

UFC床版と鋼桁の接合部に関する検討

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

Abstract : Recently, the deterioration of RC slabs due to aging and repeated traffic load is actualized. To replace them with new ones quickly and reduce the maintenance cost, authors developed the light-weight and high-durability slab using ultra high strength fiber reinforced concrete(UFC).The UFC slab is connected to a steel girder using stud dowel in the same manner as the PC slab. However, it is assumed that the existing design equations for stud dowels are not applicable in our case because the compressive strength of UFC is extremely large and the UFC slab is thinner than the PC slab. Therefore, in this study, structural performances of the stud dowel are examined by shear tests and fatigue tests. As results, we confirmed that the method to calculate the allowable shear capacity from the yield shear capacity is applicable to the design of the stud dowel and fatigue strength can be evaluated using an existing design equation.

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载荷によって、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。同床版は、基本的な構造は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床版と鋼桁の接合構造は、通常のPC床版と同様、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50mm程度の間詰め部をモルタルで、箱抜きを膨張コンクリートなどで充填して一体化する（図-2）。PC床版と鋼桁を接合するスタッドの設計では、一般的には道路橋示方書²⁾の許容せん断力の式が適用され、疲労の照査は省略されている。しかし、UFCの設計基準強度は180N/mm²と高いこと、

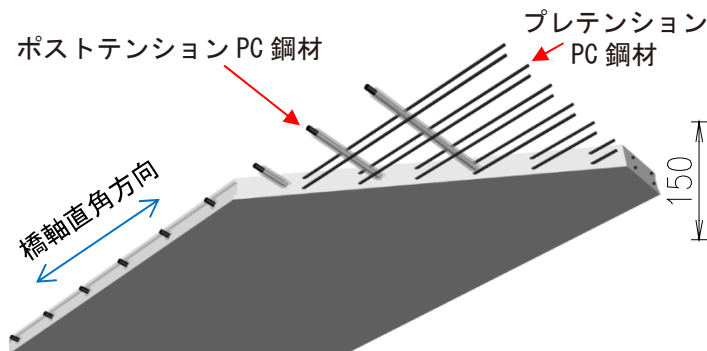


図-1 RC床版の更新に対応したUFC床版の構造概要

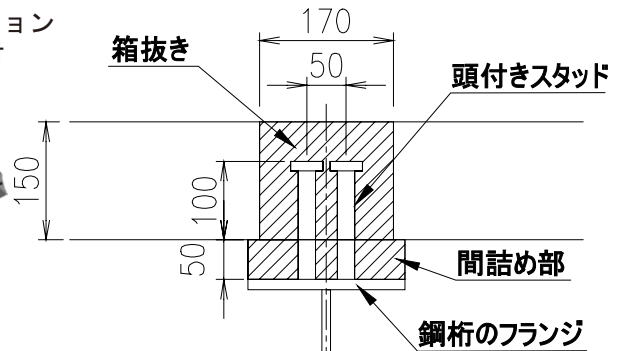


図-2 UFC床版と鋼桁の接合構造

ならびにUFC床版の厚さは道路橋示方書に記載の最小床版厚さよりも薄いことから、道路橋示方書の式は準用できないと考えられる。

そこで、本接合構造を再現した試験体を用いて押抜き試験方法³⁾によるせん断試験および疲労試験を実施し、設計で用いる許容せん断力の設定方法と既往の疲労強度式の適用性について検討した。

なお、筆者らのこれまでの研究⁴⁾では、間詰め部の剥落防止策として床版とH形鋼間の間詰め部を溶接金網で補強する方法について検討したが、本研究では間詰め材を合成繊維で補強する方法についても適用性を検討した。

2. 押抜きせん断試験

2.1 試験の概要

試験体の概要を図-3および表-1に示す。UFC床版部の厚さは150mmとした。頭付きスタッド(JIS B1198:2011)の径はφ22mmで長さは150mmとし、鋼桁を模擬したH形鋼の両フランジに2本ずつ配置した。H形鋼のフランジ幅は200mm、床版と鋼桁間の間詰め部の厚さは50mm、幅はH形鋼のフランジ幅と同じ200mmとした。

