

# 論文 UFC を適用した長大スパンモノレール軌道桁の構造検証

田中 良弘<sup>\*1</sup>・小林 隆<sup>\*2</sup>・石堂 正之<sup>\*2</sup>・熊谷 徹<sup>\*3</sup>

**要旨:** 超高強度繊維補強コンクリート (UFC と略する) は、高強度、高じん性、高流動、高耐久性の特性をもつ魅力ある材料である。筆者らは、UFC 材料を適用した長大スパンモノレール軌道桁の技術開発を行い、東京モノレール昭和島車庫線において橋長 40m の跨座型モノレール軌道桁を完成した。この桁は、6 個のプレキャスト・セグメントから構成され、新たに開発されたジョイント工法により、これらが一体に接合されて軌道桁としての製作精度を実現された。接合方法の要素実験、プロトタイプの施工・構造実験が行われ、モノレール軌道桁としての設計手法の妥当性と構造性能が検証された。

**キーワード:** 跨座型モノレール桁, プレキャスト・セグメント, ドライジョイント, ウェットジョイント

## 1. はじめに

この 5 年間で UFC を適用した歩道橋はじめ道路橋、建築構造物の施工実績が拡大する傾向にある。<sup>1)</sup> これは、①2004 年に土木学会から「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案)」<sup>2)</sup> が発刊されたこと、②UFC の材料特性を活かすような技術開発が行われたこと、③新素材に対するユーザーの興味などが、拡大の要因として考えられる。しかし、これまで UFC による鉄道橋への施工実績はなかった。

筆者らは、UFC を適用した長大スパンのモノレール軌道桁の共同開発を実施してきた。跨座型モノレール軌道桁は、軌道としての厳しい形状寸法精度、また走行輪と軌道上の摩擦確保が要求される。そのために東京モノレール羽田線では、コンクリートの PC 桁を標準としている。道路横断部などでは長大スパンが必要とされる。PC 桁では 20m が限界とされたので、東京モノレールでは主部材を鋼構造とし軌道走行面をコンクリート構造とする長大スパンの合成軌道桁を採用してきた。今回の共同研究の結果、UFC により製作されたプレキャスト・セグメントを東京モノレール昭和島車庫線において接合して、桁長 40m の単線モノレール軌道桁を竣工することができた。写真-1 に竣工後にモノレールが走行している状況を示す。

本研究は、UFC を適用した長大スパンモノレール軌道桁の技術開発を目的に実施された。本論文は技術開発の中で、①ジョイントを含む構造の特徴、②ウェットジョイント接合部の要素実験、桁長 10m のプロトモデル軌道桁を用いた構造検証実験などの実験結果から主に安全性に関する構造検証、などを言及する。また、竣工後にモノレール実車によるたわみ計測より得られた、たわみ特性や剛性評価についても考察する。



写真-1 桁長 40m の跨座型モノレール軌道桁

## 2. 長大スパンモノレール桁の構造概要

### 2.1 プレキャスト・セグメントの構成

桁長 40m のモノレール軌道桁を一体に製作することは、型枠の転用や運搬上から困難である。本技術開発では、図-1 に示すようなプレキャスト・セグメントに分割して現地で接合する工法を採用した。プレキャスト・セグメントの構成は、桁軸に対して 3 個の逆 U 桁セグメントと 3 個の底板セグメントである。3 分割された逆 U 桁 (逆 U 桁-A~C) は相互にドライジョイントにより接合される。また底板 (底板-1~3) 相互、および桁と底板は孔明け鋼板ジベル (PBL: Perfo Bond Leisten) を適用したウェットジョイントにより接合される。(図-2)

### 2.2 構造の特徴

図-1 のようなプレキャスト・セグメントの構成とすることにより、コスト縮減や寸法精度の向上を可能とした。例えば、逆 U 桁のドライジョイントをスパン中央よりとし底板相互のウェットジョイントをその外側にすることにより、コストの低減を行った。モノレール桁は単純桁なので中央の曲げモーメントが最大となる。いず

