

UFC 軌道桁の開発および鋼軌道桁上床版への UFC の適用

大成建設 正会員 ○武者 浩透, 吉本 宏和, 武田 均, 熊谷 徹
モノレールエンジニアリング 名嘉真 浩昭
東京モノレール 堀尾 卓司, 井上 美佐男

1. はじめに

超高強度繊維補強コンクリート¹⁾ (以下, UFC) は, 平均強度 200N/mm^2 もの超高強度と優れた耐久性を有するコンクリート材料であり, その特性を活用して鉄筋を用いることなくコンクリート構造物を構築できる材料である. UFC と従来の高強度コンクリートの材料特性の比較を表-1 に示す. 小型部材としては, 水路の内面補強パネルや頭首工などへの埋設型枠, または橋梁の床版パネルなどコンクリート 2 次製品として広く用いられているほか, PC 鋼材によるプレストレスを導入することにより比較的大型の構造物躯体にも適用されており, 長スパンの橋梁や鉄道軌道桁, 大型スラブへの適用が進んでいる. UFC 構造物の例としては, 2002 年に日本で初めての UFC 橋として完成した酒田みらい橋 (山形県酒田市) は, スパン長 50m でありながら, 端部の桁高をわずか 55 cm に抑えた歩道橋²⁾ であり, 桁躯体内には 1 本の鉄筋も使用していないという, これまでの常識を覆したコンクリート橋である. また, 2010 年に供用を開始した羽田空港 D 滑走路では, 着陸帯と呼ばれる滑走路の外周部の 19 万 2000m^2 に, $7.8\text{m} \times 3.6\text{m}$ の大型 UFC 床版が約 7,000 枚用いられている³⁾.

その UFC をモノレール軌道桁へ適用する試みがかねてから行われており, 2007 年には UFC 軌道桁 3 桁が東京モノレール昭和島駅に設置され機能性・安全性・耐久性のチェックが行われている. また, 鋼軌道桁上のコンクリート床版にも UFC を用いる検討が進められており, 各種の試験が実施されている. 本稿では, UFC 軌道桁の開発の概要と, 鋼軌道桁上の UFC 床版の開発概要および検証試験について述べる.

2. UFC 軌道桁の開発

東京モノレールは都心と羽田空港を結ぶ重要な交通機関としての役割を果たしてきたが, 昭和 39 年の開業から 50 年以上の年月を重ねており, 老朽化対策や更新技術が必要となっている. しかし, 毎日の営業を継続しながら更新するには, 深夜のわずかな時間で架け替える必要があり, 安全により確実に架け替え作業を行うには, 軽量化などの施工性に優れた構造が望まれる. さらに今後も 50 年・100 年と末永く使い続けるには高耐久・高寿命であることが望ましい. そのようなニーズを満足すべく, UFC の超高強度を活用し部材厚さの低減により大幅な軽量化が見込める上に, 100 年以上の高耐久性を有する UFC 軌道桁が開発された. 本章では, UFC 軌道桁の概要を示す.

(1) UFC 軌道桁のタイプ

日本におけるモノレールの方式は, 跨座型と懸垂型があり東京モノレールは跨座型を採用している (写真-1). 跨座型はその名のとおりモノレール車両が軌道桁に跨座 (跨って座っている) した状態で走行する形式で, 走行輪は軌道桁の上面を, 桁の側面上部を案内輪, 側面中部もしくは下部を安定輪が桁を挟み込むようにして走行する. そのため, 桁形状の制約としては, 桁幅 800mm を厳格に守る必要がある. この規定はコンクリー

表-1 UFC と高強度コンクリートとの物性比較

項目	単位	UFC (※1)	高強度 コンクリート (例)
圧縮強度 (※2)	N/mm^2	180	40
ひび割れ発生強度 (※2)	N/mm^2	8.0	1.2
引張強度 (※2)	N/mm^2	8.8	2.7
ヤング係数	kN/mm^2	50	31
単位容積質量	kN/m^3	25.5	24.5
収縮ひずみ		50×10^{-6}	230×10^{-6}
クリープ係数		0.4	2.6
透水係数	cm/s	4×10^{-17}	1×10^{-10}
塩化物イオン拡散係数	$\text{cm}^2/\text{年}$	0.002	0.700

RPC系UFC: 土木学会「超高強度繊維補強コンクリート設計・施工指針 (案)」
の標準配合粉体

(※1): 標準熟養生後

(※2): 特性値

キーワード UFC, 超高強度繊維補強コンクリート, モノレール, 軌道桁, 耐久性

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設 (株) 技術センター 生産技術開発部
都市再生技術開発室 TEL 045-814-7229

ト桁および鋼桁共に共通であるが、躯体幅に制限が掛けられ、結果として PC 鋼材配置も制約があるため、よりコンクリート桁にとって厳しい条件となっている。そのため、コンクリート軌道桁は桁長 20m 程度が限度であり、それを超える長スパンの桁は必然的に鋼桁となっている。

