

UFC床版と鋼桁の接合部における間詰め厚さの影響に関する検討

鹿島建設(株)	正会員	工修	○横田	祐起
阪神高速道路(株)	正会員	工修	小坂	崇
阪神高速道路(株)		工修	佐藤	彰紀
鹿島建設(株)	正会員	工修	一宮	利通

Abstract : To replace the deteriorated RC slabs with new higher durable ones quickly, the authors have developed lightweight and high durability slab using ultra high strength fiber reinforced concrete (UFC). The UFC slab is connected to steel girders using stud dowel in the same manner as the PC slab. In this manner, mortar is filled in the space between slab and girder and thickness of filled-mortar layer is 50mm in usual. However, to keep the same alignment before and after replacement, mortar layer becomes thicker because UFC slab is lightweight and the deflection of girder changes after replacement. Therefore, in this study, the influence of mortar layer thickness on the capacity of stud dowels was examined by shear tests and numerical analysis. As results, it is confirmed that the capacity of dowels barely changed even if mortar layer is thicker than usual.

Key words : Ultra high strength fiber reinforced concrete, Bridge slab, Stud dowel

1. はじめに

近年、高速道路では老朽化と交通荷重の繰返し作用によるRC床版の損傷が顕在化している。このような状況を踏まえ、筆者らは鋼桁を有する既設橋のRC床版取替えに適用できる「軽量かつ耐久性の高い床版」として、超高強度繊維補強コンクリート（以下、UFC）を用いたUFC床版を開発している¹⁾。

図-1にRC床版の更新に対応したUFC床版の構造概要を示す。UFC床版の基本構造はPC床版と同様であるが、UFCの高い圧縮強度を活かして大きなプレストレスを導入することで、一般的なPC床版よりも床版厚さを薄くした軽量床版である。同床版の適用により、架設設備の簡易化や架設時間の短縮などが期待できる。加えて、高耐久な材料であるUFCを使用することで、床版の耐久性の向上が期待できる。UFC床版と鋼桁の接合は、通常のPC床版の場合と同様の方法を想定している。すなわち、床版に頭付きスタッド用の箱抜きを設けておき、鋼桁と床版間の隙間をモルタルで、箱抜き孔を膨張コンクリートなどで充填して一体化する（図-2）。床版と鋼桁間

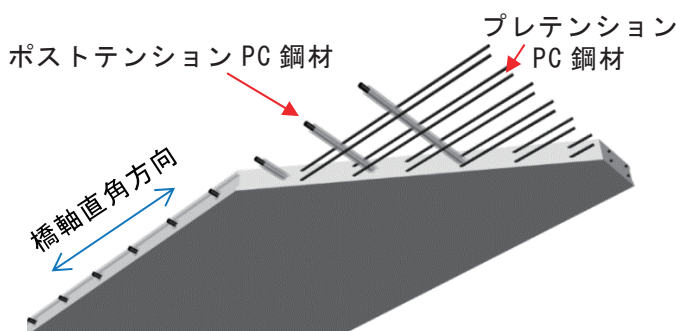


図-1 RC床版の更新に対応したUFC床版の構造概要

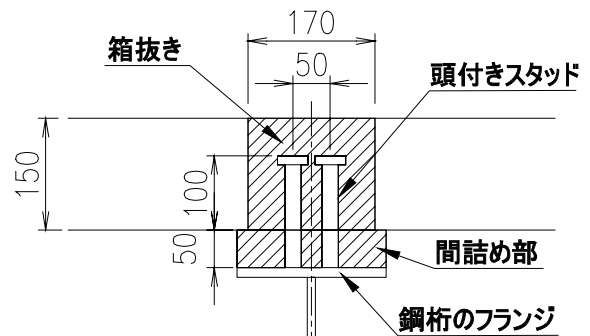


図-2 UFC床版と鋼桁の接合構造

の隙間は一般的に50mm程度であり，筆者ら²⁾はこれまでの研究で，間詰め厚さを50mmとした場合の本接合構造のせん断耐力を実験によって確認している。しかし，UFC床版は軽量であり，床版の取替え前後で床版の自重による鋼桁のたわみが増加するため，主桁支間22m，幅員6.25mの高架橋を想定して床版取替え前後で線形が同一となるような間詰めの厚さを試算したところ，間詰め厚さは50～85mmとなった。そこで，本研究では，間詰め部を厚くした試験体を用いて押抜き試験方法³⁾によるせん断試験を実施し，間詰め厚さが接合構造の耐力に及ぼす影響を確認した。また，実験結果の妥当性を確認する目的で，3次元非線形FEM解析を実施した。