\*1 大成建設 (株) 技術センター 荣誉研究員 Ph.D. (正会員)

\*2 東京モノレール (株) 取締役

\*3 大成建設 (株) 土木設計部 課長代理 修士

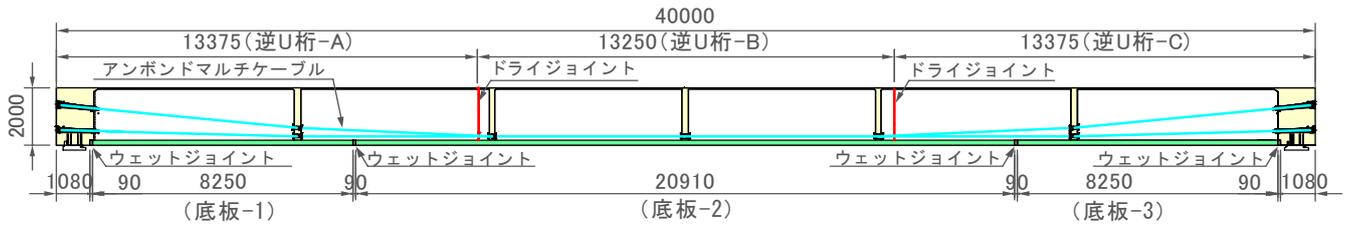


図-1 桁長40mのモノレール軌道桁の一般構造

このタイプのジョイントも曲げ引張力に対しては抵抗できないので、使用限界状態の設計荷重に対してはフルプレストレスとする必要がある。ところが、図-1のように桁と底板の接合位置を一致させないことにより、主桁ジョイント位置でフルプレストレスとする必要がなくなり総緊張力の低減が可能となった。

逆U桁と底板を分離したのは、①桁をボックス断面で製作する場合には、UFC 打設時に内型枠に多大な浮力が働き正確な寸法精度を保持することが困難、②ボックス断面のプレキャスト・セグメントは構造的には有利になるものの、外緊張ケーブルを配置することができなくなり薄肉断面を実現できない、③桁幅はモノレール車両から80cmに制限されている、などの理由からである。その結果、床版厚7cm、ウェブ厚5cmと13cm、底板厚15cmとし、自重を70トンと軽量化を実現できた。

逆U桁の接合にドライジョイントを採用したのは、①軌道桁上面のゴムタイヤ走行面と側面の案内輪走行面の接合部に段差を発生させない、②現地での接合工程期間を短縮する、などの理由による。

このために、二種類のドライジョイントとウェットジョイントの技術開発の成否が、長大スパンモノレール軌道桁開発のキーポイントとなった。

### 2.3 ドライジョイント

このジョイントは、従来のPC橋梁に適用されているプレキャスト・セグメント工法とプレキャスト・セグメントをマッチ・キャストにより製作する点では基本的には同じ方法である。しかし、UFCは従来のコンクリートに比べて、養生中の自己収縮量が大きく、これに対処するための技術開発が必要であった。

本ドライジョイントの接合面には、両面ともに凹形状のせん断キーが設けられている(図-3)。従来のせん断キーは相互に凹凸形状のキーをマッチ・キャストで製作して接合されていた。しかし、接合面に塗布するエポキシ樹脂の厚みなどにより、接合時に凹接合部にひび割れが発生するリスクがあった。本ドライジョイントではドライジョイントの仮接合後に無収縮グラウトを充填してせん断キーとした。