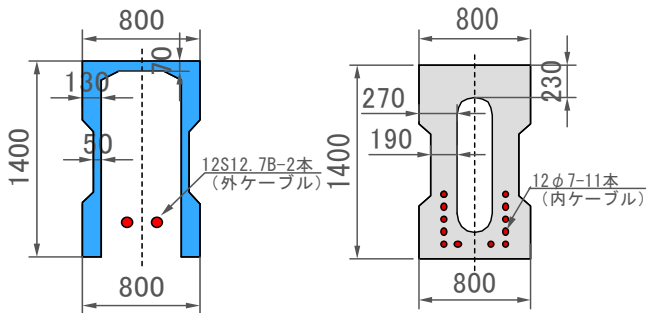
今回の UFC 適用対象の軌道桁は、コンクリート軌道桁および鋼軌道桁の両方とした。まず、20m の UFC 桁を開発する事により UFC 軌道桁の基本構造を検討し、従来の PC 軌道桁に対してどの程度の軽量化を実現できるかを確認した。次に、これまで鋼桁でしか実現できなかった 40m の軌道桁を UFC を用いて開発し、鋼桁との性能比較を行った。

(2) UFC 軌道桁の構造と従来の軌道桁との比較

図-1 に開発した 20m 仕様の UFC 軌道桁断面と従来の PC 軌道桁断面の比較を示す。また、図-2 に UFC 軌道桁の構造図を、表-2 には UFC 軌道桁の諸元を示す。UFC 軌道桁は逆 U 桁形状を採用し下面は開放されている。そして、UFC の強度特性を最大限に活用することにより、上床版厚 70mm、ウェブ厚 130mm (案内輪および安定輪の走行部)、その他の部分のウェブ厚 50mm と極限まで部材厚さを削減している。当然、内ケーブルとして PC 鋼材を配置するスペースが無いため、PC 鋼より線 12S12.7 のユニットを 2 本配置した外ケーブル方式を採用している。一方、従来の PC 軌道桁は部材厚さが 200mm 程度であり、軽量化のために内側を中空としているが重厚感否めない。重量を比較すると、UFC 桁が 22t であるのに対し、PC 桁は 42t と重く、軌道桁に UFC を適用する事で、実に従来の約半分である 52% の重量まで大幅な軽量化に成功した。PC 桁では、その重量のためにモノレール沿線での製作が基本であったが、UFC 桁ではこの軽量化により 25t 以下に収まったためトレーラー運搬ができ、コンクリート製品工場で作製が可能となった。



写真-1 UFC 軌道桁(40m)とモノレール車両



UFC 軌道桁 重量:22t PC 軌道桁:重量:42t

図-1 UFC 軌道桁と従来の PC 軌道桁(桁長 20m)

表-2 UFC 軌道桁の諸元(20m, 17m)

<形状>	・桁長	:L=20m, 17m
	・断面	:W=0.8m H=1.4m
	・平面線形	:R=∞
	・縦断線形	:R=∞
	・カント	:0%
<重量>	・L=20m	:22t
	・L=17m	:20t
<構造>	・ポストテンション単純桁(逆U型)	
	・PC緊張工法:VSL工法	
<コンクリート>	・超高強度繊維補強コンクリート	
	・f _{ck} =180N/mm ²	
<PC鋼材>	・アンボンドマルチケーブル	
	・SWPR7B, 12S12.7B	
<支承>	・ラゲル支承(ピン固定式、ローラー可動式)	
	<伸縮継手>・フィンガープレート	