2. 押抜きせん断試験

2.1 試験の概要

試験体形状を図-3に示す。UFC床版部の厚さは150mmとした。鋼桁を模擬したH形鋼 (H-200×200×8×12) には，両フランジに頭付きスタッド (JIS B1198:2011) を2本ずつ配置した。UFC床版部に設けたスタッド用の箱抜き孔，および間詰め部にモルタルを充填し，床版部とH形鋼を一体化した。H形鋼のフランジと間詰め部の幅はともに200mmとし，すべての試験体で共通とした。

試験体の一覧を表-1に示す。試験体No. 1～3は同一の仕様で，間詰め厚さを50mm，頭付スタッドの直径を22mmとしており，既往の研究²⁾で試験を行ったものである。試験体No. 4, 5は，間詰め厚さをそれぞれ75mm, 100mmとし，頭付スタッドの直径を22mmとした。また，試験体No. 6, 7は，間詰め厚さをそれぞれ75mm, 100mmとし，頭付スタッドの直径を25mmとした。すべての試験体において，頭付スタッドの長さはUFC床版上面からのかぶりが約50mmとなるように設定した。

間詰め部のモルタル充填は床版を水平にして実施し，片側を充填後，数時間後にもう片側を充填した。なお，本試験では箱抜き孔にもUFC床版とH形鋼間の隙間と同時にモルタルを充填した。

表-1に使用材料の強度試験結果を示す。モルタルには収縮補償型のプレミックスモルタルを使用し，モルタルの補強および剥落防止を目的として繊維長6mmの超高密度ポリエチレン繊維

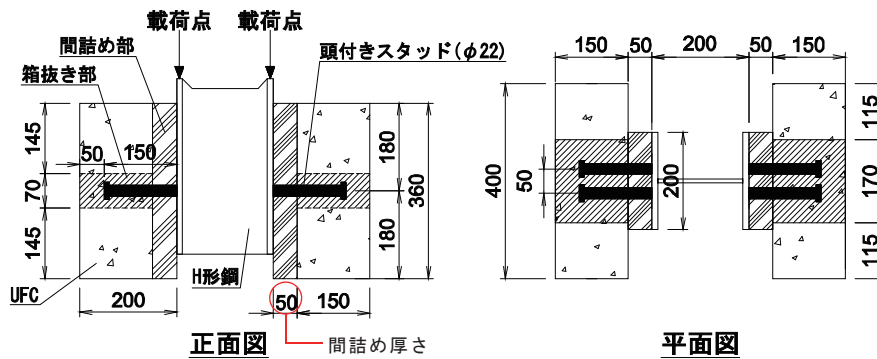


図-3 試験体形状 (試験体No. 1)

表-1 押抜きせん断試験の試験ケースおよび試験結果

試験体	間詰め部		床版部		頭付きスタッド			荷重方法	最大耐力 Pmax (kN/本)	降伏耐力 Py (kN/本)					
	使用材料	厚さ (mm)	圧縮強度 (N/mm ²)	使用材料	圧縮強度 (N/mm ²)	径	降伏強度 (N/mm ²)				引張強度 (N/mm ²)				
No. 1	PE繊維混入 モルタル (L=6mm, 0.2%混入)	50	71.7	UFC	198.5	φ 22	346.3	457.0	単調荷重	155.4	107.6				
No. 2			59.3		179.4					137.1	99.8				
No. 3			68.5		186.0					149.3	96.2				
No. 4		75	73.2		202.1	φ 22	320.7	457.3		漸増繰返 し荷重	143.2	96.7			
No. 5		100	72.0								372.0	465.0	151.5	109.6	
No. 6		75	71.8								φ 25	305.7	428.7	165.1	112.3
No. 7		100	71.6											371.7	446.0

PE繊維：超高分子ポリエチレン繊維，L：繊維長，繊維の混入量はモルタルの体積に対する比率

を0.2%混入した。UFCにはエトリンナイト生成系のUFC⁴⁾を使用した。UFCの養生は、常温の封緘養生を24時間行い、そののち85℃の蒸気養生を24時間行った。なお、表-1のモルタルとUFCの圧縮強度は両側の平均値である。

