

高強度繊維補強モルタルを間詰としたUFC床版と鋼桁の接合部に関する検討

鹿島建設(株)			○小嶋進太郎
阪神高速道路(株)	正会員	工修	小坂 崇
阪神高速道路(株)		工修	長澤 光弥
鹿島建設(株)	正会員	工修	一宮 利通

Abstract : The authors have developed a lightweight and durable bridge slab using ultra-high strength fiber reinforced concrete (UFC) . As with general PC slabs, the joint between the UFC slab and the steel girder is formed by inserting stud dowels which welded to the steel girder into the holes made in the slab and filling them with fiber reinforced mortar. About this joint, in the case of a bridge with a large main girder span, there is a concern that the number of required stud dowels will increase and placing them will be difficult because the acting shear force on the stud dowels is large. Therefore, we proposed a method to improve the strength per joint by increasing the diameter of the stud dowel and using UFC as the padding. In order to confirm the structural characteristics of this joint structure, shear tests and fatigue tests were conducted. As results, it is confirmed that it has the proof strength and fatigue characteristics which is supposed to be needed in the design.

Key words : UFC, Bridge slab, Stud dowel, Punching shear test, Fatigue test

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床版の劣化が顕在化している。このような状況を踏まえ、筆者らは新設橋や既設橋の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、軽量化することができる。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床版と鋼桁の接合方法は、一般的なPC床版の場合と同様、すなわち、床版に頭付きスタッド（以下、スタッド）用の箱抜きを設けておき、床版と鋼桁間の50mm程度の隙間と箱抜き孔をモルタルまたは場所打ちUFCなどで充填して床版と鋼桁を一体化する方法（図-2）を想定している。これまでの検討²⁾で用いた接合構造では、支間長約20mほどの橋梁を対象としてスタッドの径を22mmとし、間詰め材にはポリエチレ

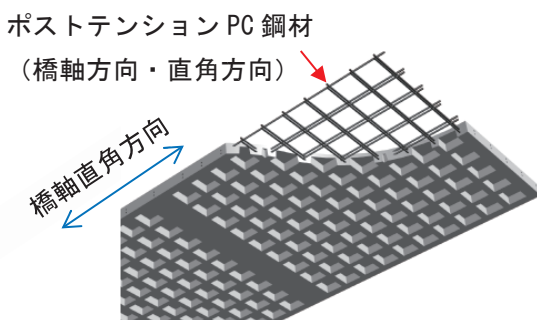


図-1 UFC床版の構造概要

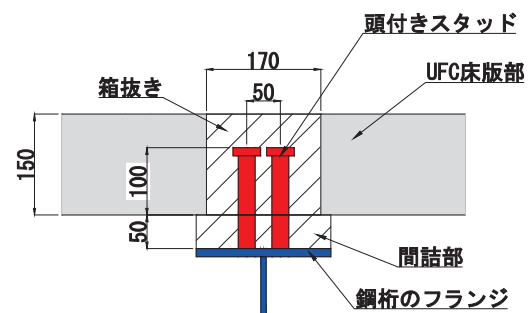


図-2 UFC床版と鋼桁の接合構造

ン繊維を0.2vol%混入したモルタル (以下, 仕様a) を用いた。しかし, 支間長がより大きい橋梁では, スタッドへの作用せん断力がより大きくなるため, 必要となるスタッド本数が多くなり配置が困難になることが懸念される。そこで, スタッド径を25mmを上げ, それに合わせて間詰め材が先行して割裂破壊しないようにエトリングait生成系のUFC³⁾を用いることで, スタッド1本あたりの耐力を高めることを検討した。なお, 間詰め部に用いるUFCの配合は充填性を確保するため, 後述する検討により鋼繊維量を低減させた。本稿では, 接合構造の仕様決定の過程を記したのち, 上記仕様の構造特性を確認するために実施した押抜きせん断試験および疲労試験の結果について報告する。

