

超高強度繊維補強コンクリート“UFC”を用いた建物内部の渡り廊下の構造について

飯塚 崇文*1・萱嶋 誠*2・田口 典生*3・篠崎 洋三*4

1. はじめに

1997年に、フランスのブイーグ社らは、圧縮強度が $F_c = 200 \text{ N/mm}^2$ を超える超高強度繊維補強コンクリート¹⁾（以下、UFCと記す。UFC：Ultra-High Strength Fiber Reinforced Concrete）を開発した。その新たなコンクリート系材料は、1999年に日本国内に技術導入され、以後、歩道橋「酒田みらい橋²⁾」など数多くの土木構造物に適用されてきている。

しかし、建築分野では、建築材料としてのコスト（材料費＋製造費）、建物使用部位の要求性能に応じた製造・打設施工方法、耐火性能（爆裂）、構造性能などまだ未解明な点があり、建築物に適用されることがなかった。

そこで、本技術開発では、UFC材料の特徴である高強度、高じん性能を生かして薄い床版での長スパン構造を実現するため、建物内部に設ける渡り廊下床版を対象（写真-1）に、材料特性試験、および小型・大型模型試験体を用いて部材実験を行い、建築建材としての適用性の検討と性能評価を行った。本稿では、UFCを用いた建物内部の渡り廊下床版の設計・施工概要と一連の性能確認実験について報告する。

2. 建築で採用される渡り廊下の特徴

建築で扱われる渡り廊下は、設置される場所が建物内部の場合は屋内渡り廊下と呼ばれ、建物外部の場合は屋外渡り廊下として分類されている。屋内・屋外渡り廊下は、隣接する建物や建物内部の各機能空間群を連結するものであり、デザイン的な連続性、構造安全性、歩行者振動などを考慮して設計が行われている。

最近の屋内渡り廊下では、透光性ガラス等を用いて大きな窓開口を設けることや床版を薄くするなど、自然光などを遮ることの少ない構造形式が増える傾向である。とくに、

床版を薄く設計する場合は、従来以上に、歩行者振動対策が重要となっている³⁾。また、屋内渡り廊下は、土木構造物の歩道橋や屋外渡り廊下とは異なり、建築構造部材として設計され、かつ、非難経路の一部として使用される可能性があるため火災時構造安全性⁴⁾が要求される場合が多い。一方、構造形式については、屋内・屋外渡り廊下とも、適用スパン長が10 m以下ではRC現場打ち造が多く、10 m以上になるとS造やPC造が多用される傾向である⁵⁾。