荷重方法は、日本鋼構造協会の試験方法³⁾に準じた押抜きせん断試験とし、試験体No. 1は静的単調荷重、No. 2~7は漸増繰返し荷重とした。H型鋼のフランジ内面に固定した変位計により、モルタル層の鉛直変位を計測し、計測値をモルタル層とH型鋼の鉛直方向相対ずれ変位（以下、ずれ変位）とした。漸増繰返し荷重では、スタッド1本あたりの荷重増分を10kN/本、下限荷重を1.25kN/本としてずれ変位が約1mmに達するまで荷重制御で繰返し荷重を実施した。そののち、ずれ変位の増分を0.5mm、下限荷重1.25kN/本としてずれ変位が約2.0mmに達するまで繰返し荷重後、最後は試験体が終局に至るまで単調荷重を実施した。鋼製の台座上に敷いたビニールシート上に不陸調整用の石膏を敷設し、その上に試験体を設置した。床版部の開きは拘束しなかった。

2.2 試験結果

各試験体の最大耐力および降伏耐力を表-1に示す。なお、降伏耐力は文献2)および文献3)を参考に、最大荷重の1/3の点の割線をずれ変位が0.2mmの位置にオフセットし、その直線と実験結果が交差する荷重を降伏耐力として求めた。スタッドの直径が22mmである試験体No. 1~5を比較した場合、同25mmの試験体No. 6, 7を比較した場合ともに、最大耐力と降伏耐力は間詰め厚さに関わらず同程度であった。スタッドの直径が22mmである試験体No. 1~5の最大耐力および降伏耐力の平均値はそれぞれ147kN/本、102kN/本であったのに対し、スタッドの直径が25mmの試験体No. 6, 7の最大耐力および降伏耐力の平均値はそれぞれ168kN/本、116kN/本であり、最大耐力、降伏耐力ともにスタッドの径が22mmの試験体の平均値に比して約1.14倍であった。スタッドの直径比(25/22)もおおよそ1.14であり、スタッドの直径に比例して耐力が増加していた。

次に、スタッドの直径が22mmの試験体No. 1~5のせん断力とずれ変位関係を図-4に示す。いずれの試験体もずれ変位が約1mmで荷重の増加が小さくなり、ずれ変位が約5mmで最大耐力に到達した。そののち、スタッドの直下の間詰めモルタル部に鉛直方向のひび割れが生じて耐力が低下したが、ひび割れ発生後も約10mmまで最大耐力に近いせん断力を保持した。図-4のずれ変位1mmまでの拡大図を図-5に示す。単調荷重を行った試験体No. 1においては同一変位での荷重が他の試験体に比べて若干大きくなったが、その他の試験体については間詰め厚さに関わらず、降伏耐力までは同様な挙動を示した。

また、試験体No. 4~7のせん断力-ずれ変位関係を図-6に、ずれ変位が1mmに到達する時点までの拡大図を図-7に示す。スタッドの径が25mmの試験体No. 6, 7では、同22mmの試験体No. 4, 5に比べて同一変位での荷重が大きくなったが、間詰め厚さに関わらず同様の挙動であった。

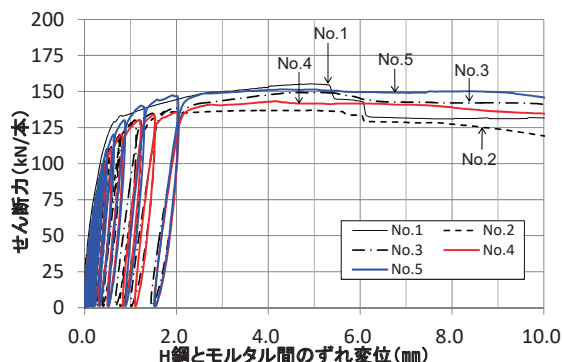


図-4 せん断力-ずれ変位関係 (No. 1~5)