2. 接合構造の仕様検討

前述のとおり, 接合部の高耐力化を図るため間詰め材にUFCを用いることを検討したが, 充填箇所は狭隘部となるため, 充填不良が懸念された。そこで, 本研究においては「良好な充填性」および「高耐力化に必要な引張特性」の両方を満足する鋼繊維量を決定するために, 充填性試験, 直接引張試験およびFEM解析を実施した。

2.1 充填性試験

写真-1に示すようにUFC床版と鋼桁間の50mmの厚さの間詰め部を模擬したアクリル模型に間詰め材を充填する試験を実施した。充填試験での鋼繊維量は, 長さが15mmの鋼繊維を1.00vol%としたが, 有害な気泡や詰まりなどを発生させることなく充填できた。

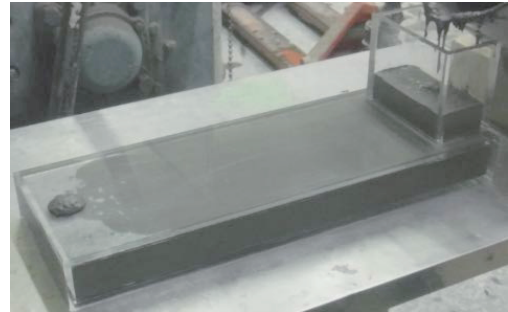


写真-1 充填性試験

2.2 直接引張試験

FEM解析に用いる引張軟化曲線を求めるために直接引張試験を実施した。充填性は, 繊維が少量の方が向上するため, 鋼繊維量がより少量となる0.75vol%から先行して試験およびFEM解析を行い, 間詰め材が先行して割裂破壊しないために必要な引張特性が得られなかった場合に追加の試験を行う計画とした。

試験体は図-3に示すような形状 (奥行き100mm) とし, テーパー部に鋼製治具を引っ掛けることで試験体に引張力を与えた。図-4に試験結果および解析用にモデル化した曲線を示す。引張軟化曲線の横軸は開口変位が望ましいが, 予めひび割れ位置を予測することが難しいため, 試験区間の相対変位 (伸び) を計測し, それを横軸に用いることとした。直接引張試験の結果では, ひび割れ発生とともに引張応力度が低下した後も鋼繊維の抵抗により引張応力度が再度増加し, 第2のピークを迎えた後に徐々に低下している。FEM解析に用いる引張軟化曲線は, この第2のピーク以降を用いてモデル化した。