3. UFCを用いた屋内渡り廊下の設計概要

屋内渡り廊下は、慶應義塾大学（三田）南館での低層棟と高層棟を連結するアトリウム内に計画された（写真-1、図-1、2）。以下に、建物概要を示す。

計 画 地：東京都三田2丁目

建築面積：2 097 m²

延べ面積：18 489 m²

階 数：地下5階、地上11階、塔屋1階

建物高さ：48.3 m

用 途：大学（教室、図書館、教員用室など）



写真-1 建物内部の渡り廊下



*1 Takafumi IIZUKA

大成建設(株)技術センター
建築技術研究所 建築構工法
研究室 課長



*2 Makoto KAYASHIMA

大成建設(株)技術センター
建築技術開発部 建築生産
技術開発室 課長



*3 Norio TAGUCHI

大成建設(株)技術センター
建築技術研究所 防災研究室
課長



*4 Yozo SHINOZAKI

大成建設(株)技術センター
設計本部 構造グループ
グループリーダー



図 - 1 慶應義塾大学(三田)南館の外観パース

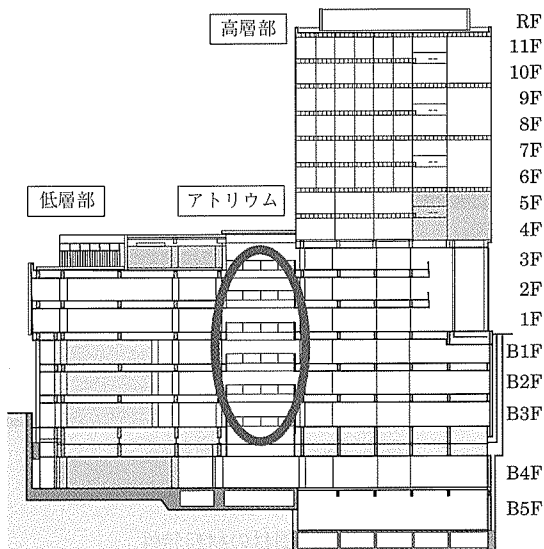


図 - 2 慶應義塾大学 (三田) 南館の断面図

渡り廊下床版は、設計コンセプトである「明るく開放的なアトリウム空間」を実現するために、図 - 3 に示すような全長 11.3 m で、横幅 2 m、部材せいが 50 ~ 225 mm (スパン長の 1 / 50 程度) の薄肉床版に、PC 鋼より線 7 本より ϕ 15.2 mm を 18 本配筋した UFC を用いたプレテンション方式のプレストレスト構造である。

渡り廊下床版を非常に薄くすることで、ガラスファサ-

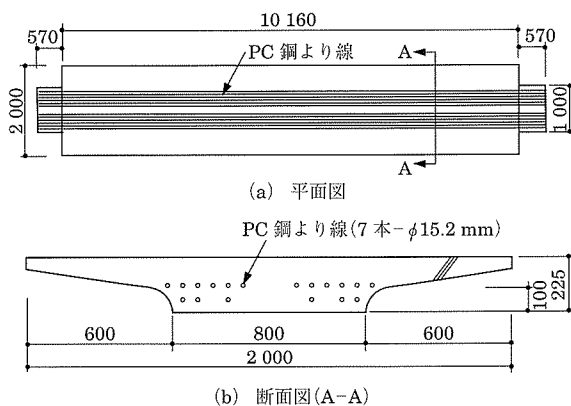


図 - 3 渡り廊下床版の概要

ドからアトリウム空間へ導かれる光を遮ることなく、建物内部まで取り入れることが可能となった。また、床版が非常に薄いため、床版内部に 2 箇所、薄型の制振装置を埋め込んで歩行振動に対して使用性能の向上を図った。

4. 構造性能と施工性能に対する性能確認実験

4.1 材料特性の確認試験

(1) フレッシュ性状

表 - 1 に渡り廊下床版に使用した UFC の配合表を示す。粉体には、UFC プレミックス標準配合粉体を用いた。標準配合粉体は、水粉体比が 8 % と小さく水和反応に必要な水量が最小限に抑えられ、最密充てん概念により粒度調整されているため、フロー値は鋼繊維の投入前後でもほとんど変化することなく目標値の 250 mm に対して 240 ~ 250 mm 程度のフレッシュ性状を示した (写真 - 2)。

表 - 1 UFC の配合表

単位: kg/m³

水 (内, 高性能減水剤)	UFC プレミックス標準配合粉体	鋼繊維
180 (22)	2 254	157

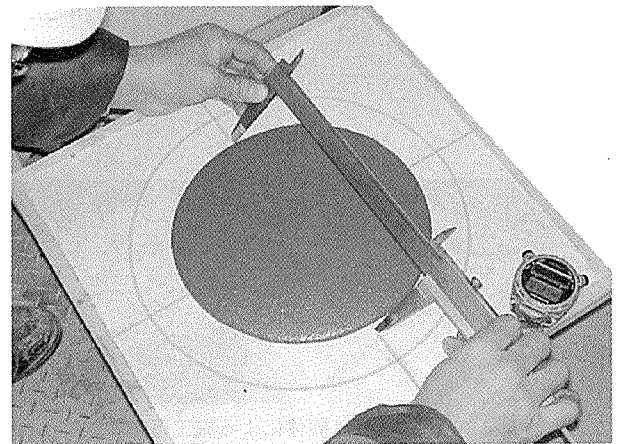


写真 - 2 フロー試験での計測状況

(2) 力学特性

表 - 2 に、UFC の目標性能と打設後の圧縮強度、ヤング係数、曲げ強度の材料試験結果を示す。UFC を打設後、1 次養生として気中養生を 48 時間行った後、2 次養生として蒸気養生槽により 90 °C ・ 48 時間の高温蒸気養生を行った。材料試験結果より、表 - 2 に示すように圧縮強度は目標性能の 180 N/mm² に対して、1 次養生後で 79 N/mm²、2 次養生後には 221 N/mm² まで強度発現していることを確認した。また、ヤング係数は、2 次養生後には 5.0 × 10⁴ N/mm² 以上に達したことを確認した。