マッチ・キャストはオールド・セグメントを型枠としてニュー・セグメントを製作することにより、接合面が

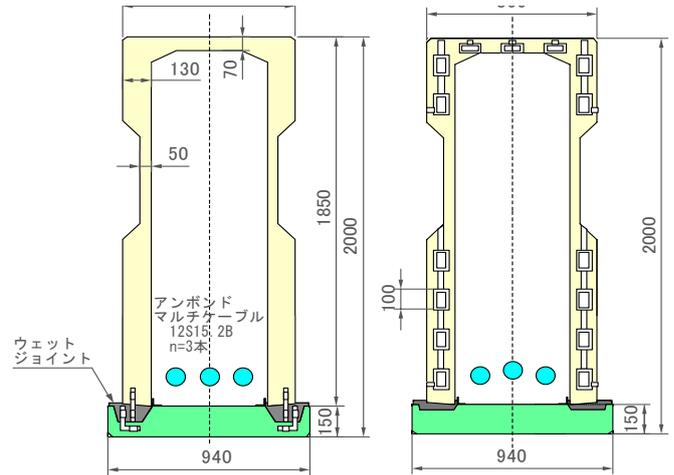


図-2 ウェットジョイント

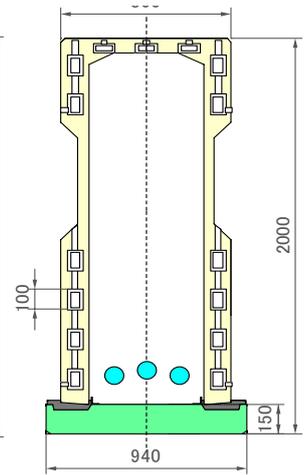
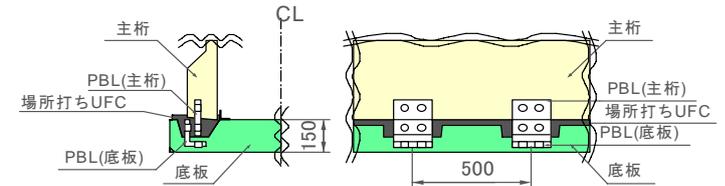


図-3 ドライジョイント



断面図 側面図

図-4 ウェットジョイントの詳細

合致する形状となる。しかし、UFCは単位セメント量が多いために、ニュー・セグメントを製作する際にすでにオールド・セグメントの断面形状がわずかに収縮している。これに対処するために、マッチ・キャスト面には断面形状のゲージとなる鋼製妻型枠を介して、ニュー・セグメントを製作した。ゲージとなる鋼製妻型枠の鋼板厚さを一定とすることにより、マッチ・キャスト面のミラー転写を実現できた。

### 2.4 ウェットジョイント

PBLを用いたウェットジョイントは、すでに「赤倉温泉ゆけむり橋」<sup>3)</sup>の施工においてUFCのU桁ブロックと床版と接合部に適用されている。このときのジョイントは主として桁軸方向のせん断伝達を行いU桁と床版を合成構造とすることが役割であった。今回の逆U桁と底板のウェットジョイントは、逆U桁と底板とのせん断伝達のほかに桁ウェブに働く面外曲げモーメントを底板に伝達する役割がある。また、底板相互のウェットジョイントは、桁の曲げモーメント作用時に底板相互に働く引