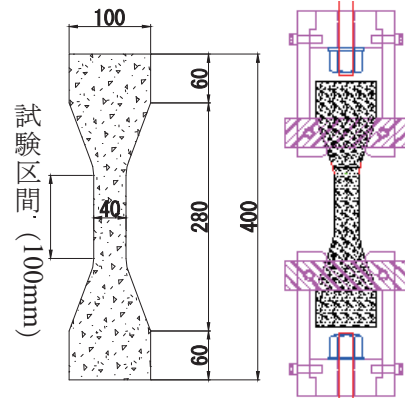


図-3 試験体形状および設置図

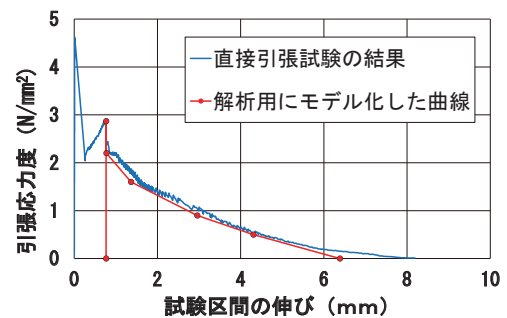


図-4 試験結果および解析モデル曲線

2.3 FEM解析

押抜きせん断試験と疲労試験の試験体形状を図-5に示す。床版部の厚さは150mmとし, 径が25mmのスタッ

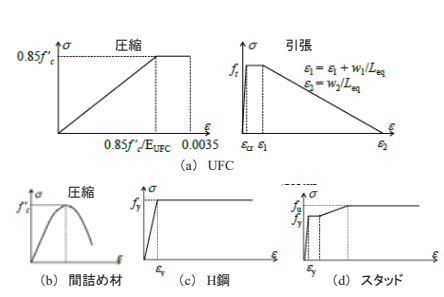
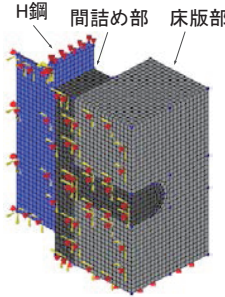
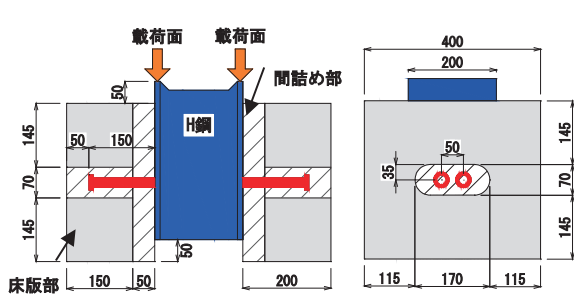


図-5 試験体 (左: 正面図, 右: 側面図)

図-6 解析モデル

図-7 材料非線形モデル

表-1 材料の特性値

間詰め材			UFC (床版部)		スタッド	
圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (N/mm ²)	降伏強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)
148	2.9	39700	180	42301	338	444

ド (JIS B 1198) を、鋼桁を模擬したH形鋼の両フランジに2本ずつ、中心の間隔を50mmとして配置した。H形鋼のフランジ幅は200mm、H形鋼と床版間の間詰め部の厚さは50mmとし、幅はH形鋼のフランジ幅と同じ200mmとした。試験体は対称な形状をしているため、解析モデルは図-6に示すように試験体の1/4モデルとした。拘束条件は、1/4断面を完全固定、床版部および間詰め部の下面と、載荷面は断面垂直方向固定とした。床版部、間詰め部、H形鋼、スタッドはソリッド要素とし、各要素間の界面には摩擦係数を0.3としてクーロン摩擦モデルを採用した。床版部に用いるUFCおよび間詰め部に用いる間詰め材のひび割れモデルは、全ひずみ固定ひび割れモデルを採用した。材料非線形モデルを図-7に、材料の特性値を表-1に示す。UFCの構成則はUFC指針⁴⁾にしたがってモデル化し、間詰め材の構成則は、圧縮域には放物線モデル、引張域には図-4に示す解析用にモデル化した曲線を用いた。H形鋼はバイリニア、スタッドは降伏以降のひずみ硬化と引張強度を表現したモデルとした。間詰め材、スタッドおよびUFCの弾性係数には材料試験により得られた値を用いている。

図-8にせん断力-ずれ変位 (床版部とH形鋼の相対ずれ) 関係を示す。今回検討した仕様の解析結果に加え、前述した仕様a (スタッド径22mm、間詰め材にポリエチレン繊維を0.2vol%混入したモルタル) の実験結果も示した。今回検討した仕様の解析結果は、ずれ変位約1.6mm付近で仕様aの最大耐力約147kNの約1.4倍となる最大耐力208kNとなり、その後8mm付近まで最大耐力に近いせん断力を保持し、割裂破壊による大きな荷重低下は見られなかった。また、ずれ変位8mmのときのスタッド軸方向応力コンター図を図-9に示すが、発生応力が引張強度に達している。この結果より鋼繊維量が0.75vol%の引張軟化曲線を用いた場合でも、間詰め材が先行して割裂破壊しないと考えられた。