4.2 打設施工性の確認実験

渡り廊下は、部材せいが断面中央部で 225 mm、端部で 50 mm の薄肉床版でありながら表面仕上げが打放しであるために、断面収縮を考慮した断面形状の実現性、打設施工法、型枠緩衝材による美観・仕上り状態などの施工確認実

表 - 2 UFC の力学材料特性

試験日	UFC	圧縮強度 σ_c (N/mm ²)	ヤング係数 E_c (N/mm ²)	曲げ強度 σ_b (N/mm ²)
	目標性能	180	50 000	21
	気中養生 材齢 5日	79	42 000	—
	蒸気養生終了後 材齢 14日	221	57 100	—
	材齢 28日	220	56 400	22.7

験を行った。

写真 - 3 と写真 - 4 は、小型、および実大模型試験体を用いた施工性確認実験の状況である。断面形状については、小型模型試験体を用いた施工性確認試験により、2次養生後の乾燥収縮によってもクラック等が発生しないことを確認した。また、型枠表面材には、UFC の打放し仕上げの出来栄として型枠のジョイント痕が残らないよう長尺シートを使用した。UFC 打設に際して、天端型枠には空気を排出することが可能な特殊シートを取り付け、エア抜きを行いながら不陸を抑える方法を用いた。打設施工方法として、排出口径が 100 ϕ と 150 ϕ の 2 種類のホッパーを用いて比較実験を行った後、作業性等を考慮して 150 ϕ を採用した。打設は 15 分 / 1 バッチで行い、渡り廊下床版 1 体に 3 バッチを用いて 45 分ほどで打設が終了するよう打設計画を作成した。



写真 - 3 小型模型試験体による施工確認試験



写真 - 4 実大模型試験体による打設施工状況

4.3 構造性能評価のためのプレストレス有効率の推定

プレストレス構造形式による渡り廊下床版の構造性能を把握するため、実大模型試験体を用いた部材実験により緊張材の定着域長さ、プレストレス有効率、および曲げせん断特性を検討した。また、手摺部分の安全性を検証する

ため、手摺脚部を対象としたアンカーボルトの引抜き耐力実験を行い、安全余裕度を確認した。プレストレス有効率は、試験体製作段階での 1) PC 鋼材のひずみ実測値からの推定、曲げ実験結果に対する 2) 曲げひび割れ強度式を用いた推定、3) プレストレス力をパラメータとした有限要素法 FEM 解析での推定結果を比較検討した後、推定した。

(1) PC 鋼材のひずみ実測値からの推定

試験体は、材軸方向に 11.3 m、横幅 2.0 m、部材せいが断面中央で 225 mm の薄肉床版中に、PC 鋼より線 7 本より ϕ 15.2 mm を 22 本配筋した実大模型試験体である (写真 - 5)。

表 - 2 に UFC、表 - 3 に PC 鋼材の材料特性を示す。PC 鋼より線のひずみ計測は、図 - 4 に示す測定点位置にて、高温測定用のひずみゲージを用いて材齢 16 日目まで計測した。また、試験体材軸方向の変形について、UFC の総圧縮ひずみの実測とプレストレス導入前後、および高温蒸気養生前後にて実寸検査を実施した。

