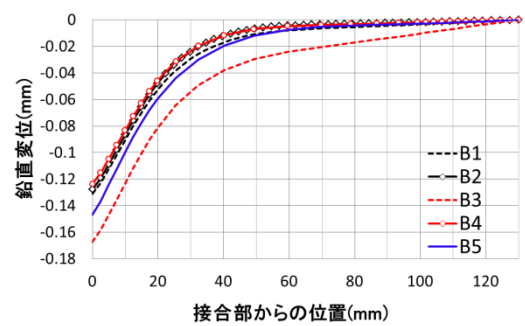


図-8 降伏ひずみ時のスタッド変位分布(B シリーズ)

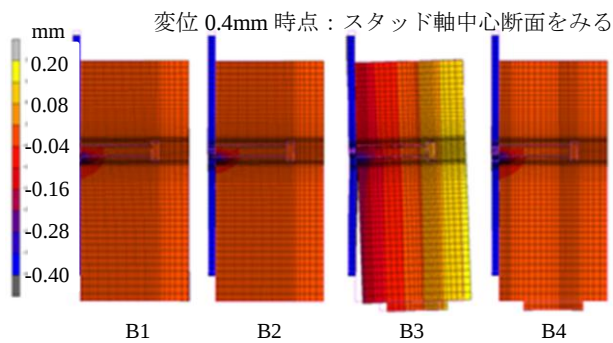


図-9 水平変位コンター図(変形×20)

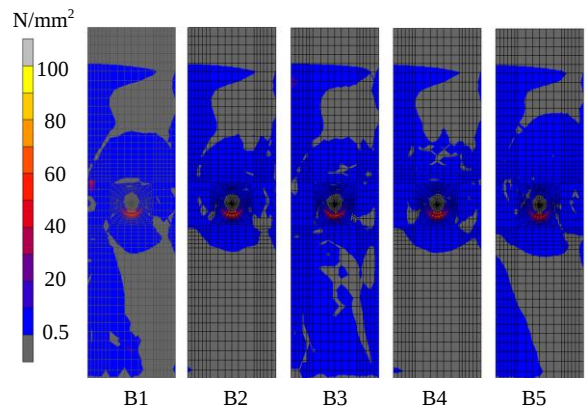


図-10 H 鋼フランジ表面の接触応力分布(降伏ひずみ時)

次に、図-10 にスタッドの降伏ひずみ到達時点における H 鋼の接触応力分布(圧縮のみ)を示す。B1, B3 の面支持では接触面積は B2, B4 の線支持に比べ大きく、B2, B4 では接触面積は小さくなっている。しかし、同じ線支持で回転拘束した B5 は B1 に近い接触を保ち、B2, B4 とは明らかに異なる接触状態を示している。

また、図-11 に面支持のブロック底面の反力(垂直応力成分)をベクトルで示す。また、図-12 に線支持における反力ベクトルを示す。B1 では引張側の反力がブロック底面端部で発生しており、水平反力による押し出しでブロックに曲げが生じることがわかる。B2 の底面固定では曲げは抑えられている。一方、B3 は鉛直方向の反力しか取れないため、側方に押し出される条件であることは容易に推測できる。また、線支持固定の B4 では反力ベクトルはスタッド接合部の方向を示しており、底面に対する角度は 74.53° であった。B5 では回転拘束の反力による合力の方向は 74.61° となり、B4 と同方向に向いていることがわかった。

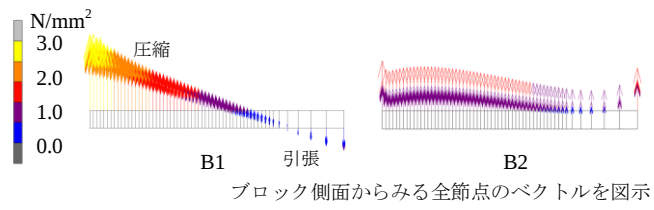


図-11 底面の反力(垂直応力成分ベクトル：降伏ひずみ時)

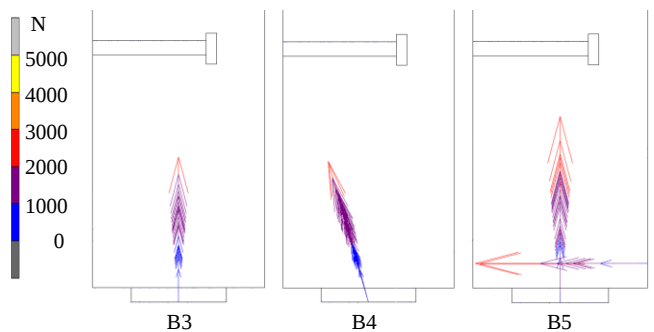


図-12 底面の節点反力ベクトル(降伏ひずみ時)

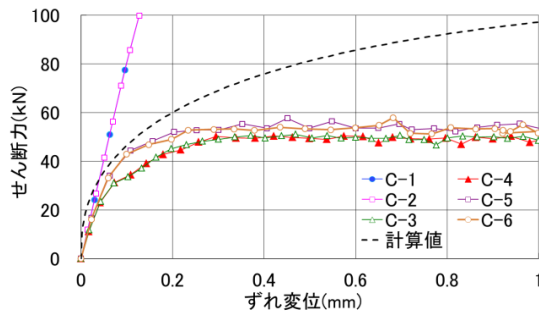


図-13 荷重-変位曲線(ケース C)

