

国際線エプロンにおける GSE 橋梁について ～超高強度繊維補強コンクリートを使用した PC 橋の設計～

国際線エプロン JV 渡辺典男

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、プレキャスト桁

1. まえがき

GSE 橋梁は、図-1に示すように、南北エプロンを接続し空港連絡道路上を跨ぐ道路橋であり、本橋は、航空機の運行をサポートする車両・機材設備（GSE：Ground Support Equipment）が走行する。そのため、設計では1車両当り 50t のトーイングトラクターを連行させる。GSE 橋梁は、新材料の超高強度繊維補強コンクリート（Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete：UFC）を使用し、建築限界等の制約がある中で、経済性を追求した合理的な設計を行った。UFC の橋梁への適用は、これまで歩道橋が多く、橋長 50m規模の道路橋に対しては初の試みである。そのため、設計で仮定した内容について、検証実験を行いその性能を確認している。本稿では、従来のコンクリートと比較しながら UFC の特徴について述べた後、GSE 橋梁の設計概要について報告する。

2. GSE 橋梁の概要

GSE 橋梁の橋梁形式を定めるにあたり、以下の条件を満足させる必要があった。

- ① 港連絡道路の建築限界、② 供用期間 50 年

また、GSE 橋梁部は、図-2 に示すように橋梁本体およびそのアプローチ盛土から構成される。アプローチ盛土は軟弱地盤上にあることから、空港連絡道路等の近接構造物への影響を小さくするために、その一部に軽量盛土を採用している。軽量盛土のコストは無視できないものであり、軽量盛土量の抑制が橋梁形式選定の条件として加えた。以上より、橋梁の設計は、橋体を可能な限り建築限界に近づけつつ、桁高を低くすることが求められた。その解決方法として、本橋では上部工材料に UFC を採用した。本橋では、UFC を採用することにより以下の効果があった。

- ① UFC 橋は、一般のコンクリート橋よりも圧縮強度および引張強度が優れており、桁高を約 80%に抑制することができた。
- ② 塗装の塗り替え用の桁下空間が不要なため、橋体のレベルを低く設置でき、アプローチ部の盛り土量を低く抑えることができた。
- ③ コンクリート桁よりも部材厚を薄くすることが可能となることから、本橋ではコンクリート橋よりも上部工重量を約 60%減らすことができ、下部工規模を小さくすることができた。

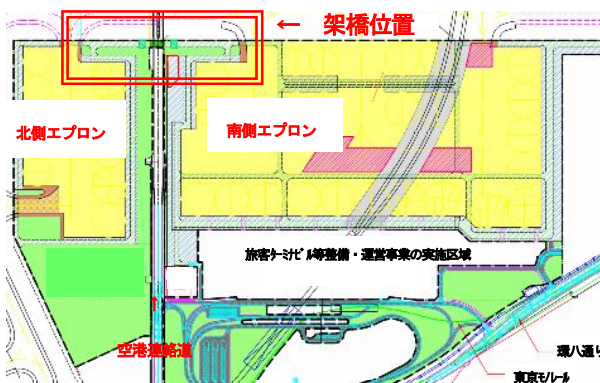


図-1 GSE 橋梁位置図

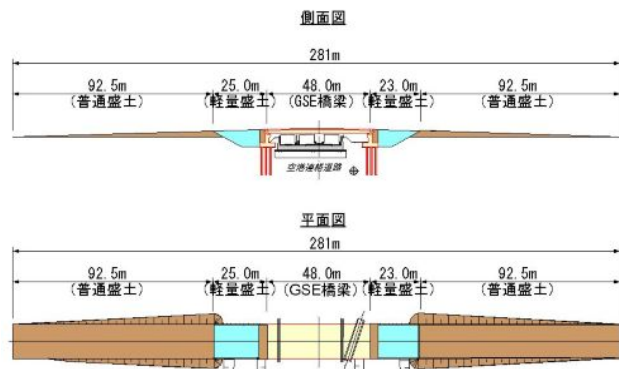


図-2 GSE 橋梁部概略図

3. 橋梁諸元

GSE 橋梁の緒元は、以下のとおりである。

- ・設計速度：40km/h
- ・構造形式：上部工 UFC 単純箱桁橋、下部工・基礎工 逆 T 式橋台、中掘り式鋼管杭
- ・橋長： $L_0 = 48.000 \text{ m}$
- ・総幅員： $B = 16.200 \text{ m}$
- ・平面線形： $R = \infty$
- ・縦断勾配：3.0 %
- ・横断勾配：2.0 %
- ・活荷重：トーイングトラクター 総重量 $W = 50\text{t}$