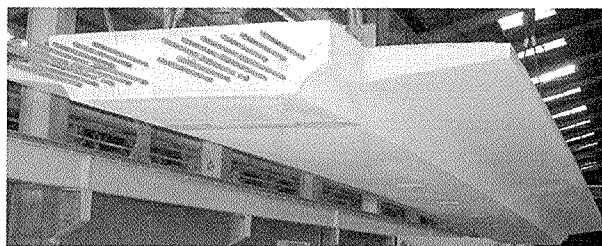


写真 - 5 実大模型試験体

表 - 3 PC 鋼材の材料特性

緊張材	降伏強度 σ_y (N/mm ²)	ヤング係数 E_s (N/mm ²)
PC 鋼より線 (7 本 - ϕ 15.2 mm)	1 817	211 000

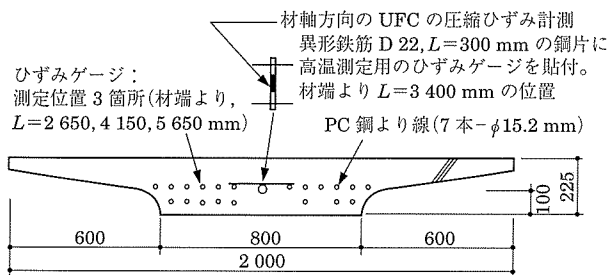


図 - 4 UFC 床版内のひずみ計測位置

図 - 5 に、UFC 打設後から高温蒸気養生終了時までの PC 鋼より線の引張りひずみ実測値と UFC の総圧縮ひずみ実測値の経時変化を示す。PC 鋼より線の引張りひずみは、図 - 5 に示すようにプレストレス導入時には UFC の弾性縮みによって 5 400 μ 程度から 5 000 μ 付近まで低下した。また、材軸方向の UFC の総圧縮ひずみは、PS 導入時に -330 μ 程度の圧縮ひずみが生じたのち、高温蒸気養生開始前までに圧縮クリープの影響で -450 μ 程度まで圧縮ひずみが進展した。

その後、高温蒸気養生開始後は、2日間ほどで圧縮ひずみは-1000 μ 程度まで増加した。また、UFC打設前と高温蒸気養生後の試験体の実寸検査値から算定される収縮ひずみ量は-930 μ 程度であり、UFCの総圧縮ひずみの計測値-1000 μ と比較的良好な対応結果を示した。

プレテンション方式によるUFC床版のプレストレス有効率 η は、実測値より0.6程度と推定され、常温下での普通プレレストレストコンクリートを対象とした現行規準⁶⁾の $\eta = 0.8$ より低い値であった。

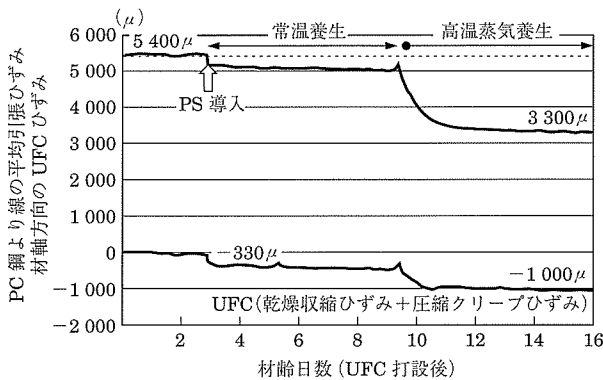


図-5 PC鋼材とUFCのひずみ実測値の経時変化

(2) 曲げひび割れ強度式による推定

渡り廊下床版の曲げせん断特性を確認するため、図-4、写真-5に示す実大模型試験体を用いて対称2点載荷曲げ実験を行い、ひび割れ発生状況、PC鋼材・UFCの軸ひずみ値の推移、および荷重-変形量関係などを計測した。

図-6に、鉛直荷重-床版中央下面での鉛直変形量の関係を示す。また、図-7に、UFC床版の中央断面下縁部での曲げひび割れ発生荷重と有効プレストレス力の関係を示す。有効プレストレス力 P_e は、実験結果の曲げひび割れ発生荷重 P_{cr} に対応した下式で表されるプレストレス力などの影響を考慮した断面縁応力度 $\sigma_{pc} + \sigma_{d2} + \sigma_{ib}$ との関係より算出した。

$$M_{cr} = (\sigma_{pc} + \sigma_{d2} + \sigma_{ib}) Z_2$$

$$P_{cr} = \frac{4(M_{cr} - W_d \cdot \frac{l^2}{8})}{l - b} + W' \quad (1)$$

ここで、

- M_{cr} : 曲げひび割れモーメント
- σ_{pc} : プレストレス力による下端縁応力度
- σ_{d2} : 試験体の自重による応力度
- σ_{ib} : UFC材料の曲げひび割れ強度
- W' : 載荷梁自重+試験体の自重
- W_d : 試験体の単位長さあたりの自重
- l : 試験体の支承間距離
- b : 2点載荷間の距離
- Z_2 : 床版の下部断面係数