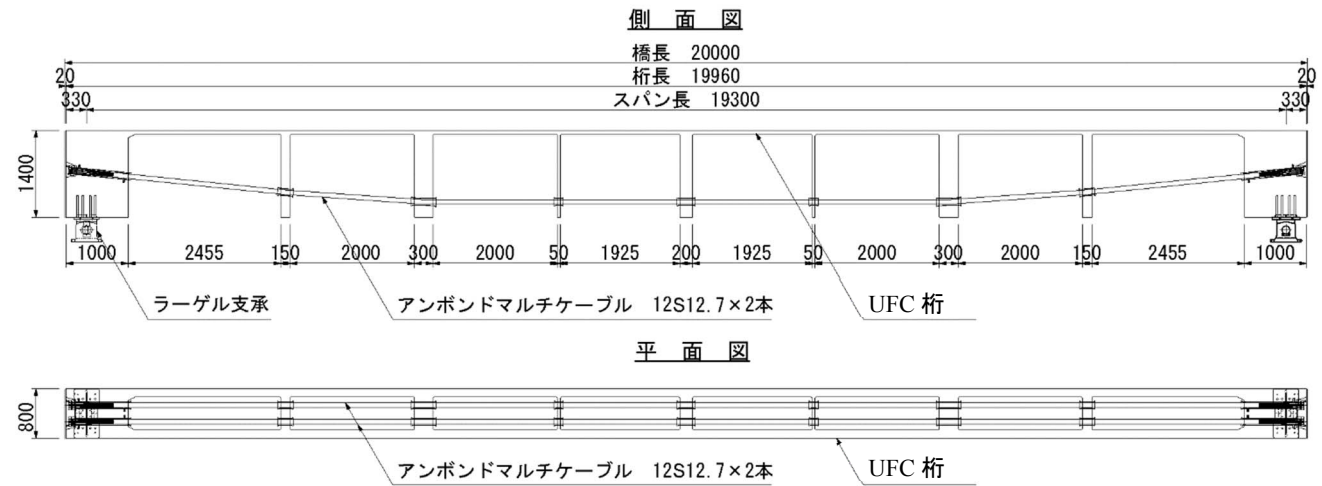


図-2 UFC 軌道桁(20m) 一般構造図

次に、この 20m の UFC 軌道桁の開発をベースとして、コンクリート軌道桁としてはこれまで成し得なかった 40m 軌道桁の開発を行った。図-3 に開発した 40m 仕様の UFC 軌道桁断面と従来の鋼軌道桁断面の比較を示す。UFC 軌道桁は、剛性確保のため箱桁断面とした。図-3 は桁としての性能を同一とするために、列車荷重時のたわみを同等として設計した結果であるが、UFC 軌道桁では UFC の超高強度を活用して PC 鋼材による導入力（プレストレス力）を大きくし、桁高は 2m に抑えることができた。一方、鋼桁においては桁高は 2.4m 必要となる上に、桁上面には走行用のコンクリート床版を設置する必要があることから、総桁高は 2.82m となっている。さらには、UFC 桁重量は 70t であるのに対して、鋼桁重量は上部に設置されているコンクリート床版の重量が大きく影響して 96t となり、UFC の適用により、桁高のみならず重量も大きく低減できることが確認された。図-4 に UFC 軌道桁（40m）の構造図（側面図）を示す。この UFC 桁は長さが 40m あるため、製作・運搬を考慮して上部逆 U 桁と下床版に分離し、それぞれ長さ方向にも 3 分割して、計 6 部材から構成されている。工場で製作された 6 部材は、架設地点まで運搬され、現地にて一体化される（写真-2）。

これらの UFC 軌道桁の開発に際しては、構造設計、安全性検証のための解析、製作実験、構造実験⁴等が行われ、製作性と構造安全性が確認されたため、供用中のモノレール線に設置して機能性と耐久性の検証をする事となった。

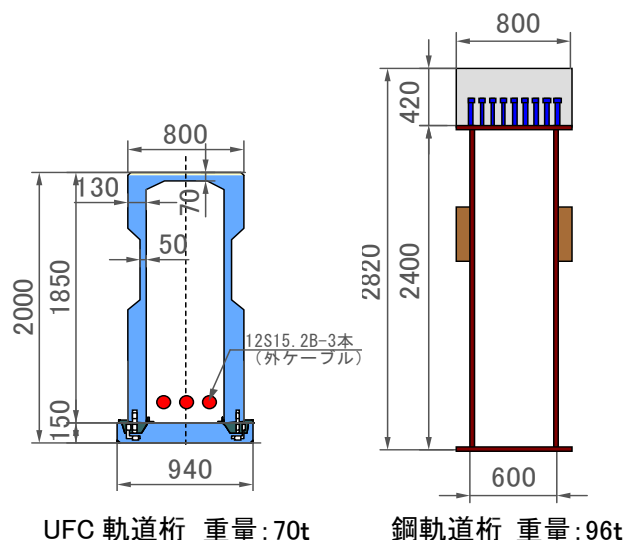


図-3 UFC 軌道桁と従来の鋼軌道桁(40m)



写真-2 UFC モノレール軌道桁（40m）

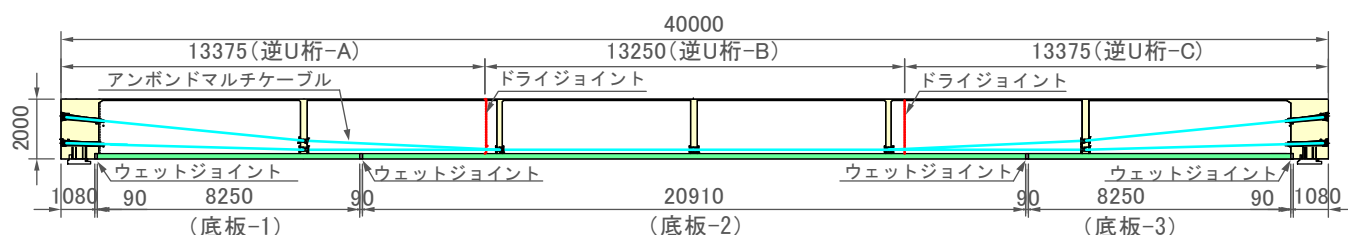


図-4 UFC 軌道桁(40m) 一般構造図

(3) UFC 軌道桁の設置

開発された UFC 軌道桁は、2007 年に昭和島駅に 20m（写真-3）、17m、40m の 3 桁が設置され供用されている。20m、17m の 2 桁は、昭和島駅において急行車両を通過させるための待避線に、夜間において終電から始発までの機電停止の間にそれぞれ 1 夜で架設された。また、40m 桁については、車庫線に日中の作業で設置された。