間詰め部のモルタル充填は床版を水平にして実施し(写真-1)、同日の数時間後に両側の間詰めを完了した。なお、本試験では箱抜き部にも厚さ50mmの間詰め部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、後述のとおり試験体No. 3~7のモルタルには合成繊維を混入した。UFCにはエトリンサイト生成系のUFC⁵⁾を使用した。床版部のUFCは、養生として常温の封緘養生を24時間行い、その後85℃の蒸気養生を24時間行った。なお、表-1のモルタルおよびUFCの圧縮強度は両側の平均値である。

試験体No. 1~5には、それぞれで異なる間詰め部の補強・剥落防止策を施した。No. 1, 2では、床版とH

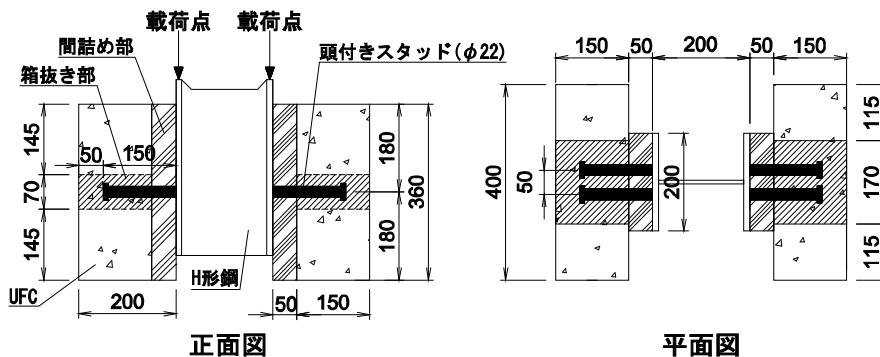


図-3 試験体の概要

表-1 押抜きせん断試験の試験体および試験条件

試験体	間詰め		床版部		頭付きスタッド		最大耐力 Pmax (kN)	降伏耐力 Py (kN)			
	仕様	圧縮強度 (N/mm ²)	仕様	圧縮強度 (N/mm ²)	仕様	引張強度 (N/mm ²)					
No. 1	モルタル+溶接金網	59.2	UFC	200.3	φ 22	2本/面	469	単調載荷	130.1	86.1	
No. 2		59.2						漸増繰返し載荷	135.4	89.0	
No. 3	PP繊維混入モルタル (L=12mm, 0.05%混入)	60.0						198.5	単調載荷	128.2	93.3
No. 4	PE繊維混入モルタル (L=3mm, 0.2%混入)	64.9						198.5	単調載荷	143.4	97.5
No. 5	PE繊維混入モルタル	71.7						198.5	単調載荷	155.4	107.6
No. 6	(L=6mm, 0.2%混入)	59.6						179.4	漸増繰返し載荷	137.1	99.8
No. 7	69.6	186.0						149.3		96.2	

PP繊維：ポリプロピレン繊維，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

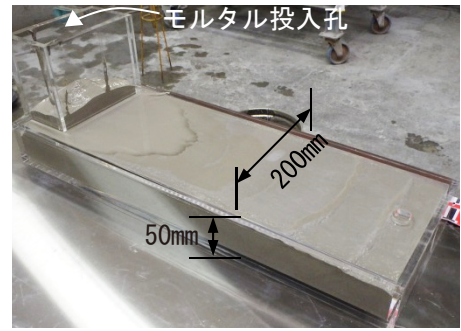


写真-1 間詰め部の充填状況 写真-2 溶接金網設置状況 写真-3 モルタル充填性確認試験

形鋼間の間詰め部を直径3.2mmの鋼材が75mm間隔で配置された溶接金網で補強した(写真-2)。また, No. 4にはモルタルに長さ12mmのポリプロピレン繊維(以後, PP繊維)を, No. 5, 6には長さ3mm, 6mmの超高分子ポリエチレン繊維(以後, PE繊維)をそれぞれ混入した。

繊維の混入量は, 間詰め部に良好に充填することが可能な範囲で設定した。繊維を混入したモルタルの充填性は, 写真-3に示すようにUFC床版と鋼桁間の50mmの間詰め部を模擬した模型を用いた充填試験により判断した。PP繊維は剥落防止を目的



写真-4 押抜きせん断試験

とした場合の一般的な混入量である0.05%を混入した。PP繊維は繊維長が12mmと長いものを用いたため, 0.05%よりも混入量を増やすと充填が困難となった。PE繊維はPP繊維よりも繊維長が短いものを用いており, 混入量を0.2%まで増やしても充填可能であることが確認されたため, 混入量は0.2%とした。