曲げ実験結果の $P_{cr} = 195$ kNに対応する P_e は、図-7に示すようにUFCの曲げ強度のバラツキを0.8~1.2倍の範

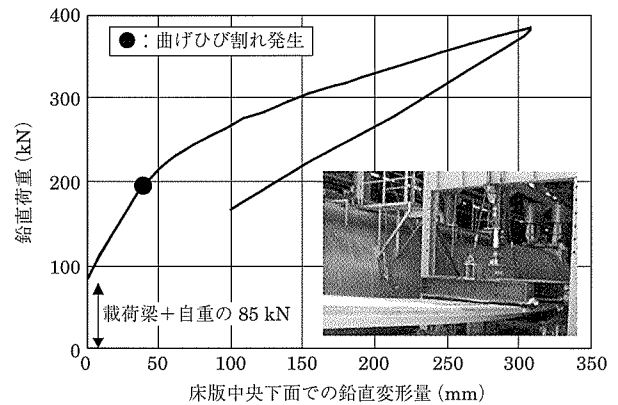


図-6 鉛直荷重-鉛直変形量の実験結果

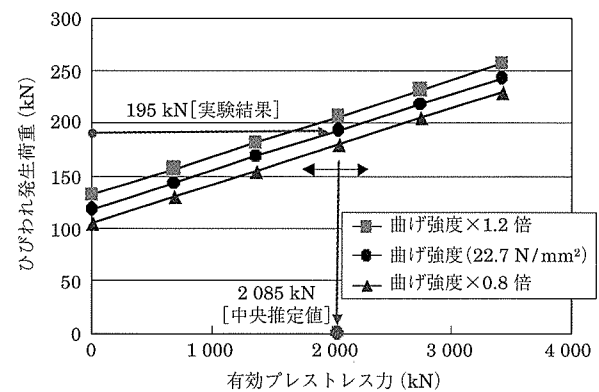


図-7 ひび割れ発生荷重-有効プレストレス力の関係

囲にて考慮した場合、1724~2446 kN程度であった。また、 η は、 P_e の推定値をプレストレス導入力3773 kNで除して規準化した場合、0.46~0.65程度となり平均値では $\eta = 0.55$ 程度であった。

(3) プレストレス力をパラメータとしたFEM解析による推定

プレストレス力をパラメータとした汎用プログラムDIANA⁷⁾を用いたFEM解析により、実験結果のひび割れ発生荷重、およびひび割れ発生後、最大耐力に至るまでの荷重-鉛直変形量の関係など比較検討を行い、比較的良好に対応する有効プレストレス力の推定を行った。解析では、試験体中央下端でのひび割れ発生状況、およびひび割れ進展状況等について実験結果との整合性を確認するため、試験体形状は8節点立体要素モデルで、PC鋼より線はトラス要素でモデル化を行い、変位増分にて3次元非線形解析を行った。

解析では、有効プレストレス力をPC鋼より線の降伏強度 σ_y に対して、0, 0.2, 0.3, 0.4, 0.6倍と変化させた(プレストレス有効率 η で0, 0.35, 0.5, 0.7, 1.0)。図-8に、鉛直荷重-渡り廊下床版中央の鉛直変形量関係の解析結果と実験結果の比較を示す。図-8内に、略算式による曲げ終局耐力の計算値を点線で示し、ひび割れ発生荷重を○●印、およびPC鋼材の降伏荷重を▲印で示す。

図-8に示すPC鋼より線に0.3 σ_y ($\eta = 0.5$)~0.4 σ_y

($\eta = 0.7$) のプレストレス力を導入した感度解析結果は、曲げひび割れ発生荷重、ひび割れ進展状況、および鉛直荷重 - 鉛直変形量の関係などの実験結果と比較的良好に対応していることから、曲げ実験結果での η は 0.5 ~ 0.7 程度と推定される。

以上のように、PC 鋼材のひずみ実測値より推定 $\eta = 0.6$ 程度に対して、曲げひび割れ強度式による 0.55 程度、パラメータによる感度解析結果の 0.5 ~ 0.7 程度と、各推定値とも比較的良好な対応結果であったことを勘案すると、各推定値の中央値に相当する $\eta = 0.6$ 程度は確からしい推定結果と思われる。