4. UFC の基本特性

GSE 橋梁では、UFC としてダクトルを使用している。ダクトルは、セメント、ポゾラン材等の反応性微粉末を使用した無機系複合材であり、以下の特徴を有する。表-1 に通常の高強度コンクリートと対比したダクトルの物性値を示す。

① 超高強度：圧縮強度の特性値 180N/mm^2 を有するほか、引張強度についても設計上考慮することが可能である。標準熱養生（ 90°C の給熱養生を 48 時間）により所定の強度が発現し物性値も安定するため、材令による強度管理が不要であり、収縮およびクリープも非常に小さい。

② 高耐久性：水セメント比を水和反応限界付近まで低くしており（0.24 以下）、生成物中の空隙を極限まで抑えた最密充填により組織は高緻密である。表-1 に示すようにダクトルの物質移動に関する抵抗性は極めて高く、透水係数および塩化物イオンの拡散係数は、通常の高強度コンクリートの 1/106 および 1/300 程度である。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）（以下、UFC 指針）」¹⁾ では「特別の補修・補強を行うことなく 100 年以上使用することが期待できる」としている。

鋼材位置（かぶり 20mm）における塩化物イオン濃度の経年変化の試算結果を図-3 に示す¹⁾。同図から、特に厳しい腐食環境として飛沫帯（表面塩化物イオン濃度 13kg/m^3 ）を想定し、腐食発生限界濃度を 1.2kg/m^3 と仮定した場合、鋼材が腐食するのは供用後 300 年以降であることがわかる。

③ 高じん性：高強度鋼繊維（直径 0.2mm、長さ 15mm）を容積比で 2% 配合するため、高いじん性を有し、鉄筋は不要である。

④ 高流動：練り上がりのモルタルフロー値は 200~300mm 程度と高い流動性を有し、締固め不要である。

表-1 UFC の物性値

項目	単位	UFC ^(※1)	通常の高強度コンクリート（例）
圧縮強度 ^(※2)	N/mm^2	180	40
引張強度 ^(※2)	N/mm^2	8.8	2.7
ひび割れ発生強度 ^(※2)	N/mm^2	8.0	1.2
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}	10^{-10}
塩化物イオン拡散係数	$\text{cm}^2/\text{年}$	0.002	0.700

(※1) 標準養生後
(※2) 特性値

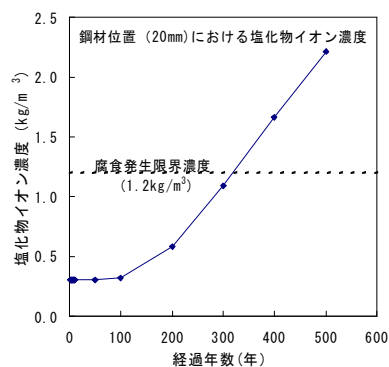


図-3 塩化物イオンの経年変化

5. UFC を用いた GSE 橋梁の設計

5-1 設計方針

上部構造は、図-4 に示すように、幅員 15.9m に対して 3 主箱桁構造を採用した。箱桁の断面構成は、上床版に一般の PC 床版を採用し、ウェブ及び下床版からなる U 型断面に UFC 桁を採用した。UFC 桁は、熱養生が標準であり設備が整った工場製作となるため、その構造はプレキャスト構造となる。プレキャスト桁の大きさは、工場内での揚重設備の能力を勘案し、1 ピースが 10t 前後になるように定めた。本橋では桁長 47.6m の主桁 1 本当たり 7 ピースに分割した（写真-1 参照）。