これらの桁は、設置後 10 年間の間、機能性としては問題ないことを確認しており、10 年の節目の今年 2017 年の秋には 10 年次経時観測調査を実施して、耐久性の確認を行う予定である。



写真-3 供用中の UFC 軌道桁（20m）

3. 鋼軌道桁上の UFC 床版の開発

コンクリート軌道桁のみならず，鋼軌道桁においても老朽化は進行しており，メンテナンスや更新が大きな課題となっている．その中でも，対応を急ぐ必要があるのは，鋼桁上のコンクリート床版である．このコンクリート床版は，図-3 に示すように鋼桁上にスタッドボルトで固定されているが，鋼桁のメンテナンスのために取り外す必要が生じている．またメンテナンス用のクリアランス（鋼桁と床版との間）が必要となっており，薄肉化が必要である．もちろん，コンクリート床版自体の老朽化対策も必要となっているため，このコンクリート床版をプレキャスト UFC 床版で更新する技術が開発されている．本章では，鋼軌道桁上の UFC 床版の構造と耐久性検証のための疲労試験⁵⁾について述べる．

(1) UFC 床版の構造

図-5 に UFC 床版を用いた鋼軌道桁の構造図を，図-6 に UFC 床版の構造図を，写真-4 に UFC 床版を示す．UFC 床版は鋼桁上面全面を覆うように設置され，UFC 床版と鋼桁上フランジの間には，鋼桁メンテナンス用と不陸調整用の無収縮モルタルが充填されている．UFC 床版は，鋼桁上フランジに溶接されたスタッドボルトに UFC 床版をナット締めすることにより固定されている．このスタッドボルトの役割は UFC 床版の平面位置の固定（ずれ止め）のためであるため，UFC 床版の固定においてはナットは手締め程度の力で締め込むこととしてスタッドに極力引張応力を生じないように配慮している．UFC 床版の施工方法としては，まず UFC 床版を高さ調整ボルトを用いて無収縮モルタルの厚さを確保した所定の高さに設置し，6ヶ所開けられている注入孔・排気孔のうち1ヶ所を用いて上からモルタルを充填していく．残り5ヶ所の排気孔からモルタルが溢れてきた順に孔を塞いでいき，最後の孔からモルタルが溢れ出した時点で充填は完了となる．

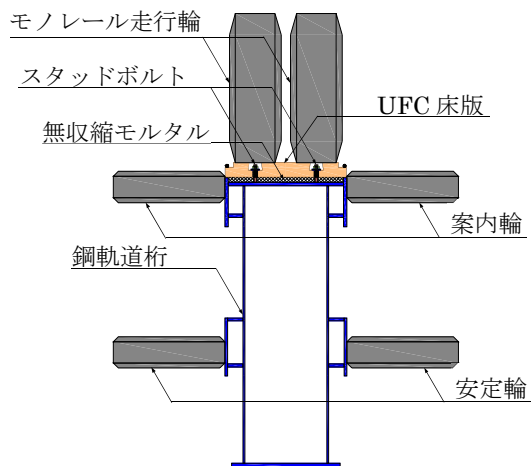
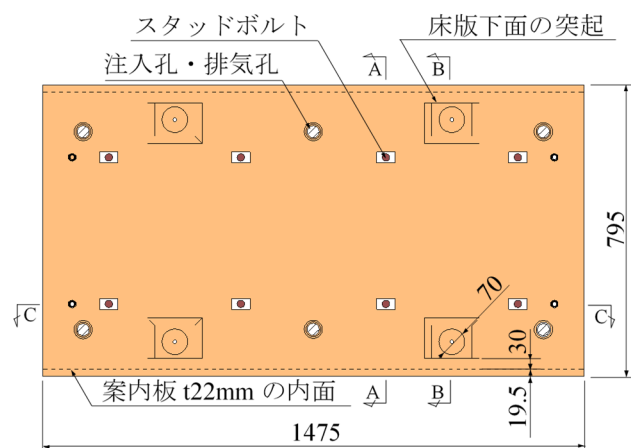
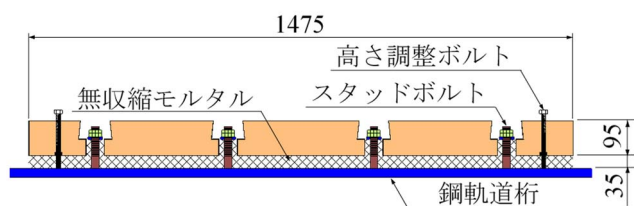


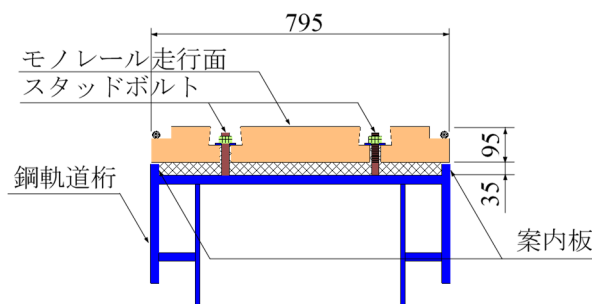
図-5 UFC 床版を用いた鋼軌道桁の構造
(断面図)