以上より、「良好な充填性」および「高耐力化に必要な引張強度」を満足する間詰め材として、UFCの鋼繊維量を0.75vol%に低減したものを採用することにした。

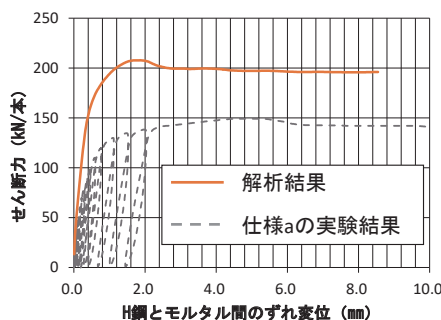


図-8 せん断力-ずれ変位関係

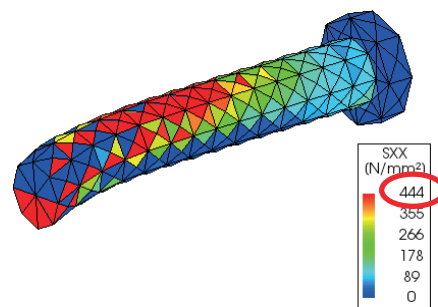


図-9 スタッド軸方向応力コンター図

3. 押抜きせん断試験および疲労試験

3.1 試験体概要

押抜きせん断試験と疲労試験はそれぞれ3体ずつ試験を実施したが試験体の仕様はすべて同一とした。今回の試験体製作では、破壊モードに大きく影響するスタッド基部の鋼繊維の配向状況を可能な限り実施工と同じようにするため、次に示すような2段階の手順で充填した(図-10)。1段階目は試験体の下部にキャンバーを差し込み、傾斜をつけた状態で矢印の位置から充填を行い、充填口から溢れる手前で充填を終えてすぐに充填口を塞ぎ、2段階目ではキャンバーを取り外してUFC床版部が水平になるように設置し、UFC床版部に設けた箱抜き部から充填を行った。片側の充填を終えた翌日に他方に充填し、20℃で封緘養生を行った。

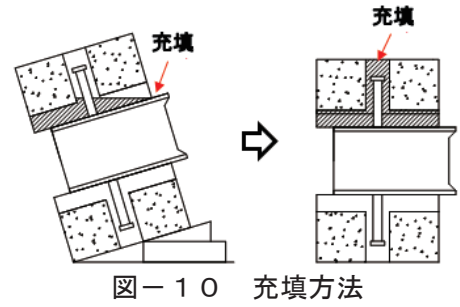


図-10 充填方法

3.2 押抜きせん断試験

(1) 試験概要

載荷方法は日本鋼構造協会の試験方法⁵⁾に準じた押抜きせん断試験とし、1体は単調載荷、残り2体は載荷と除荷を繰り返す漸増繰返し載荷とした。漸増繰返し載荷では、スタッド1本あたりの荷重増分を15kN/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載荷を実施した。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載荷後、最後は終局に至るまで押抜き載荷を実施した。なお、試験体の支持は、鋼製の台座上に敷いたビニールシートの上に不陸調整用の石膏を敷設し、その上に試験体を設置することとした。床版部の開きは拘束しなかった。試験時における間詰め材の圧縮強度は142~147N/mm²、スタッドの引張強度は444N/mm²であった。

(2) 試験結果

試験結果を表-2に示す。S-2とS-3は同日の午前と午後で載荷を行った。S-1とS-3がスタッドの破断で破壊し、S-2が間詰め材の割裂で破壊した。写真-2、3にS-3試験体コンクリート側のスタッド破断面とS-2試験体H鋼下部の間詰め材の割裂状況を示す。破壊モードは異なるが、最大耐力は211~225kN/本で大きな差はなく、仕様aの最大耐力約147kNの約1.5倍であった。また、複合構造標準示