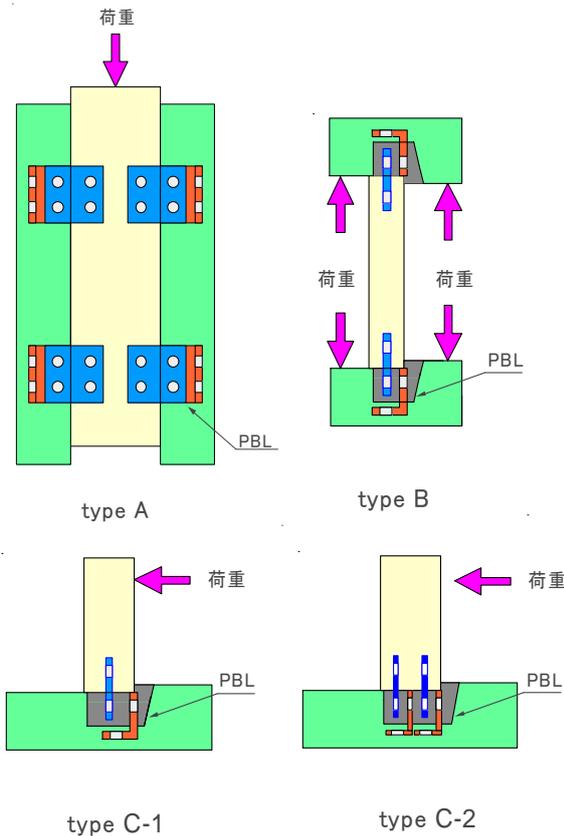


図-5 ウェットジョイント要素実験の荷重方法

張力を伝達しなければならない。図-4に今回採用したウェットジョイント部の詳細を示す。

PBLを用いたウェットジョイントの充填材は、UFCを現場打設するものである。そのために、PBLの孔に充填されるUFCのせん断抵抗と鋼板の面内せん断抵抗により成立するものである。充填材をUFCとすることにより、従来のようにPBLの孔に鉄筋を貫通する必要がなく、ジョイント部をコンパクトにできる。

### 3. 構造の検証実験

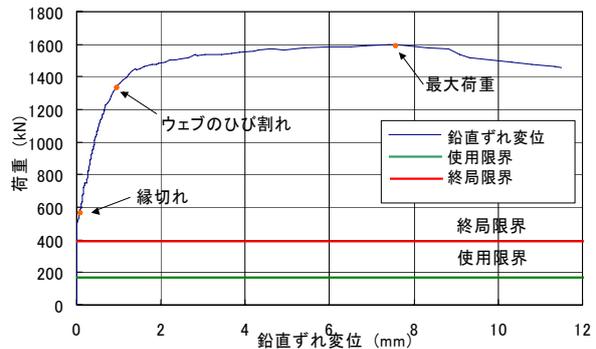
#### 3.1 ウェットジョイントの要素実験

逆U桁と底板に適用するウェットジョイントには、①桁軸方向のせん断伝達、②引張伝達、③面外曲げモーメント伝達の構造性能が求められる。せん断伝達は桁に発生する桁軸方向の断面力に対して、逆U桁と底板が合成構造とするために不可欠である。一方、引張伝達や面外曲げモーメント伝達は、モノレールが地震時に受ける転倒モーメントにより発生する桁軸直角方向の断面力に対する抵抗部材として必要とされる。

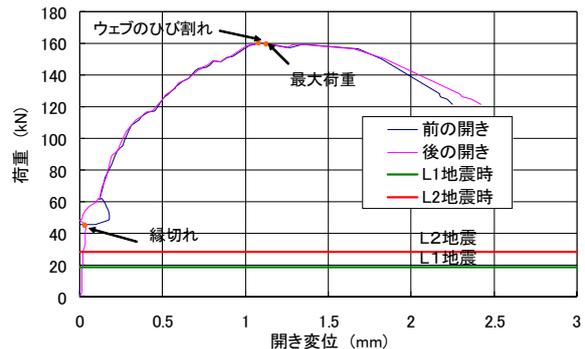
このような断面力が発生した際に、PBLの必要枚数や形状、桁ウェブの厚さなどを設計的に決定し、要素実験によりジョイント構造の照査を行った。3つの異なる作用力に対して、図-5に示すようなタイプ-A,B,Cの荷重方法を計画した。また、PBLはウェブ側(孔あきフラットプレート)からと底板側(孔あきアングルプレー

表-1 実験ケースと実験結果

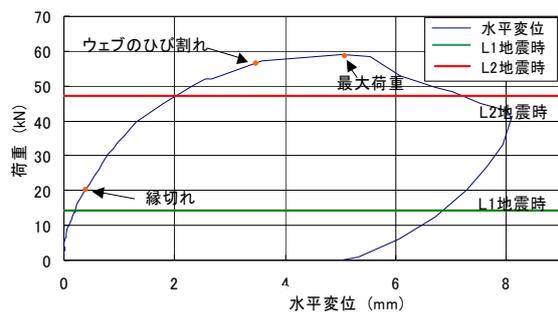
実験ケース	荷重タイプ	PBLの枚数	ウェブの幅(mm)	設計荷重(kN)		実験結果(kN)	
				SLS/L1地震	ULS/L2地震	縁切れ荷重	最大荷重
A-1-90	A	1	90	166	393	570	1600
A-2-155	A	2	155	166	393	1200	3356
B-1-90	B	1	90	18.9	28.6	64.0	159.4
C-1-90	C	1	90	14.3	47.0	9.2	41.3
C-1-130	C	1	130	14.3	47.0	20.0	59.0
C-2-155	C	2	155	14.3	47.0	17.2	91.6