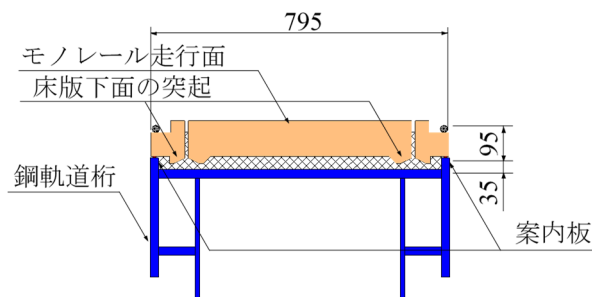
平面図(床版下面)



C-C 断面図

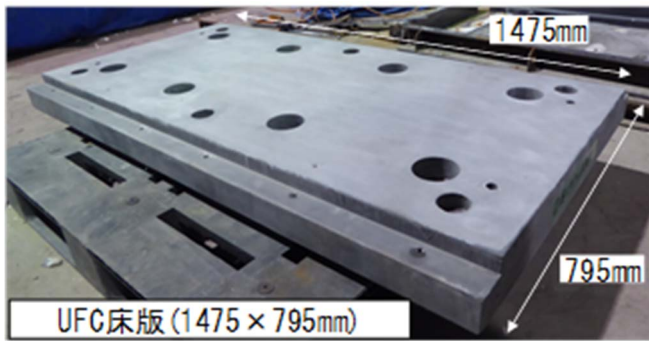


A-A 断面図(軸直角方向)

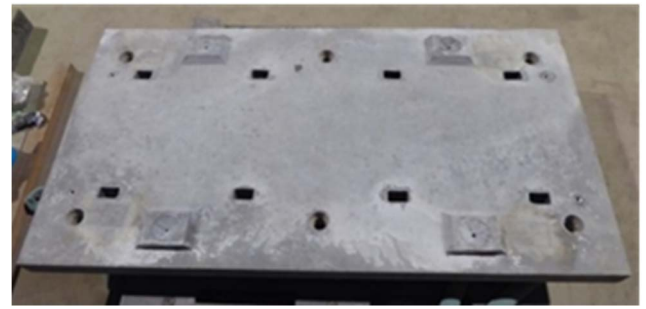


B-B 断面図(軸直角方向)

図-6 UFC 床版構造図



床版上面



床版下面

写真-4 UFC モノレール床版

(2) UFC 床版の構造検討

この UFC 床版の構造および施工方法を検証するために、図-7 に示す検討フローに基づいて、充填試験、疲労試験、耐力確認試験を行った。本稿においては、疲労試験について述べる。

UFC 床版はモノレール車輪が直接载荷される状況となるが、UFC は圧縮強度約 200N/mm^2 の超高強度で、輪荷重により生ずる応力も圧縮応力であり、その応力レベルも約 2N/mm^2 と強度に比べて非常に小さいことから、鉛直方向の荷重载荷に関しては問題ないと判断された。水平方向の荷重としては、モノレール車両の始動・制動荷重に加えて、鋼桁がモノレール荷重によってたわむ際のずれせん断力が UFC 床版を介してスタッドに伝わる。条件の一番厳しい長さ 40m の鋼桁がたわむ際のスタッドに作用するせん断力を解析によって算定したところ、床版 1 枚当たり（スタッドボルト 8 本当たり）に作用する力は 128 kN と算定され、制動・始動荷重⁹⁾の 14 kN に比べてかなり大きな荷重と成り得ることが想定された。この荷重はモノレールが走行するたびに作用する疲労荷重であるため、UFC 床版およびスタッドボルトの疲労耐久性を確認する必要があると判断され、実物大 UFC 床版を用いた疲労試験が実施された⁵⁾。

(3) 疲労試験の概要

図-8 に疲労試験の概要図を、写真-5 に試験状況を示す。試験体は図-6 に示した UFC 床版 1 枚を使用し、鋼台の上に設置した鋼軌道桁上フランジを模した鋼板に溶接したスタッドボルトに、(1) で示した施工方法を忠実に再現して UFC 床版を取り付けた。試験時の UFC と無収縮モルタルの強度を表-3 に示す。鋼板と無収縮モルタルは経年の使用により付着切れを起こす可能性があり、その際にはスタッドボルトにずれせん断力の全てが作用する厳しい条件となることから、グリスを塗って付着を切り、その不利な条件を再現した。無収縮モルタルと UFC 床版間のずれが生じた場合には、スタッドボルトに曲げが生じるため、疲労耐久性の観点からは好ましくない。よって、モルタル-床版間のずれを生じさせないために床版下面の 4 ヶ所に突起（せん断キー）を設け、ずれを生じさせない構造とした（図-6 平面図、写真-4 床版下面）。