表-2 押抜きせん断試験の試験ケースおよび試験結果

試験体 No.	試験条件		計算値	試験結果			
	間詰め材強度 (N/mm ²)			最大耐力 Pmax (kN/本)	最大耐力 Pmax (kN/本)	降伏耐力 Py (kN/本)	破壊モード
	圧縮強度	引張強度					
S-1	147	5.1	218	225	156	スタッドの破断	
S-2	142	5.1		211	149	間詰め材の割裂	
S-3				213	151	スタッドの破断	



写真-2 スタッド破断面



写真-3 間詰め部の割裂状況

方書⁶⁾に示される、スタッドの破断で破壊する場合の耐力算定式(式-1)で部材係数を1.0として計算した最大耐力は約218kNであり、実験結果とほぼ同等の値を示した。これらより今回混入した鋼繊維量は、間詰め材の割裂で破壊しないために最低限必要な鋼繊維量付近にあったと推測される。

$$V_{SS} = \frac{A_{ss} f_{su}}{\gamma_b} \dots (式-1)$$

ここで、 A_{ss} :スタッドの断面積 (mm²)、 f_{su} :スタッドの引張強度 (N/mm²)、 γ_b :部材係数

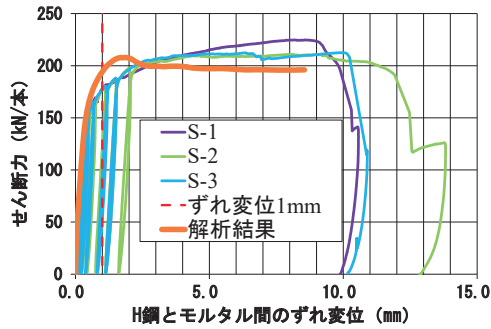


図-1-1 せん断力-ずれ変位関係

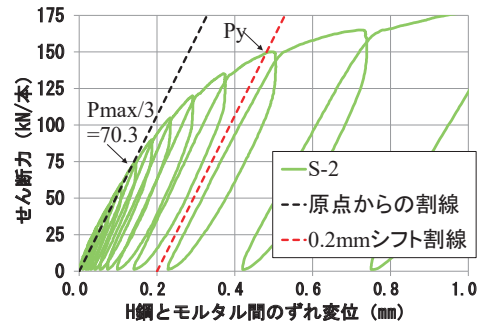


図-1-2 降伏耐力 P_y の算出 (試験体 S-2)

スタッドに作用するせん断力とずれ変位の関係を図-1-1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ったが、その後もずれ変位10mm程度までは最大耐力に近いせん断力を保持した。文献5)に準じて、図-1-2に示すように最大荷重の1/3点の割線を0.2mmのずれ変位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 P_y として算出した結果を表-2に示す。仕様変更後の降伏耐力は約150kN/本であり、仕様aの降伏耐力約100kN/本の1.5倍程度という結果が得られた。

3.3 疲労試験

(1) 試験概要

試験ケースおよび試験結果を表-3に示す。載荷位置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S-2試験体の静的耐力(210.9kN)の55%(116.0kN)、45%(94.9kN)および35%(73.8kN)、すなわち、径が25mmのスタッド1本あたりに作用するせん断応力振幅 $\Delta\tau$ を順に236.3、193.3、150.4 N/mm²として5Hzで繰り返し載荷を行った。載荷状況を写真-4に示す。疲労試験開始時の間詰め材の圧縮強度は132~135N/mm²、スタッドの引張強度は444N/mm²であった。

(2) 試験結果

試験結果としてずれ変位の経時変化を図-1-3に示す。いずれの試験体もずれ変位0.5mmを超えてからずれ変位の増加が早まり、最終的にスタッド溶接部で破断した(写真-5)。

表-3 疲労試験の試験ケースおよび試験結果

試験体 No.	間詰め材 圧縮強度 (N/mm ²)	変動荷重 ΔP (kN)	応力振幅 $\Delta\tau$ (N/mm ²)	載荷回数	
				疲労強度式からの算出	試験結果
F-1	132.8	116.0	236.3	1391	25459
F-2	132.0	94.9	193.3	7742	153359
F-3	135.1	73.8	150.4	66119	595785