(a) 試験体 A-1-90 の荷重と変位の関係



(b) 試験体 B-1-90 の荷重と変位の関係



(c) 試験体 C-1-130 の荷重と変位の関係

図-6 ウェットジョイントの実験結果

ト)から、各々  $n=1$  枚ずつ突出するのを標準としたが、 $n=2$  枚の場合も実験した。桁ウェブの幅は3種類の幅を考慮した。これらのパラメータを組み合わせた実験ケースと実験結果を表-1に示す。試験体寸法はすべて桁長40mの実物大を想定したものであり、PBLの鋼板厚は19mm、孔径は30mmである。

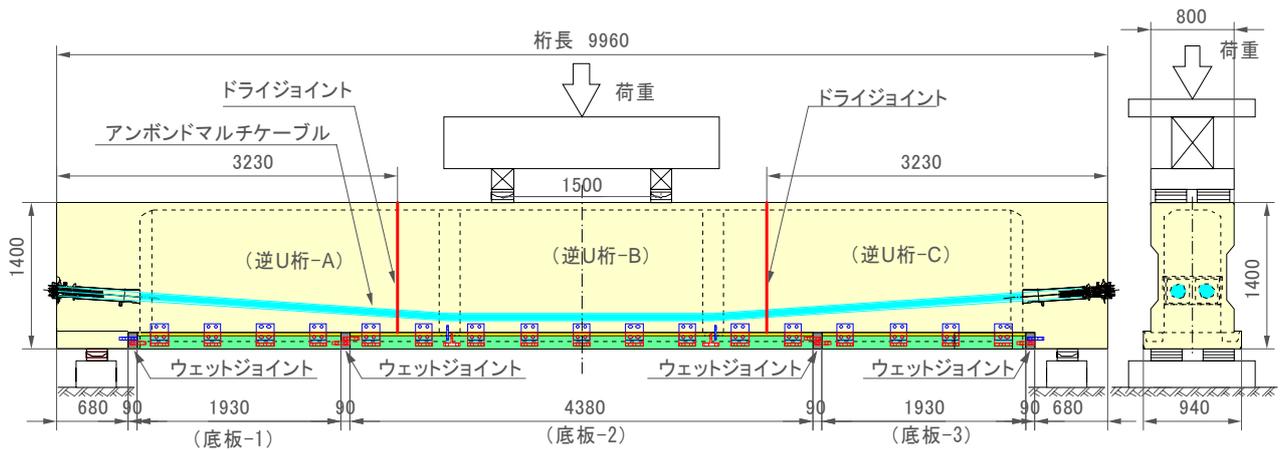


図-7 プロトモデル桁（10m桁）の一般構造と荷重方法

ウェットジョイント部に発生する設計荷重は、40mのモノレール軌道桁をモデル化した三次元FEMの線形解析より求めた。線形のFEM解析なので設計荷重としては安全側に推定される。設計荷重の組み合わせとしては、L1地震時などの使用限界状態（SLS）やL2地震時などの終局限界状態（ULS）であり、土木学会指針<sup>2)</sup>に従い要素実験で得られた縁切れ荷重（初期ひび割れ発生荷重）や最大荷重と設計値との比較により構造検証を行った。表-1に示す設計と実験結果から、タイプ-AとBの断面力の組合せに対しては、一枚のPBLでウェブ厚が90mmで成立することを示している。しかし、タイプ-Cの荷重では、PBLが一枚でもよいが、ウェブ厚が130mm必要であることが示された。代表的な実験ケースについて荷重と変形の間関係を図-6に示す。三方向の断面力（要素実験：タイプ-A,B,C）に対して、逆U桁と底板のせん断伝達に対しては余裕度が多いが、面外曲げモーメントに対しては少ないことがわかった。