設計方法は、UFC 指針に則り限界状態設計法により設計をした。すなわち、使用限界状態および終局限界状態を設定して外的作用力に対して構造物の応力度および断面力が応力度の制限値および断面耐力以下であることを確認した。

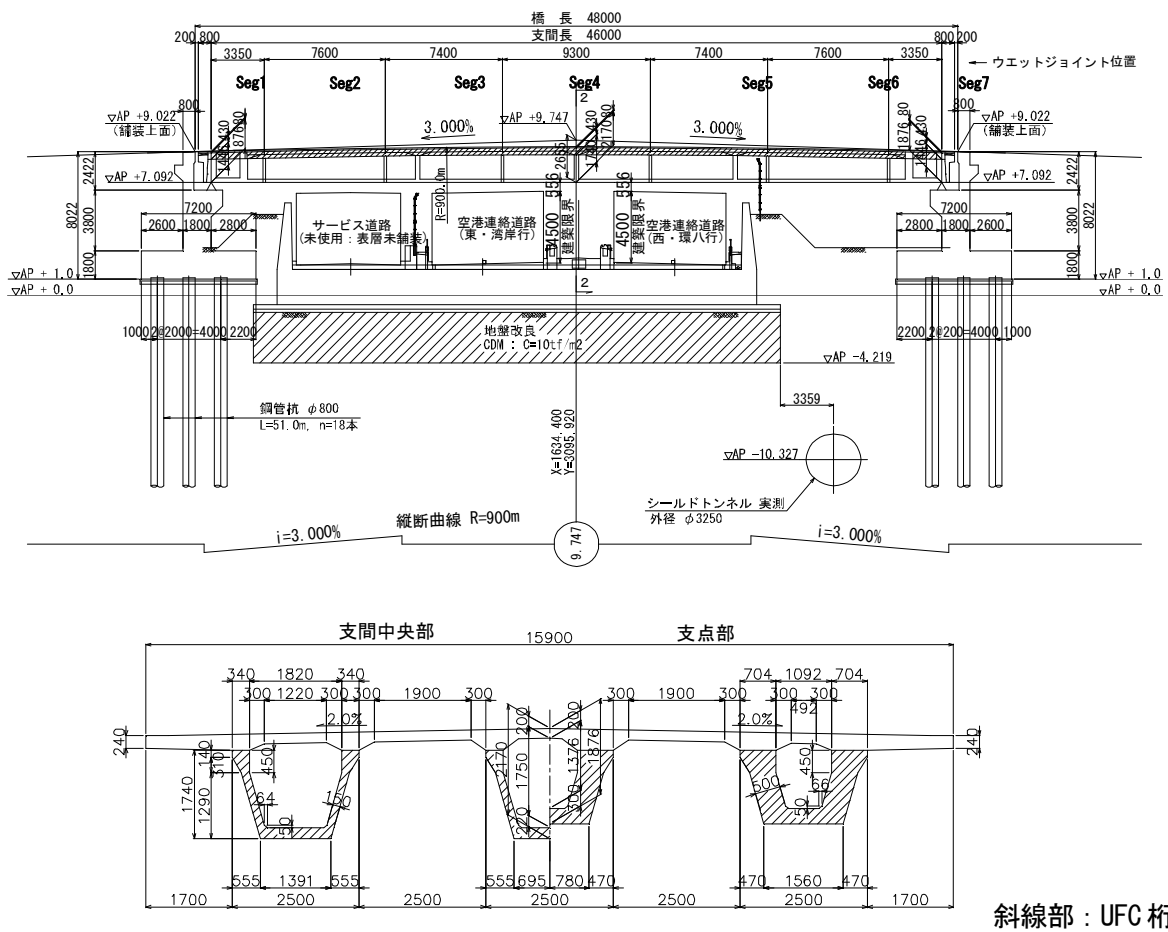


図-4 GSE 橋梁構造一般図



写真-1 UFC プレキャスト桁

5-2 UFC 桁の設計

本橋は、終局限界状態よりも使用限界状態の方が厳しいため後者の結果を示す。使用限界状態における曲げ・軸力に対する検討、せん断力に対する検討は、UFC 指針に則り実施した。すなわち作用断面力と部材剛性から算出された応力度が制限値以下であることを確認した。主方向の PC 鋼材は、図-5 に示すように、1 桁あたり SWPR7B 22S15.2 を 6 本配置している。図-6 に UFC 桁の上下縁応力について、使用限界状態における最大・最小曲げ応力度分布図を示す。引張応力度の制限値は、一般部は -8.0N/mm^2 、セグメント継ぎ目部はフルプレストレストである。断面及び PC 鋼材量は、支間中央に最も近い継ぎ目部で決定されている。