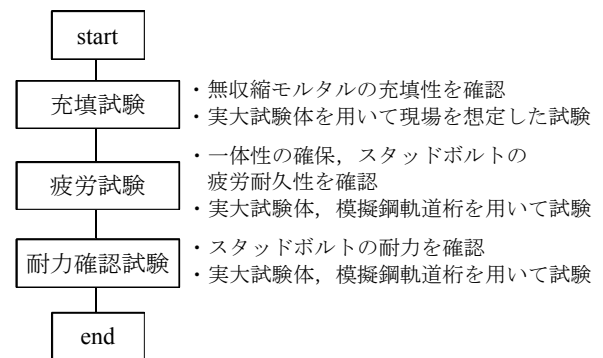
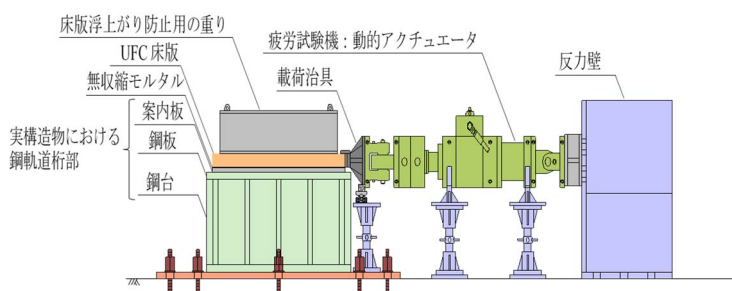


図-7 UFC 床版検討フロー

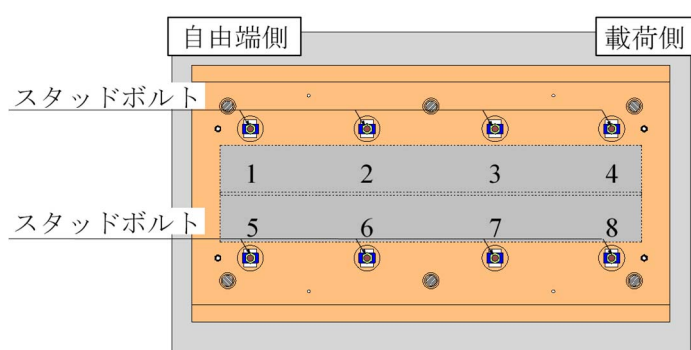


荷重は動的アクチュエータ（容量：500kN）を用い、荷重状態の安定を考慮して 3Hz で行った。荷重荷重は水平方向の設計荷重（14kN）と桁のたわみによる水平方向荷重（128kN）を加算した 142kN とし、荷重治具と試験体を常に接触させるため、荷重荷重の範囲は下限値を 5kN、上限値を 147kN としして荷重を行った。今回の主たる荷重が桁のたわみによるずれせん断であるため、荷重は UFC 床版の端面より行った

表-3 UFC とモルタルの試験時強度

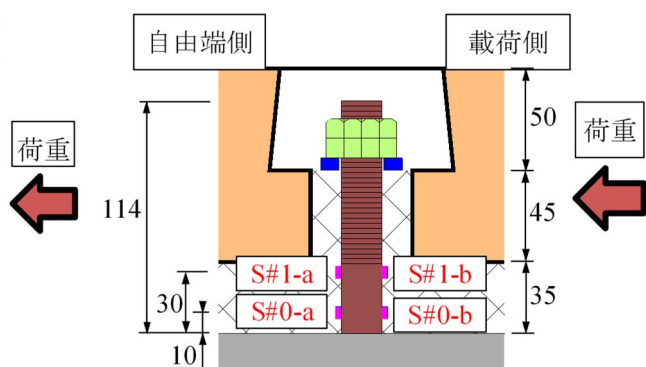
材料	圧縮強度 (N/mm ²)	ひび割れ 発生強度 (N/mm ²)	備考
UFC	199	11.2	使用UFCはUFC指針(案)の標準配合粉体
無収縮 モルタル	61.3	-	常温用、始発：0-25、終結0-30(h-min)

(図-8)．荷重回数は供用期間 20 年を想定した 200 万回とし、疲労荷重の継続中には、1, 2, 3, 10, 100, 1000, 5000, 1 万, 10 万, 20 万回, 20 万回以降は 20 万回に 1 回のペースで疲労荷重を一旦停止して静的単調荷重を行った。静的単調荷重では、設定した疲労荷重を静的に荷重して各種計測を実施し、試験体の変状を確認した。静的荷重における計測項目は、荷重、水平 2 方向および鉛直変位、スタッドボルトのひずみ、UFC 床版の外観、スタッドボルトに取り付けたナットのゆるみである。図-9 にスタッドボルトの番号、図-10 にスタッドボルトのひずみ計測位置を示す。スタッドボルトのひずみ計測はボルト軸方向のひずみとし、スタッドボルト 1 本につき荷重側面 2 段、自由端面 2 段の計 4 か所のひずみを計測した。上下方向の設置位置は、下段はスタッドの付け根位置として鋼板との接合部に生じているひずみを、上段は床版と無収縮モルタルの境界部付近として床版のずれ等の影響および剛性変化の影響を確認した。