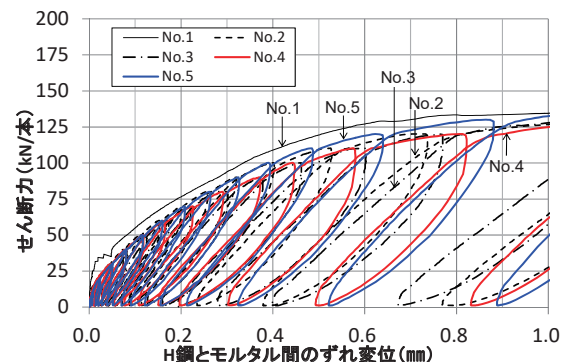


図-5 せん断力-ずれ変位関係 (No. 1~5) のずれ変位1mmまでの拡大図

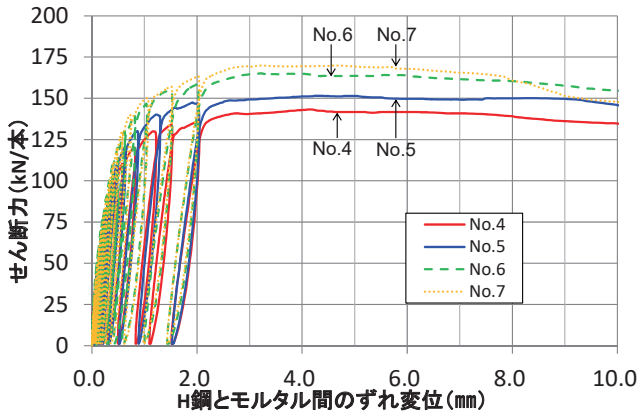


図-6 せん断力-ずれ変位関係 (No. 4~7)

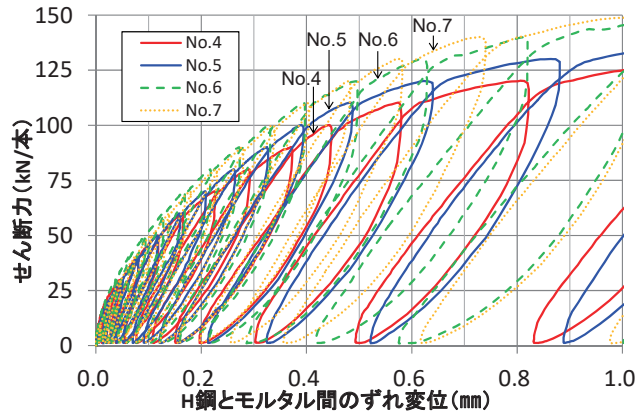


図-7 せん断力-ずれ変位関係 (No. 4~7) のずれ変位1mmまでの拡大図

3. 3次元非線形FEM解析

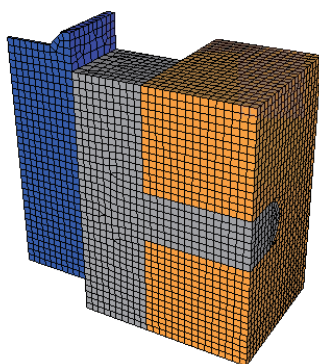
押抜きせん断試験では、間詰め厚さに関わらず接合部のせん断耐力が同程度であるという結果が得られた。この結果の妥当性を確認するため、3次元FEM解析を実施した。

3.1 FEM解析の概要

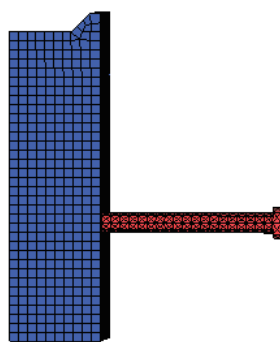
解析ケースを表-2に示す。解析対象は、押抜きせん断試験において間詰め厚さのみが異なる試験体No. 3~5とした。試験体は対称な構造であるため、1/4モデルを構築し(図-8)、対称面を考慮した拘束条件を付与した。UFC床版部、モルタル部、H形鋼とスタッドはソリッド要素でモデル化した。UFCおよびモルタルのひび割れモデルには、固定ひび割れモデルを使用した。また、鋼材とモルタルの界面、およびUFCとモルタルの界面には、文献5)を参考に粘着力が0(N/mm²)、摩擦係数が0.3のクーロン摩擦モデルを適用したインターフェース要素を配置した。

