

報告 東京国際空港 GSE 橋梁 桁間ジョイントの実験

武者 浩透^{*1}・渡辺 典男^{*2}・竹田 康雄^{*3}・松川 文彦^{*4}

要旨：東京国際空港 GSE 橋梁は、東京国際空港再拡張事業で建設される道路橋であり、その桁部には超高強度繊維補強コンクリート（UFC）が採用されている。この橋はプレキャストブロック工法で架設されるが、桁の接続方法には、ウェットジョイントと呼ばれる桁間の隙間に UFC を場所打ちする方法が用いられている。本実験では、その接続部のせん断力伝達性能を確認するため、せん断キー部の要素実験を行って、せん断伝達力のプレストレスによる摩擦の負担分と、せん断キーの負担分を把握した。その結果、この接続方法が優れたせん断伝達性能を有しており、十分に安全側の設計がなされていることを確認した。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート、せん断実験、プレキャスト、プレストレス、道路橋

1. はじめに

東京国際空港 GSE 橋梁（以下 GSE 橋）は、国際線エプロン整備事業で建設される GSE 通行のための橋梁である。GSE とは Ground Support Equipment の略称で、空港の地上業務や航空機への支援業務に使用される機材のことをいう。本橋は国際線の北側と南側のエプロンを繋ぐため空港連絡道路の上空に架設される。

本橋の床版部には従来の場所打ちコンクリートが用いられているが、プレキャストブロックで架設される U 型形状の桁には超高強度繊維補強コンクリート（Ultra high strength Fiber reinforced Concrete : UFC）を用いた桁が採用されている（図-2）。本橋では、その UFC 桁の採用により、総質量 50 t ものトーイングトラクターを連行荷重として考慮し、かつ 46.0m の支間長（図-1）を確保しながら、端部桁高を 1.86m と桁高スパン比を H/L=1/25 に抑えてアプローチ部の土工量を削減するとともに、維持管理の負荷が少ない高耐久な橋を実現している。

この GSE 橋の設計は、土木学会コンクリートライブラリー113：超高強度繊維補強コンクリート設計・施工指針(案)¹⁾（以下、UFC 指針）に基づいて行われている。

しかしながら、UFC 指針では桁間ジョイント部のせん断伝達耐力の算定方法においては、GSE 橋に比べて比較的小さな橋を前提とした実験により、その係数等が設定されているため、GSE 橋の設計に際して、その設計手法の妥当性と、桁間ジョイント部のせん断伝達耐力を確認するために、要素実験が実施された。