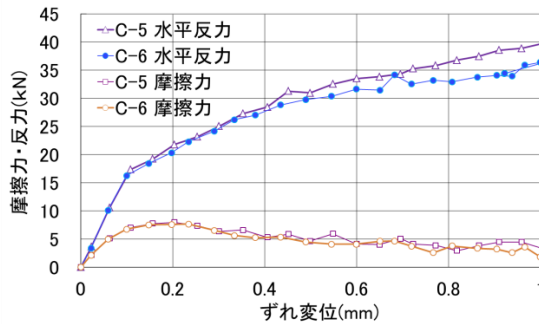


図-14 摩擦力・水平反力-変位曲線

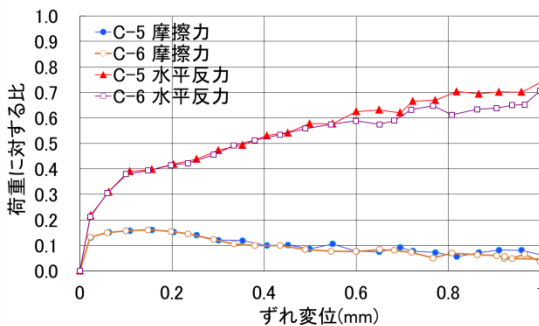


図-15 摩擦力/荷重比・水平反力/荷重比-変位曲線

3.2 H 鋼の摩擦力と水平反力

C シリーズの荷重-変位曲線を図-13 に示す。C1, C2 はコンクリートを線形としたケースである。スタッドは 100kN を越えた付近で降伏し(表-4, A2, A4 と同じ)、それ以降、剛性は若干低下するが塑性化は進まない結果であった。これはコンクリートを線形としたため、スタッド溶接部付近のコンクリートの圧縮荷重の割合が大きくなり、スタッドに作用する曲げモーメントが相対的に小さくなったためと考える。C1, C2 の曲線は A2, A4 と同じ剛性で降伏荷重までは一致している。また、C3~C6 では圧縮側を非線形としたため軟化によりスタッドは降伏したが、降伏後荷重は一定となった。これはスタッドの非線形特性をバイリニアとし、かつ、スタッドが受け持つ荷重が支配的であったためであると考えられる。

また、ケース C5, C6 の摩擦力と水平反力の履歴を図-14 に示し、載荷荷重に対する比の履歴を図-15 に示す。摩擦なしと摩擦ありで行ったケースでは摩擦力が耐力力の増加となって表れるはずである。図-16, 図-17 に荷重から摩擦力を差引いた力の履歴と摩擦なしのケースの比

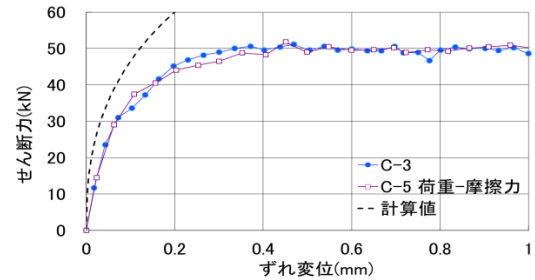


図-16 摩擦力を差引いた力-変位曲線(面支持)

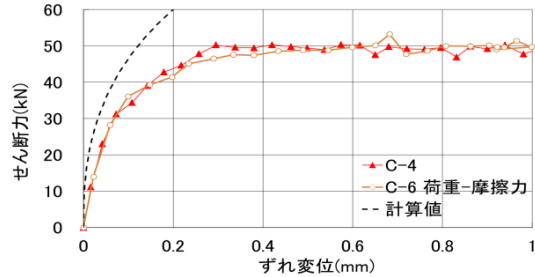


図-17 摩擦力を差引いた力-変位曲線(線支持)

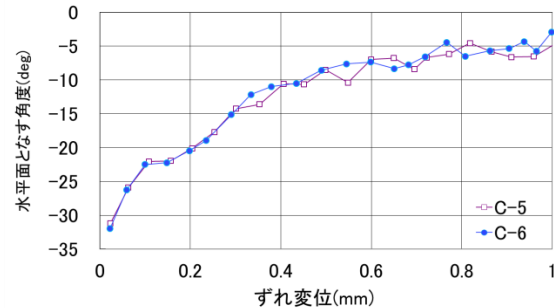


図-18 H 鋼から受ける合力の角度-変位曲線(C5, C6)

較図を示す。両支持条件ともに曲線はほぼ一致しており、耐力力はスタッドのせん断力と摩擦力の和となっていることがわかる。また、図-18 に摩擦・水平反力から計算した H 鋼から伝達する合力の水平面に対する角度の履歴を示す。載荷とともに摩擦力は低下し角度も水平に近づき、水平力の割合は増加していく特性を示している。

4 おわりに

本検討では頭付きスタッド押抜き試験の FEM 解析により耐力機構へのパラメータの影響を調べた。ブロックの支持条件は荷重伝達機構に大きく影響し、線支持、水平固定とする方法で荷重は最大であった。また、コンクリートと H 鋼の接触摩擦力とスタッドの受け持つせん断力の和がせん断耐力として得られることがわかった。

解析モデルは線形を基本とし非線形や計算値との比較から仮想実験モデルとして概ね妥当であると考えられる。今後は鉄筋や溶接部の影響も含めて詳細に調べていきたい。

参考文献

- 1) 日本鋼構造協会：頭付スタッドの押抜き試験方法(案), JSSC テクニカルレポート, No.35, pp.1-24, 1996.11
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書, pp.452-470, 2013
- 3) 土木学会：複合構造標準示方書, pp.59-67, 2009