1～8：スタッドボルトの番号

図-9 スタッドボルトの位置



#：スタッドボルト 1～8

図-10 スタッドのひずみ計測位置

(4) 疲労試験結果

200 万回疲労荷重時点での UFC 床版の水平方向変位（ずれ）は 0.05mm、UFC 床版と無収縮モルタルとの相対変位も 0.03mm と極めて小さい結果であった。また試験後の試験体の目視観察では、UFC 床版および無収縮モルタルともにひび割れは確認されなかった。したがって、UFC 床版下面に設置した突起が UFC 床版と無収縮モルタルとの界面のずれ防止に有効で両者は一体として挙動しており、床版-モルタル間のずれによるスタッドボルトに付加的な曲げ応力は発生しないことが確認された。

図-11 に計測したスタッドボルトのひずみの代表例として、荷重側に一番近いスタッドボルト 4 における荷重とひずみ関係を示す。この図は、疲労試験を一時停止して実施した静的荷重試験時の計測値を連ねて示したものである。同図(a)は、スタッドボルトに貼り付けた 4 枚のゲージの内、上段（鋼板から 30mm の位置）におけるひずみ（自由端側：S41-a、荷重側：S41-b）を示している。また、同図(b)は、下段（鋼板近傍）におけるひずみ（自由端側：S40-a、荷重側：S40-b）を示している。同図において、疲労回数が増加するとともにひずみは増える傾向にはあるが、算定したスタッドボルトの降伏ひずみ（1985 μ ）に比べて小さな値であるとともに荷重とひずみの関係は直線的であり、各回の静的荷重においてはスタッドボルトは弾性変形を示している。なお、疲労荷重回数とともに残留ひずみは増加傾向を示しているが、これは疲労荷重によりスタッドボルト周辺の無収縮モルタルの局所的な損傷などにより生じた残留変位の影響が現れたものと考えられる。

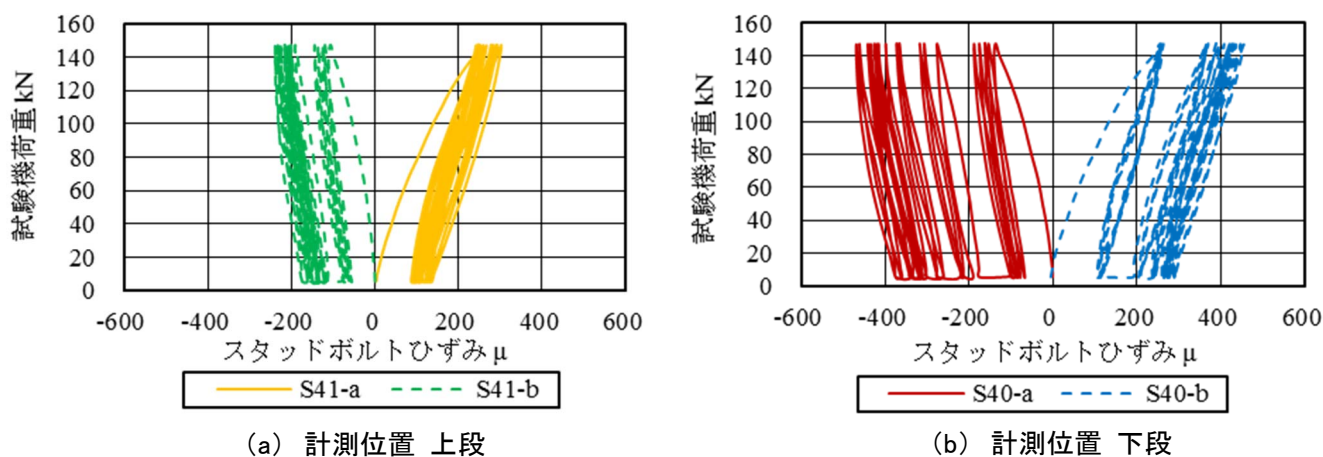


図-11 スタッ dBolt 4 における荷重-ひずみ関係

図-12 は、各スタ dBolt における荷側下段の計測位置で静的荷中に計測された引張ひずみの最大値を示したものである。概ね荷位置に近い順にひずみが大きく、荷位置に近いスタ dBolt が一番影響を受けているのが確認され、荷側と自由端側のひずみの比は 3 : 1 であった。

図-13 は各スタ dBolt の荷側面の下段における「引張ひずみの範囲」の履歴を示したものである。引張ひずみの範囲とは、疲労による残留ひずみを省いた弾性ひずみに相当し、各回における静的荷時のひずみの最小値と最大値の差、すなわちひずみ振幅の幅である。荷側と自由端側での値の差はあるものの、全てのスタ dBolt ともひずみの範囲はほぼ一定で推移しており、ひずみ範囲の変動は小さかった。つまり、疲労荷回数によってひずみの振幅は増大せず、安定していたと判断される。