### 3.2 プロトモデル桁による構造検証実験

桁長40mのモノレール桁を施工するに先立って、桁長10mのプロトモデル桁を試験施工して、プレキャスト・セグメント工法の施工検証と荷重実験により構造検証を行った。プロトモデル桁の一般構造と荷重方法を図-7に示す。この桁は、桁幅をはじめとして、ウェブの側面形状、プレキャスト・セグメントの構成、ジョイントの位置、およびPBLの形状寸法などは、桁長40mのモノレール桁と同じ寸法形状である。ただし、桁長が10mで高さが1.4mと小さい。

プロトモデル桁のマッチ・キャストの施工方法ははじめ、ジョイントの施工方法、養生方法、緊張などは、40mのモノレール桁と同じである。写真-2に逆U桁のプレキャスト・セグメントを、写真-3にプレキャスト・セグメントの架設・接合の状況を示す。プレキャスト・セグメントの接合端面にはせん断キーがあり、また、ウェブ



写真-2 逆U桁プレキャスト・セグメント



写真-3 プレキャスト・セグメントの架設・接合

下端からはウェットジョイントのPBLが突出している。逆U桁の架設は、レベルに架設された底板セグメントの上に吊治具の下端に設けた支持ボルトを用いて行い、接合端面にエポキシ樹脂塗布後、引き寄せしてドライジョイントを完成した。

荷重実験は図-7に示すように、ジョイント部に曲げとせん断が働くように荷重位置を決定した。荷重実験よ

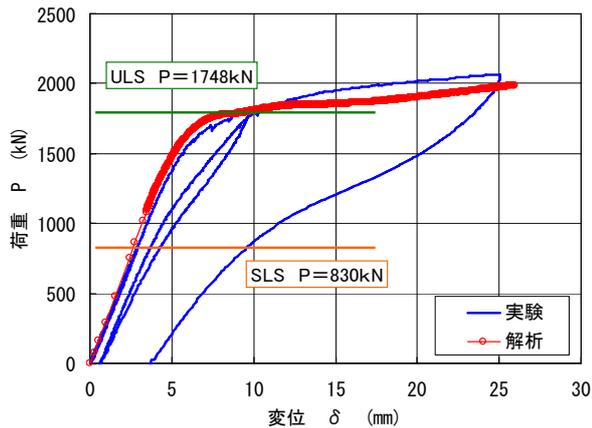


図-8 10m桁の実験結果とFEM解析結果

り得られた荷重と中央変位の関係、および材料非線形を考慮した三次元 FEM 解析の結果を図-8 に示す。40m 桁の構造検証を 10m 桁で行うために、40m 桁で生ずる SLS と ULS での等価な断面力を求めて、等価荷重を算定した。その結果、SLS では荷重荷重  $P=830\text{kN}$  となり、ULS では  $P=1748\text{kN}$  となった。荷重実験では、SLS までの荷重荷重を 3 回載荷して、ひび割れが発生しないことを確認し、ULS の荷重荷重に対して破壊しないことを確認した。

荷重実験の結果、SLS までの荷重荷重に対して、ジョイント部を含めてひび割れは認められず、また徐荷、再載荷しても弾性挙動を示した。 $P=1200\sim 1300\text{kN}$  にて底板スパン中央に曲げひび割れが発生し、また底板ウェットジョイント部の縁切れが観察された。 $P=1400\text{kN}$  にて逆U桁のドライジョイント部で目開きが確認され  $P=1700\text{kN}$  にてウェブに斜めひび割れが確認された。ひび割れ図を図-9 に示す。斜めひび割れはドライジョイント部をはさんで左右に分散して発生した。ULS の  $P=1748\text{kN}$  を到達した後、徐荷して残留変形を確認し、再載荷では最大荷重  $P=2067\text{kN}$  を確認した。