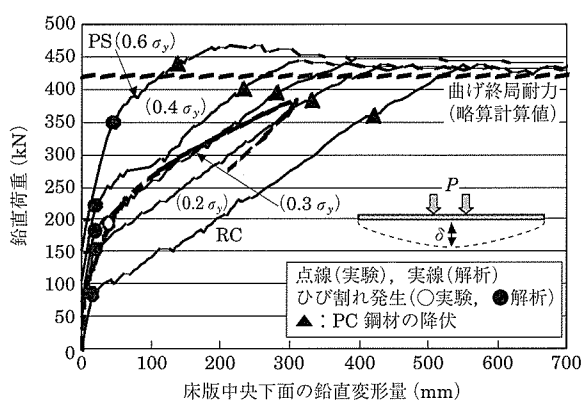


図 - 8 荷重 - 変形量関係の実験結果と解析結果の比較

4.4 使用性能評価のための振動性状確認実験

渡り廊下床版は、歩行者振動の低減を目的として、渡り廊下床版に 2 台ずつ制振装置 TMD を設置した。歩行者振動については、現場架設後の渡り廊下床版を用いて TMD 動作時と非動作時にて計測結果の比較を行った (写真 - 6)。図 - 9 に、TMD の設置位置と計測点位置を示す。TMD は、質量 30 kg の重りとコイルばね、オイルダンパーの組み合わせで、減衰比を約 10 %、最大振幅を ± 3 mm とし、渡り廊下床版の 1 次モードに同調させた。

図 - 10 と図 - 11 に、TMD 動作時、および非動作時における床版上での 2 人歩行 (1 往復) 時の加速度波形を示す。

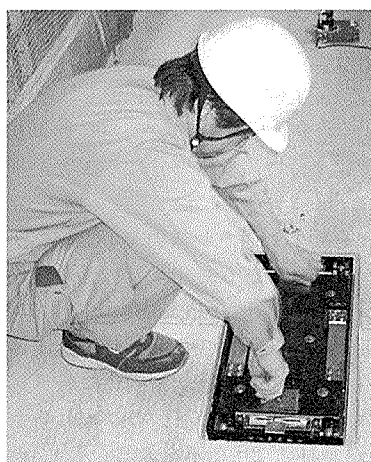


写真 - 6 制振装置の設置状況 (床版上面)

両端部を固定支持した渡り廊下床版の 1 次固有振動数は 6.5 Hz で、2 次固有振動数は 18.2 Hz であり、おおむね 1 人歩行時から 2 人歩行、1 人小走りの順で振幅が増大した。TMD 動作時の 1 次モードの加速度振幅は、非動作時と比べて、50 ~ 60 % 程度に低減した。1 次モードの減衰は、TMD 非動作時に 3.12 % であったものが、TMD 動作時には 7.99 % まで増加した。また、図 - 10 に示す TMD 非動作時の計測結果では、8 ~ 11 秒、および 18 秒以降に後揺れが発生していたが、TMD 動作時にはほとんど後揺れ現象が生じなくなった。

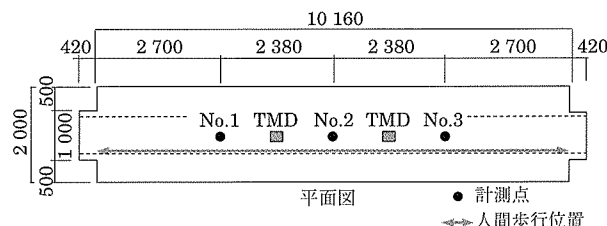


図 - 9 渡り廊下床版での振動計測点位置

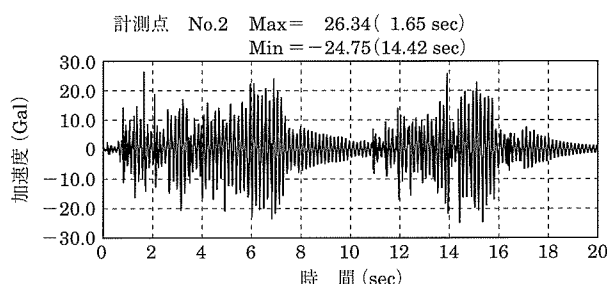


図 - 10 2 人歩行時の加速度波形 (TMD 非動作)

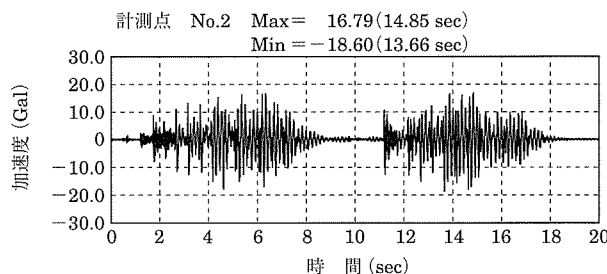


図 - 11 2 人歩行時の加速度波形 (TMD 動作)