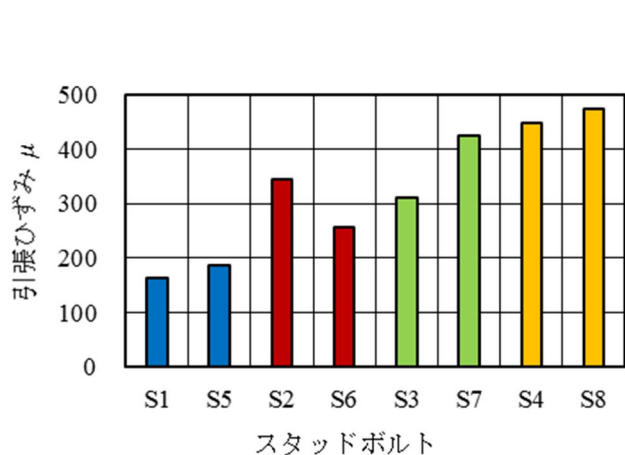


図-12 各スタ dBolt の引張ひずみの最大値

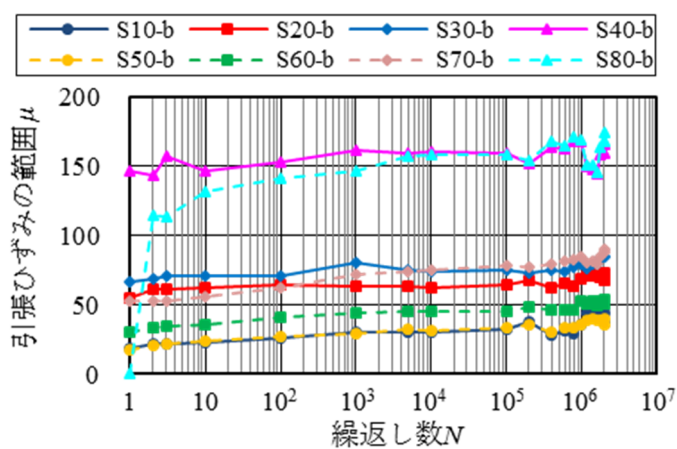


図-13 各スタ dBolt の引張ひずみの範囲

(5) 疲労試験のまとめ

今回の疲労試験では、200 万回の疲労荷に対し、開発した UFC 床版構造および鋼軌道との結合構造は安定した状態であり、UFC 床版および無収縮モルタルに明らかな変位やずれ、ひび割れなどは確認されなかった。また、スタ dBolt においても大きなひずみやひずみの増大等は確認されず、良好な結果であった。なお、本来であればスタ dBolt のせん断応力についても検証すべきであるが、実験上せん断応力の把握が難しいため、床版の変位とスタ dBolt の引張ひずみで検証を行った。

この疲労試験後に、破壊までの静的荷を行い、残存耐力を確認した⁵⁾。その結果、スタ dBolt が降伏した荷重(最大荷重)は 711kN であり、疲労荷重の 147kN に比べて十分に大きな荷重であることが確認された。

4. おわりに

モノレールの軌道桁およびコンクリート床版の更新に UFC を適用する開発を進めてきており、現在、その機能性・有効性および高耐久性検証の段階に来ている。更新に際して、UFC がもたらす軽量化は魅力の一つではあるが、それにも増して 100 年以上の高耐久であることが一番のポイントである。モノレールに限らず、昭和の中期・後期に建設された膨大な数のインフラ構造物が次々と更新の時期を迎えている。それらをただ淡々と更新していくだけでは、次の世代、その次の世代と更新の必要な構造物を受け渡して行くに過ぎない。我々の子孫をその呪縛から解き放つには、100 年、200 年と使い続けることができる高耐久な構造物を開発し、その技術を受け継いでいくことが急務ではないだろうか。そのために、飽くなき探求と開発を続けることが今の技術者の使命であると切に感じる今日この頃である。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー第 113 号，超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），2004
- 2) 武者浩透，大竹明朗，関文夫，大熊光，児玉明彦，小林忠司：無機系複合材料（RPC）を用いた酒田みらい橋の設計と施工，橋梁と基礎，Vol. 36，No. 11，pp. 2-11，2002
- 3) 武者浩透，大竹 明朗，横井 謙二，野口 孝俊：高耐荷 U F C 床版構造と量産化システムの開発，コンクリート工学，Vol. 48，No. 11，pp28-35，2010. 11
- 4) 田中 良弘，小林 隆，石堂 正之，熊谷 徹：UFC を適用した長大スパンモノレール軌道桁の構造検証，コンクリート工学年次論文集，Vol. 30，No. 3，2008
- 5) 吉本宏和，名嘉真浩昭，川口哲生，井上美佐男：超高強度繊維補強コンクリートとモノレール鋼軌道桁からなる複合桁の疲労耐久性に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 39，No. 2，pp. 1195-1200，2017.
- 6) 日本道路協会：モノレール構造物設計指針，pp. 61-81，1975