### 3.3 FEM 解析による挙動の考察

二種類のジョイントで構成されるモノレール桁の力学挙動を明確にするために、材料非線形を考慮した三次元FEM解析を実施した。図-10に示すように解析モデルは 1/4 対称モデルとした。逆U桁、底板およびウェットジョイントのUFCは引張軟化を考慮したソリッド要素、PBLのジョイント部は非線形パネ要素、また外ケーブルはトラス要素でモデル化した。UFC部材ごとの引張軟化特性を、図-11のようにモデル化した。引張軟化曲線のモデル化は土木学会指針<sup>2)</sup>に従い、引張強度  $f_{tk}$  は、それぞれの部材の曲げ試験から得られた強度から土木学会指針<sup>2)</sup>に示された関係式を用いて推定した。また、ドライジョイントの引張軟化曲線のモデル化については、エポキシ樹脂を塗布したUFC同士の引き剥がし試験

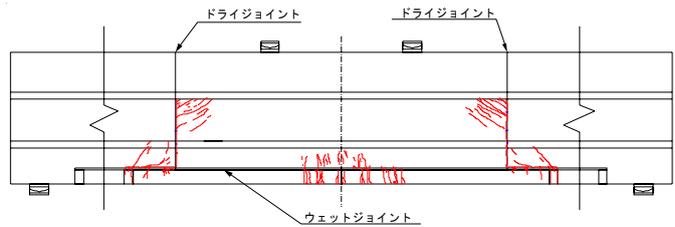


図-9 10m桁荷重実験のひび割れ図

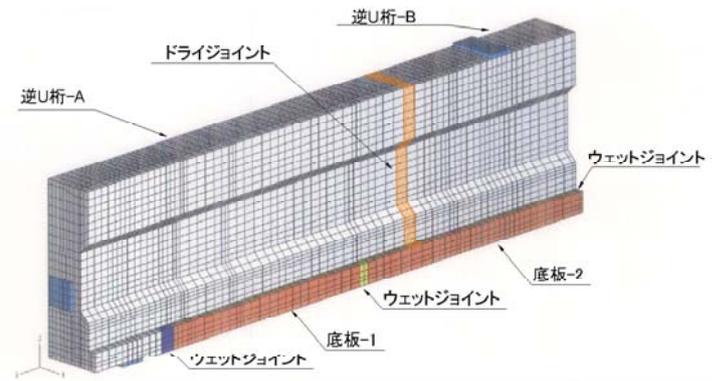


図-10 10m桁の1/4対称FEMモデル

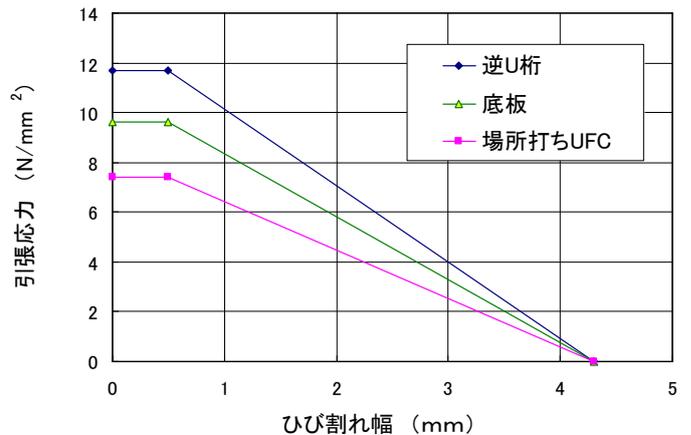


図-11 UFCの軟化曲線

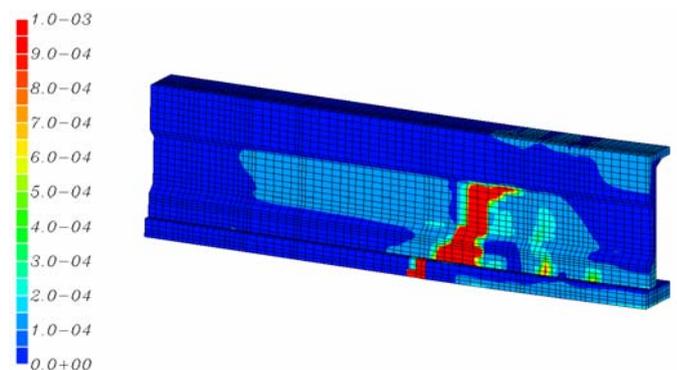


図-12 最大主ひずみの解析結果

により得られた、最大引張応力  $5\text{N/mm}^2$  を引張強度として、コンクリートの軟化曲線を適用した。PBLジョイント部のせん断バネ特性および引張バネ特性は、要素実験から得られた荷重と変位の関係(図-6の(a)と(b)の実験結果を折れ線に置換)から求めた。

これらのモデル化による解析によれば、図-8に示すように荷重-中央変位の関係の解析結果は、実験結果と非常に良い一致を示した。ULSの載荷荷重  $P=1748\text{kN}$  付近における最大主ひずみの分布の解析結果を図-12に示す。ジョイント近傍で最大主引張ひずみの解析結果は、図-9に示した載荷実験から得られたひび割れ図の観察結果とよく一致している。

### 3.4 モノレール実車による計測

完成した桁長40mのモノレール軌道桁に対して、開発技術、設計手法、施工方法などの妥当性を検証するために、モノレール実車を走行させて、たわみ、および底板のひずみ計測を実施した。使用したモノレール車両は、通常の6両編成より空車の4両編成を使用して、40m桁の中央たわみ量が最大になるように停車位置を決めた。写真-4にモノレール車両が停車している状況を示す。