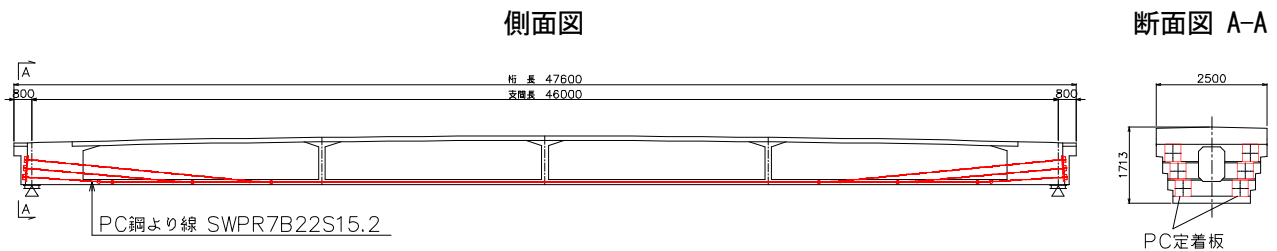


図-5 主方向 PC 鋼材配置図

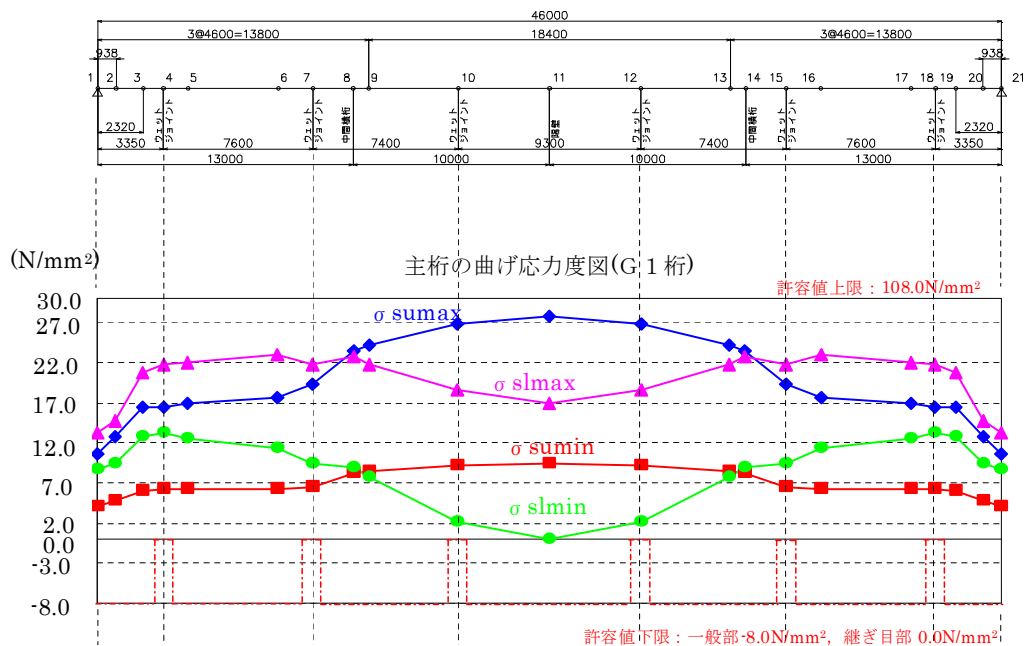


図-6 UFC 桁応力度分布図

5-3 床版と UFC 桁のずれ止めの設計

UFC 桁と PC 床版との接続構造には、実績²⁾³⁾があり、ずれ止めとして一般的に使用されるスタッドジベルよりも応力伝達力が大きい孔開き鋼板ジベル (PBL) を採用した。本橋の PBL は、図-7 のように水平せん断力の伝達の外、張出し床版が長いので、橋軸直角方向の首振りモーメントによる鉛直方向の引抜力に対しても抵抗しなければならない。そのため、本橋では PBL を 2 列に配置した構造を採用した。PBL の UFC への適用は、これまで水平せん断力に対して実験を行いその性能を確認してきたが、首振りモーメントに対する適用は初めての試みである。設計では、水平せん断力と同様な耐力があるものと仮定して設計を行った。本件については、別途、性能確認実験を行い設計上の耐力が確保されていることを確認している。

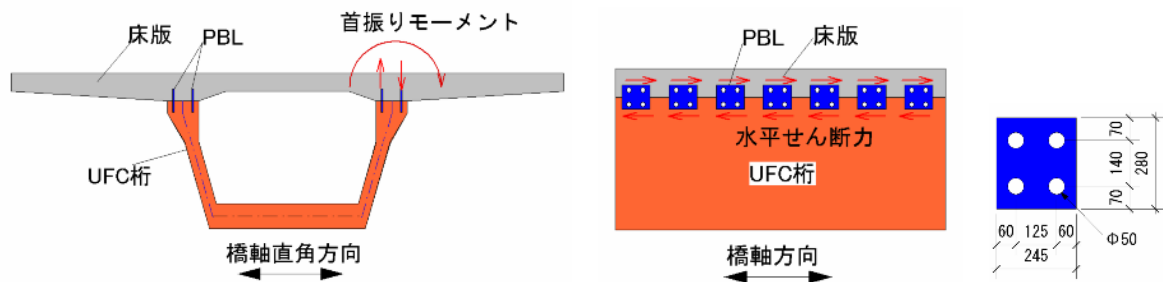