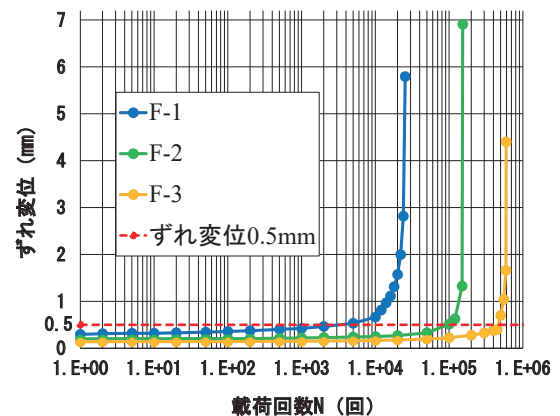


図-1-3 ずれ変位の経時変化



写真-4 載荷状況



写真-5 スタッドの破断面 (試験体 F-1)

土木学会「鋼構造物設計指針PART B」⁷⁾に規定される疲労強度式(式-2)と試験結果の比較を、仕様aも含めて図-14に示す。仕様aと仕様変更後の構造では、スタッド径や耐力は異なるが、どちらもスタッドの破断で疲労破壊しているため、同じ疲労強度式で評価できると考えられる。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を確認した。

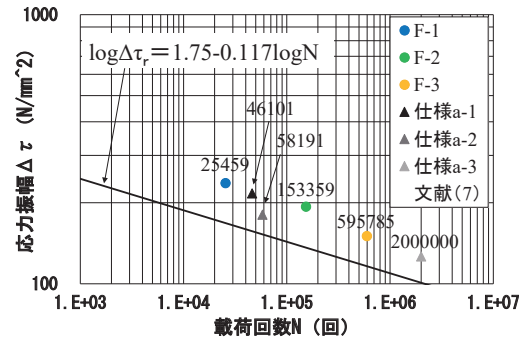


図-14 疲労強度式との比較

$$\log \Delta \tau_r = 1.75 - 0.117 \log N \dots \dots \dots \text{(式-2)}$$

ここで、 $\Delta \tau_r$:スタッド1本あたりの疲労強度 (N/mm²/本), N: 載荷回数

5. おわりに

本研究では、鋼桁とUFC床版間の接合構造の高耐力化を図る方法として、スタッド径を25mmとし、間詰め材には長さ15mmの鋼繊維を0.75vol%混入したUFCを用いることを検討した。本検討において、接合構造の仕様検討および押抜きせん断試験・疲労試験を実施し、以下の知見を得た。

- 1) 充填性試験の結果から、UFCの鋼繊維量が1.00vol%の場合、問題なく接合部への充填が行えることを確認した。また、直接引張試験より求めた引張軟化曲線を用いてFEM解析を行った結果、L=15mmの鋼繊維の量を0.75vol%混入することで間詰めの割裂破壊が先行しないと考えられたため、間詰め材の仕様はL=15mmの鋼繊維を0.75vol%混入する仕様決定した。
- 2) 押抜きせん断試験の結果から、今回検討した接合構造はスタッド1本当たり約150kNの降伏耐力を有することを確認した。
- 3) 疲労試験の結果から、土木学会「鋼構造物設計指針PART B」に規定される疲労強度式を用いて本接合構造の疲労耐久性を安全側に評価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正嗣名誉教授、東京工業大学二羽淳一郎教授、岐阜大学内田裕市教授および神戸大学三木朋広准教授にご指導をいただきました。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25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，2016
- 3) 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
- 4) 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113，2004.9
- 5) 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
- 6) 土木学会：複合構造標準示方書 設計編，2014
- 7) 土木学会：鋼構造物設計指針PART B 合成構造物，1997年