たわみ・ひずみ計測の結果、中央のたわみ計測値は29.2mm、ひずみ計測値は $131\mu$ であった。これに対して、設計により逆U桁と底板が完全に合成構造であると仮定して梁モデルで算定した結果、たわみが32.9mmでひずみが $179\mu$ であった。(実測値/設計値)の比を、たわみとひずみで算定すると、それぞれ0.89と0.73となった。この結果、たわみ、ひずみのいずれの実測値も、設計値よりも小さく、モノレール軌道桁のたわみ性能としては満足な特性を得ることができた。設計値が大きかった理由として、設計計算においては緊張ケーブルの剛性や隔壁の剛性寄与分を考慮していないことが考えられる。また、ひずみの(実測値/設計値)比が、たわみのそれよりも小さい理由として、ウェブと底板とのウェットジョイントにおいて、若干せん断剛性が一体の構造よりも小さかったことが考えられる。

### 4. まとめ

1) 今回の立地条件下では、6個に分割したプレキャスト・セグメントの構成と新たに開発されたジョイントは、軌道桁としての高精度化、軽量化、建設コストの低減を



写真-4 モノレール実車による計測

実現した。

- 2) 開発されたドライジョイントは、接合部の段差がなく接合でき、またジョイント工程の短縮を可能とした。
- 3) 開発されたウェットジョイントは、3方向の断面力に対して満足な構造耐力、剛性性能を示した。
- 4) プロトモデルの10m桁の施工・構造実験、および三次元非線形FEM解析から、今回開発のモノレール軌道桁のSLSやULSの安全性照査が明らかになった。
- 5) ジョイントを含むプロトモデルで検証されたFEMモデルにより、桁長40mの長大スパンモノレール桁の安全性照査をより高精度で実施できる方向性を示した。
- 6) 完成した桁長40mのモノレール桁のたわみ性能は、軌道桁として設計レベルを満足するものであった。
- 7) 今後の展望としては、曲線を含む上下複線の長大スパンモノレール軌道桁の技術開発である。

### 参考文献

- 1) 田中良弘：超高強度繊維補強コンクリート(ダクトル)の特徴と適用事例からみた将来展望, 土木技術, 62巻, 8号, pp.36-41, 2007.8.
- 2) 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.
- 3) 田中良弘・武者浩透・大島邦裕・安部吉広：超高強度繊維補強コンクリートを用いたPC橋梁の長大スパン化に関する研究開発, コンクリート工学, Vol.42, No.8, pp.30-36, 2004.8.