5. 渡り廊下床版の製作・設置

渡り廊下床版は、一連の構造性能、施工性能、および歩行者振動に対する性能評価結果に基づき、PC 工場での打設施工法、打設後の養生管理などを踏まえたのち、5 体を製作し現場架設を行った。表 - 4 に、UFC の材料試験結果を示す。現場架設の渡り廊下床版は、材料特性の確認試験、および部材実験時の強度試験結果と同様に、目標強度を上回っていることを確認した。

渡り廊下床版の現場での設置は、タワークレーンを用い

表-4 現場架設された渡り廊下床版の材料試験結果

現場架設の 渡り廊下床版	圧縮強度 σ_c (N/mm ²)		曲げ強度 σ_b (N/mm ²) 蒸気養生後 材齢 18 日
	気中養生後 材齢 4 日	蒸気養生後 材齢 18 日	
目標性能	—	180	21
No. 1	92	206	35
No. 2	72	197	37
No. 3	78	198	39
No. 4	92	195	28
No. 5	92	206	35

て以下の手順で行った。

- 1) タワークレーンにて渡り廊下床版を荷取りする。
- 2) 渡り廊下床版を RC 大梁部材側面に取り付けた受け金物上部に仮設置する。
- 3) 渡り廊下床版の小口面に、鉄筋 (7 - D 19) を機械式継手で取り付ける。後付け鉄筋を周辺の床スラブ内に定着させる。
- 4) あらかじめ箱抜きされた建物本体の梁、床スラブにコンクリートを打設し、渡り廊下床版を一体化させる。写真-7 に、設置完了後の渡り廊下床版を示す。

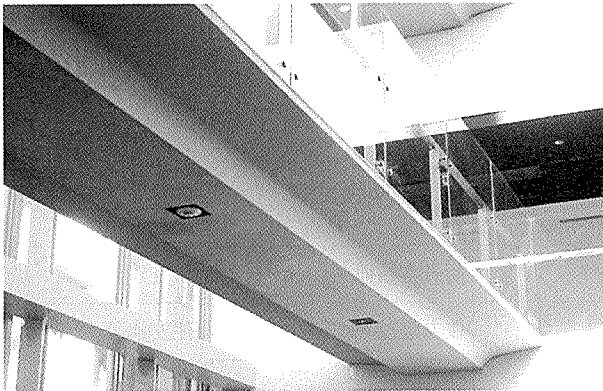


写真-7 設置完了後の渡り廊下床版

6. おわりに

本稿では、UFC を用いたプレストレスト渡り廊下床版を実現するために行った一連の性能確認実験とその設計・施工概要について述べた。

2005 年に、国内最初の UFC を用いた建築構造部材として、本設計・施工技術を用いて全長 11.3 m、横幅 2 m、部材せい 50 ~ 225 mm のプレストレスト構造形式による渡り廊下床版が架設された。

最後に、上記工事での適用に際して、ご協力いただきました関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案)，2004
- 2) 日経コンストラクション：酒田みらい橋工事 (山形県酒田市) 新素材で桁の重量を 5 分の 1 に，pp.28 - 33，2002.9.13
- 3) 森田秀喜，細野久幸，辻 英一：36m スパンを持つ渡り廊下の床振動制御，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.681 - 682，2002.8
- 4) 馬場重彰，笹井弘雄，森田 尚，野崎浩司：超高強度繊維補強コンクリートを用いたプレストレストスラブの耐火設計および施工，コンクリート工学 Vol.45，No.7，pp.38 - 45，2007.7
- 5) 日本建築学会関東支部：プレストレストコンクリート構造の設計，一構造計算のすすめ方・5 -，pp.14 - 19，1977
- 6) 日本建築学会：プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説，1998 年改訂版，1998
- 7) DIANA - Finite Element Analysis User's manual release 8.1，Building and Construction Research，Netherlands Organization for Applied Scientific Research，2003

【2007 年 10 月 1 日受付】



図書案内

PC技術規準シリーズ

複合橋設計施工規準

頒布価格：会員特価 6,000 円 (送料 500 円)

：非会員価格 6,825 円 (送料 500 円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会 編
技報堂出版