図-7 孔あき鋼板ジベル (PBL) 概要図

5-4 ウェットジョイントの設計

プレキャスト桁間のジョイントは、図-8に示すようにウェットジョイントを採用している。ウェットジョイント部のUFCの強度は、①PC緊張時に必要な強度を確保し、②完成系において脆性的な破壊をしないように曲げ耐力以上にせん断耐力の安全率を確保することを前提として算出し、設計基準強度を120N/mm²とした。ジョイント幅は、プレキャスト桁間で内ケーブルのシースを接続する必要があることから施工性を鑑みて15cmとした。

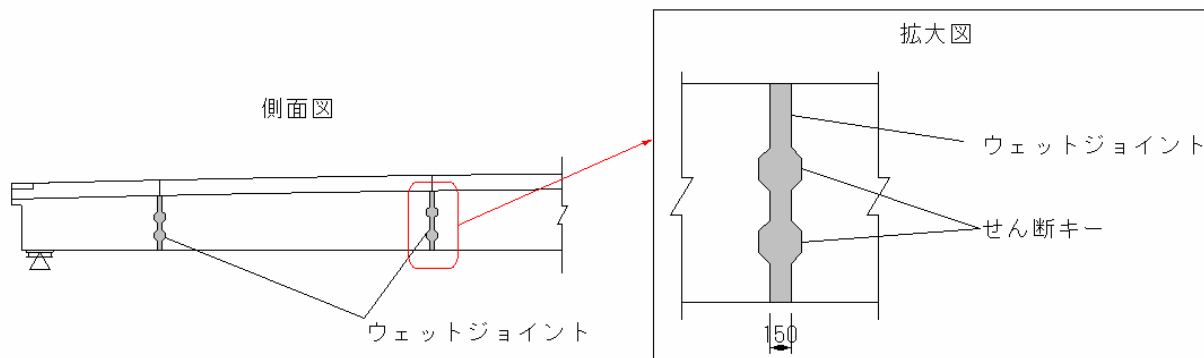


図-8 ウェットジョイント概要図

ウェットジョイント間のせん断耐力は、UFC 指針の棒部材の設計せん断耐力と、コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕より継ぎ目部のせん断伝達耐力(式1)の内、小さいほうを用いる。設計では、面形状を問わず係数 β についてはこれまでの実績から、 $\beta = 0.4$ と仮定して設計を実施し、性能確認実験によりその妥当性を検証している。