荷重方法は押抜きせん断試験とし(写真-4), 試験体No. 1, 3~5は静的単調荷重, 試験体No. 2は漸増繰返し荷重とした。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(床版部とH形鋼の鉛直方向相対変位)が約1mmに達するまで荷重制御で繰返し荷重を実施した。その後はずれ変位の増分を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, 最後は終局に至るまで押抜き荷重を実施した。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。試験体No. 1~5の試験実施後, 採用する間詰め部の仕様を選定し, 試験数増加を目的として, 選定した仕様の試験体2体を新たに製作し, 試験体No. 6, 7として漸増繰返し荷重試験を実施した。

2.2 試験結果

各試験体の最大耐力を表-1に示す。また, 静的単調荷重および漸増繰返し荷重試験時のせん断力とずれ変位(床版部とH形鋼の鉛直方向相対変位)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最大耐力に到達した。その後, 異音が発生して耐力が低下し, 写真-5のように頭付きスタッド直下の間詰めモルタル部にひび割れが観察された。ひび割れ発生後も試験体No. 1ではずれ変位が約7mmまで, その他の試験体では約10mmまで最大耐力に近いせん断力を保持した。

試験体No. 1~5の最大耐力は130.1~155.4kN/本であり, 試験体No. 5(PE繊維L=6mm, 0.2%混入のケース)が最も耐力が大きかった。試験体No. 1, 2のように間詰め部を溶接金網で補強すると, 無対策の場合に比べて最大耐力が2割程度増加することが筆者らのこれまでの検討⁴⁾で確認されているが, モルタルにPE繊維を混入する補強方法でも溶接金網補強と同程度以上の効果が得られると考えられる。上述のとおり試験体No. 5が最も耐力が高く, また溶接金網は腐食することが懸念されるため, 間詰め部の仕様は, 試験体No. 5に適用した長さ6mmのPE繊維を0.2%混入したモルタルを使用する案を採用することとした。

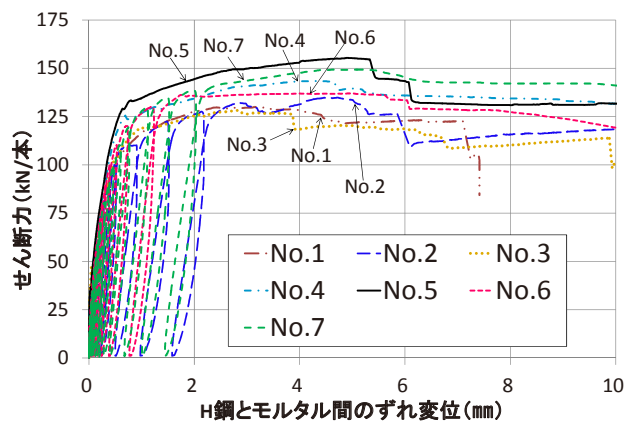


図-4 せん断力-ずれ変位関係



写真-5 間詰め部のひび割れ (載荷終了後)

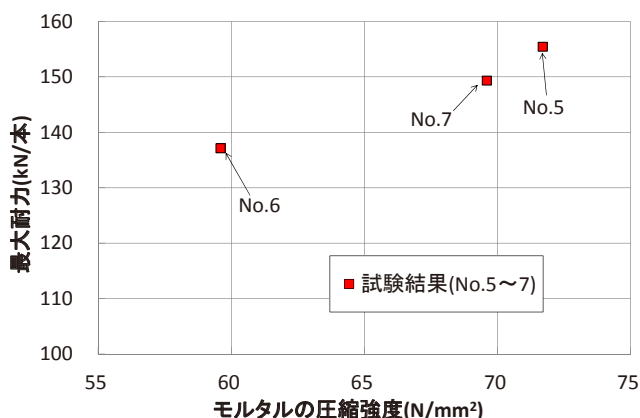


図-5 最大耐力とモルタルの圧縮強度の関係

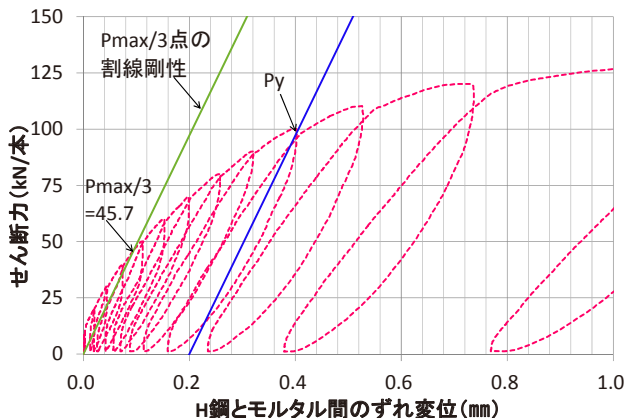


図-6 降伏耐力Pyの算出 (試験体No. 6)