表-2 解析ケースおよび解析結果

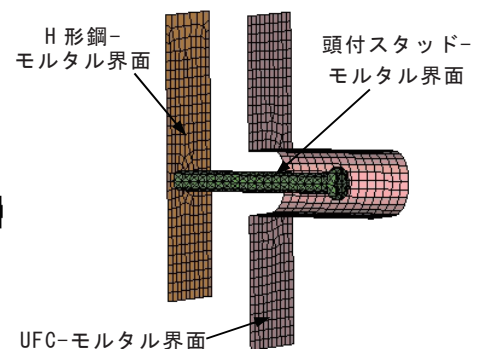
試験体		UFC			間詰めモルタル			頭付きスタッド			最大耐力	
No.	間詰め厚さ (mm)	圧縮強度 f_{cu} (N/mm ²)	引張強度 f_{tu} (N/mm ²)	弾性係数 E_{UFC} (kN/mm ²)	圧縮強度 f_{cm} (N/mm ²)	引張強度 f_{tm} (N/mm ²)	弾性係数 E_m (kN/mm ²)	弾性係数 E_s (kN/mm ²)	降伏強度 f_y (N/mm ²)	引張強度 f_u (N/mm ²)	実験値 (kN/本)	解析値 (kN/本)
3	50	179.4	16.6	42.3	68.5	5.2	26.6	173.0	346.3	457.0	149.3	145.9
4	75	202.1	14.0	43.8	73.2	4.9	24.4	173.0	320.7	457.3	143.2	146.6
5	100	202.1	14.0	43.8	72.0	5.8	27.0	173.0	372.0	465.0	151.5	151.7



(a) 全体図



(b) H形鋼と頭付スタッド



(c) インターフェース要素

図-8 解析モデル

モデルの各部位に適用した材料非線形モデルを図-9に示す。UFCには、超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案)⁶⁾に記載されたモデルを用いた。モルタルには、圧縮側には放物線モデルを、引張側にはひび割れ後に軟化勾配を有するモデルを用いた。H形鋼にはバイリニアモデルを、頭付スタッドには降伏後のひずみ硬化を考慮できるテトラリニアモデルを用いた。H形鋼の弾性係数は鋼材の一般的な弾性係数である200 (kN/mm²)とし、降伏強度はH形鋼の規格降伏強度である300 (N/mm²)とした。その他の材料モデルには、表-2に示す実験時の強度試験結果を用いた。解析はH形鋼の上面に強制変位を与えて、変位制御で実施した。



図-9 材料非線形モデル

3.2 解析結果

解析で算定された最大耐力を表-2に、解析と押抜き試験のせん断力-ずれ変位関係の比較を図-10に示す。すべての解析ケースにおいて、実験結果と同程度の最大耐力を示しており、本研究の解析手法によって接合部の最大耐力を推定できることを確認した。また、最大耐力到達後も最大耐力と同程度のせん断力を保持してずれ変位が増加しており、押抜き試験において確認された挙動と同様の挙動が解析においても確認された。

図-11に最大荷重到達時におけるモルタル部の主ひずみコンター図を示す。間詰め厚いNo. 4, 5も標準的な間詰め厚さのNo. 3と同様に、頭付スタッドの付根の位置でひずみが大きくなっている。このことから、接合部の最大耐力を決定づけるモルタルのひび割れ現象は、間詰め厚さに関わらずスタッドの付根で生じるため、間詰めが厚い場合でも最大耐力が低下しなかったものと考えられる。