$$V_{yd} = V_{cwd} + V_{ped} \quad (\text{式1})$$

ここに、

V_{cwd} : 設計せん断伝達耐力

$$V_{cwd} = (\tau_c \cdot A_{cc} + V_k) / \gamma_b$$

$$\tau_c = \mu \cdot f_{cd}^\beta \cdot \sigma_{nd}^{1-\beta}$$

$$\sigma_{nd} = - (1/2) P_c / A_{cc}$$

σ_{nd} : せん断面に垂直に作用する平均圧縮応力度

A_{cc} : せん断面の圧縮側面積

β : 面形状を問わず係数 (0.4)

μ : 固体接触にかかる平均摩擦係数 (0.45)

V_k : せん断キーによるせん断耐力

$$V_k = 0.1 \cdot A_k \cdot f_{cd}$$

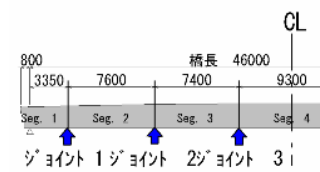
A_k	:	せん断キーのせん断面における圧縮側部分の断面積
f_{cd}	:	コンクリートの設計圧縮強度
V_{ped}	:	軸方向緊張材の有効引張力のせん断力に平行な成分
γ_b	:	部材係数=1.3

表-2に継ぎ目部の耐力結果を示す。継ぎ目部は、せん断力に対して十分な安全性があることが確認された。

表-2 継ぎ目部のせん断耐力照査の結果

			単位	ジョイント1	ジョイント2	ジョイント3
G1桁	設計せん断力	V_d	kN	3,040	1,808	1,230
	設計せん断伝達耐力	V_{yd}	kN	6,204	4,730	3,136
	照査	$g_i \cdot V_d / V_{yd} \leq 1.0$		0.59	0.46	0.47
G2桁	設計せん断力	V_d	kN	2,900	1,761	1,098
	設計せん断伝達耐力	V_{yd}	kN	5,851	4,801	3,457
	照査	$g_i \cdot V_d / V_{yd} \leq 1.0$		0.60	0.44	0.38

位置図



* γ_i : 構造物係数=1.2

6. おわりに

以上、GSE 橋梁の設計と性能確認実験について報告した。本橋には、超強度繊維補強コンクリート (UFC) という新しい技術が導入された。UFC を用いることにより、桁高を小さくして桁下に建築限界がある中で、アプローチ盛土量を抑制し下部工を縮小化することでコストの低減に寄与することができた。また、UFC の使用は、橋梁本体の耐久性の向上にも繋がった。

本橋の設計では、床版と UFC 桁の接続部と UFC 桁間のウェットジョイント部について、性能確認実験を行い、設計で想定した性能があることを確認している。この結果については、機会を改めて報告する。

最後に、本橋の設計にあたり貴重なご意見を頂いた有識者委員会の各委員を始め、ご各関係各位に対して紙面を借りて御礼を申し上げます。

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), 平成 16 年 9 月
- 2) 細谷, 今井, 安部, 信夫「超高強度繊維補強コンクリートを使用した橋梁～赤倉温泉ゆけむり橋の施工」, 橋梁と基礎, 2004 年 12 月号
- 3) 黒岩, 岩崎, 大熊「超高強度繊維補強コンクリートを用いた国内初の道路橋～東九州自動車道堀越 G ランプ橋」, コンクリート工学, Vol. 43 No. 10