試験体No. 5と同様の仕様とした試験体No. 6, 7では、最大耐力は試験体No. 5とほぼ同程度であったが、モルタルの圧縮強度が高いほど最大耐力も大きくなる傾向がみられた (図-5)。

文献3)に準じて、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結果を図-6および表-1に示す。道路橋示方書²⁾に規定される設計荷重作用時のスタッドの許容せん断耐力は降伏耐力に対して3程度の安全率を考慮して設定されている。本研究では、選定した間詰め構造を有する試験体(試験体No. 5~7)の降伏耐力に対する安全率を3とした場合、スタッドの許容せん断耐力は32~36kN/本であった。

3. 疲労試験

試験体および試験条件を表-2に示す。試験体の寸法・形状は押抜きせん断試験と同一である。間詰め部の仕様は、押抜きせん断試験で選定したものと同一とした。また、荷重方法は押抜きせん断試験と同様であるが、下限荷重を5kN、スタッド1本あたりの変動荷重をNo. 6試験体の静的耐力(137.1kN)の60%(82.3kN)、50%(68.6kN)、および35%(48.0kN)として5Hzで繰返し荷重を行った。

表-2 疲労試験の試験体および試験条件

試験体	間詰め		スタッド		荷重荷重	
	仕様	圧縮強度 (N/mm ²)	仕様	引張強度 (N/mm ²)	スタッド1本あたりの変動荷重 ΔP (kN/本)	下限荷重 Pmin (kN)
No. 8	PE繊維混入モルタル (L=6mm, 0.2%混入)	62.0	φ 22 2本/面	469	82.3	5.0
No. 9		66.9			68.6	
No. 10		71.0			48.0	

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

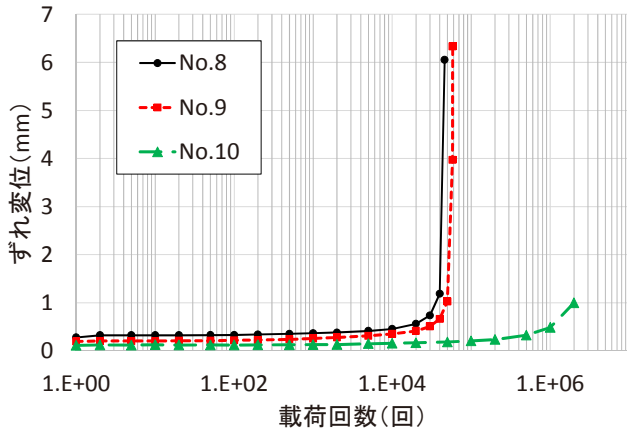


図-7 ずれ変位の経時変化



写真-6 試験体の破壊状況(試験体No. 8)



写真-7 スタッドの破断面(試験体No. 8)



写真-8 スタッドの破断面(試験体No. 10)

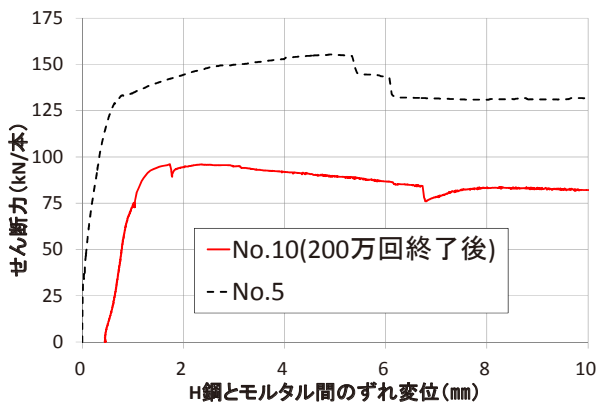


図-8 せん断力-ずれ変位関係 (試験体No. 5, 10)