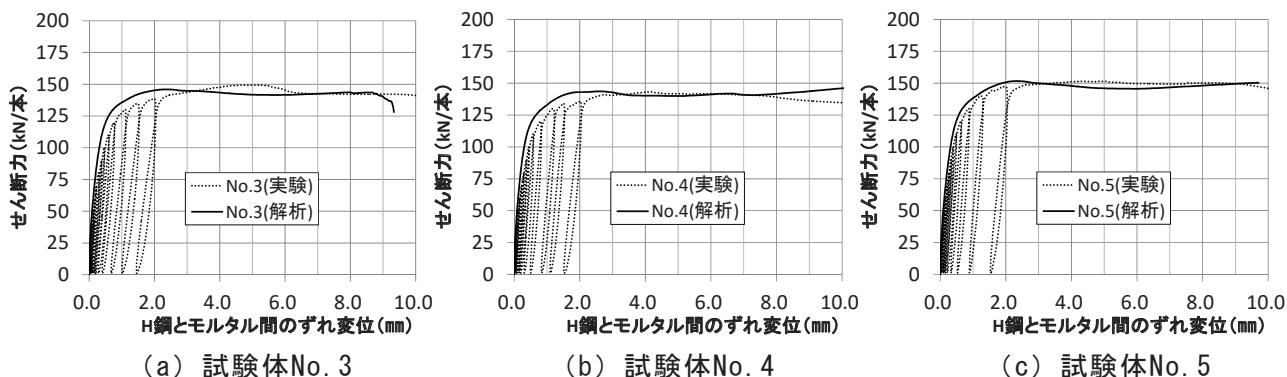


図-10 解析結果と実験結果の比較

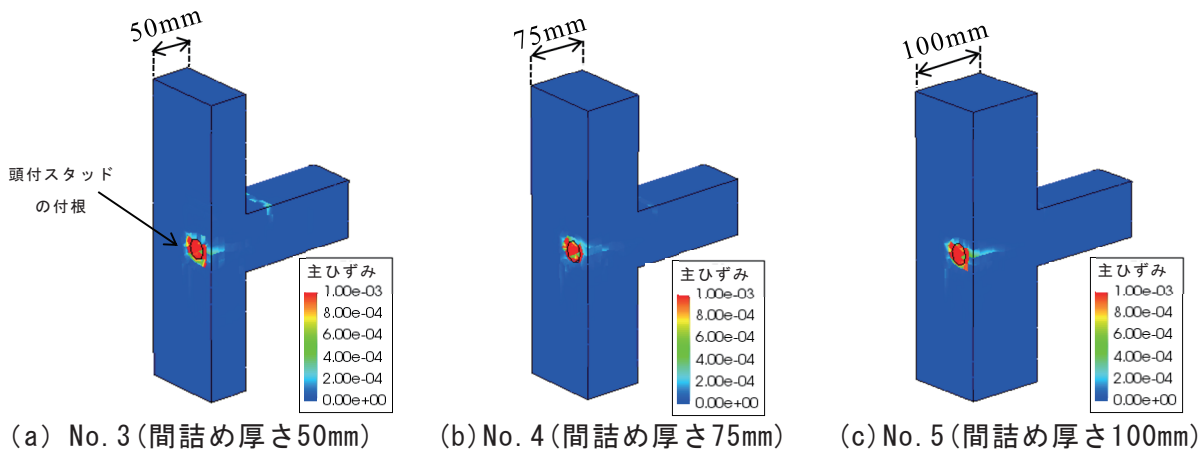


図-1-1 最大荷重到達時におけるモルタル部表面の主ひずみコンター図

4. おわりに

本研究では、間詰め厚さをパラメータとして、UFC床版と鋼桁の接合構造を再現した試験体の押抜きせん断試験および3次元非線形FEM解析を行い、以下の知見を得た。

- ・本接合構造は、間詰め部の厚さが75mmおよび100mmの場合であっても、標準的な間詰め厚さ50mmの場合と同程度の最大せん断耐力および降伏せん断耐力を有することを確認した。
- ・本接合構造に用いる頭付スタッドの径を22mmから25mmと大きくした場合、接合部の最大せん断耐力および降伏せん断耐力が頭付スタッドの径に比例して大きくなる傾向を確認した。
- ・FEM解析によって算定された最大せん断耐力は、押抜き試験の結果と概ね一致しており、本研究の解析手法によって本接合構造の最大せん断耐力を推定できることを確認した。
- ・FEM解析におけるモルタル部のひずみ分布から、最大耐力を決定づけるモルタルのひび割れは間詰め厚さに関わらずスタッドの付根で生じると考えられる。そのため、間詰めに厚くしても接合部の耐力は低下しないと推定される。

本研究を行うにあたり、長岡技術科学大学長井名誉教授、東京工業大学二羽教授、岐阜大学内田教授および神戸大学三木准教授に御指導を頂きました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート(UFC)道路橋床版に関する技術評価報告書, 技術推進ライブラリー, 2015. 7
- 2) 横田ら：UFC床版と鋼桁の接合部に関する検討, 第26回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム, 2017. 10
- 3) 日本鋼構造協会：頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)とスタッドに関する研究の現状, 1996年
- 4) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリート「サクセム」の技術評価報告書, 技術推進ライブラリーNo. 3, 2006. 11
- 5) Wang, Q. et al. : Nonlinear Finite-Element Analysis of the Shear Behaviour of Stud Connectors, Proceedings of the Eleventh International Conference on Computational Structures Technology, Paper152, pp1-14, 2012
- 6) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針(案), コンクリートライブラリー113, 2004. 8