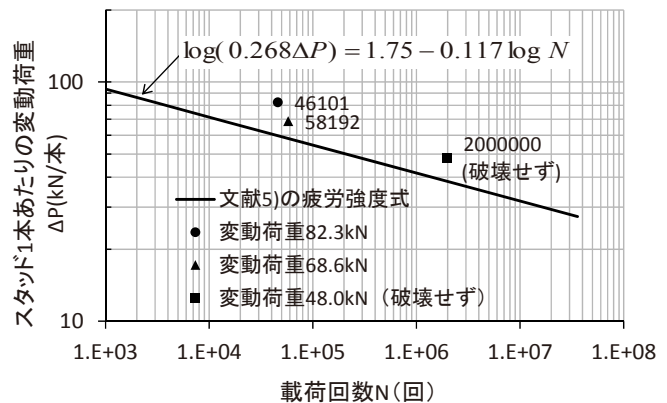


図-9 疲労強度式との比較

試験結果として、ずれ変位（床版部とH形鋼の鉛直方向相対変位）の経時変化を図-7に示す。試験体No. 8, 9では、ずれ変位が0.5mmを越えてからずれ変位の増加が早まり、頭付きスタッドが付根で破断した(写真-6, 7)。試験体No. 10は、200万回載荷完了時でも疲労破壊に至らなかった。

前章で述べたように、本構造のスタッドの降伏耐力の1/3は32~36kN/本であった。このことに加え、48kN/本の変動荷重を繰返し載荷する疲労試験(試験体No. 10)で200万回載荷後も疲労破壊に至らなかったことから、降伏耐力の1/3を許容せん断耐力とすることは疲労耐久性の観点からも妥当であると考えられる。

また、試験体No. 10は200万回載荷完了後に静的に押抜き載荷を実施した。試験体No. 10の破壊形態も頭付きスタッドの付根での破断であったが、最大耐力は96.1kN/本であり、間詰めの仕様が同一で試験時

のモルタル圧縮強度が同程度である試験体No. 5の耐力の約6割程度であった(図-8)。試験体No. 10のスタッドの破断面には、金属が疲労破断する際にみられる貝殻状模様がみられ(写真-8)、静的載荷に先行して実施した繰返し載荷により、スタッドの疲労亀裂が進展していたと考えられる。最大耐力到達後は、ずれ変位が10mm程度となるまでは最大荷重に近いせん断力を保持した。変形性能が小さい場合、桁端部に設置されたスタッドから順に破壊する進行性破壊が懸念されるが、本構造は疲労亀裂が進展した場合であっても脆性的に破壊することはなかったため、進行性破壊は生じにくいと考えられる。

土木学会「鋼構造物設計指針 PART B」⁶⁾に規定される合成桁用に用いられるずれ止めの疲労強度式(式-1)と試験結果の比較を図-9に示す。試験結果はいずれも疲労強度式による予測値を超えており、この疲労強度式を用いて本構造の疲労寿命を安全側に評価できることが確認された。

$$\log(0.268\Delta P) = 1.75 - 0.117 \log N \cdots \cdots \text{(式-1)}$$

ここで、 ΔP :スタッド1本あたりの変動荷重(kN/本), N : 載荷回数

4. おわりに

本研究では、UFC床版と鋼桁の接合構造を再現した試験体を用いて押抜きせん断試験および疲労試験を行い、以下の知見を得た。

- ・間詰め部のモルタルの補強法として、溶接金網による補強、PP繊維またはPE繊維のモルタルへの混入を検討した。その結果、押抜きせん断試験において、PE繊維を混入した試験ケースの耐力が最も大きくなり、溶接金網による補強方法と同程度以上の補強効果が得られることを確認した。
- ・本接合構造の降伏耐力の1/3を許容せん断耐力とする方法を提案した。同方法で算定した許容せん断耐力は、疲労試験で破壊に至らなかったケースの変動荷重を下回っており、提案した許容せん断耐力の算定法は疲労耐久性の観点からも妥当であると考えられる。
- ・疲労強度については既往の設計式が適用できることを確認した。

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) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 II 鋼橋編, 2014年
- 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) 一宮ら：UFC床版と鋼桁の接合に関する基礎的研究, 第24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, 2015年
- 5) 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
- 6) 土木学会：鋼構造物設計指針 PART B 合成構造物, 1997年