本稿では、GSE 橋の構造概要、桁間ジョイント部の構造とその要素実験について報告する。

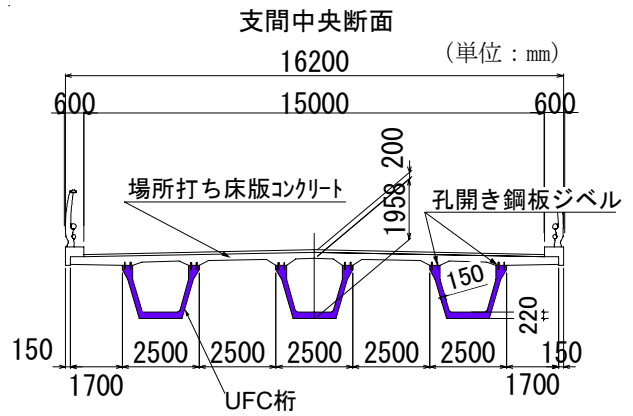


図-2 GSE 橋 断面図

側面図（道路中心）

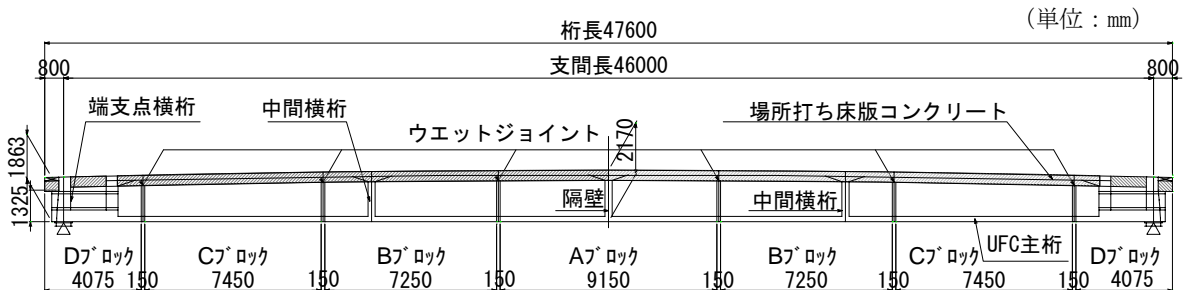


図-1 GSE 橋 側面図

*1 大成建設（株）技術センター 土木技術開発部 土木技術開発プロジェクト室 課長 工修（正会員）

*2 大成建設（株）土木設計部 橋梁設計室 課長 工修（正会員）

*3 関東地方整備局 東京空港整備事務所 PFI 事業推進室長

*4 関東地方整備局 東京空港整備事務所 副所長

2. GSE橋の構造概要

GSE橋は、橋長48.0mのポストテンションUFC単純合成3室箱桁橋であり、支間長は46.0mである。断面構成は、U型形状のUFCプレキャスト桁($f'_{ck}=180\text{N/mm}^2$)と場所打ちのコンクリート床版($f'_{ck}=40\text{N/mm}^2$)を孔開き鋼板ジベル(以下PBL)で結合している(図-2、写真-1)。このPBLによる結合方式は、鋼桁とコンクリート床版といった鋼とコンクリートとの部材の合成に用いられるのが通常であるが、UFC橋においてはコンクリート同士であるUFC桁と床版との結合構造として開発され、歩道橋^{3,4)}や道路橋⁵⁾に採用されている。UFCのプレキャスト桁は、現場への運搬を考慮して断面の幅を2.5m、長さを10m以下とし、かつ重量を25t以下に抑えて7分割されている(図-1)。UFC桁は、架設地点の支保工上に架設された後、ウェットジョイントと呼ばれるUFCの場所打ちにより桁間ジョイント部が間詰め充填され、プレストレスの導入により橋体が一体化される。

3. 桁間ジョイント(ウェットジョイント)

3.1 ウェットジョイント構造

UFC橋のウェットジョイント構造は、プレキャスト桁側にせん断キーの凹型の窪みを設け(写真-1、図-3)、UFCの場所打ち部側を凸形のせん断キー形状になるようにし、プレストレスによって生じる圧縮力による部材の摩擦と、せん断キーによってせん断力を伝達する構造である。このように、ウェットジョイントを用いて桁を接続して行く方式はUFC橋特有であり、酒田みらい橋²⁾を初めとして数橋^{3,4,6)}に採用されている。



写真-1 UFCプレキャスト桁

3.2 ウェットジョイント開発の背景

プレキャストセグメント方式で架設される橋梁は、マッチキャスト方式等によって端面精度を確保し、桁同士を接続する方法が一般的である。その際には、桁端面にエポキシ系の接着剤を用いる場合が多いが、これはセグメント継目の水密性を確保する目的の他に、端面の微妙

な不陸を調整して端面の応力集中を緩和している機能も果たしていると考えられる。そのため、用いられている接着剤の圧縮強度は桁本体と同等以上のものが用いられることが多い。

これに対してUFC橋では、UFCがセメント等の反応性微粉末を多量に含む材料であり、桁製造時の自己収縮量が 800μ 程度と大きく、プレキャスト桁端面精度の確保には課題があった。また、UFCの持つ 180N/mm^2 と非常に高い圧縮強度に相当する接着剤がなく、軸方向に高い圧縮力を生ずるUFC橋梁においては、端面の応力集中の懸念があったため、従来の方法に代わるUFC橋梁用の桁接合方法として、ウェットジョイント方式が開発された。

なお、近年ではUFC部材の製作方法の開発が進み、端面精度を確保した部材の製作が可能となったため、断面が小さくない場合や、軸方向の圧縮応力度がさほど高くない場合等に、接着剤を用いてUFC桁を直接接合する事例^{4,6)}が出てきている。

3.3 ウェットジョイントの特徴

図-3にウェットジョイントの詳細図の例として、GSE橋での寸法図を示す。

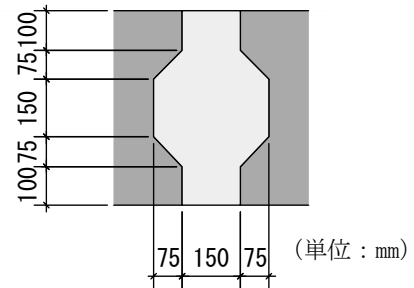


図-3 GSE橋 ウェットジョイント寸法図

ウェットジョイントは、ある程度離して設置されたプレキャスト桁間にUFCを場所打ちするため、隣接する桁端面相互の面精度は必要としない。そのため、桁製作時にはマッチキャスト等の端面精度保持の対策を必要としないため、桁を配置順に製作する必要がなく、生産効率を考慮して、任意の桁から製作が可能となる。また、高流動であり粗骨材を含まないUFCは、その充填性が極めて高いため、ジョイント部の応力集中は少ないと判断される。さらには、ウェットジョイントで橋全体の線形の調整が容易である。このような利点を持つウェットジョイント方式であるが、ウェットジョイント部に場所打ちされたUFCの現場養生が必要となり、冬季などではその養生時間が長くなるなど、架設現場での作業量が増える課題も有する。

ウェットジョイントは、桁間のUFC場所打ちであるため、通常のコンクリートでは桁端の打継ぎ面処理を行うところであるが、UFC部材においては、打継ぎ面処理

等を行うと無数の鋼繊維が露出し、新たに打設される UFC の鋼繊維が絡み合うため充填性の弊害となることや、鋼繊維の配向性に影響がでることが懸念される。そのため UFC 部材では、従来のコンクリートの打継ぎ面に行うような処理は行わないのが通常である。

3.4 ウェットジョイント部の照査方法

ウェットジョイント構造の照査方法としては、UFC 指針の「参考資料 8：UFC を用いた構造物の設計例」に示されている。ブロック継目としての設計せん断伝達耐力 V_{yd} の算定式を以下に示す。

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

ここに、

V_{cwd} : 設計せん断伝達耐力

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

$$\tau_c = \mu \cdot f'_{cd} \cdot \beta \cdot \sigma_{nd}^{1-\beta}$$

$$\sigma_{nd} = (1/2) P'_c / A_{cc}$$

σ_{nd} : せん断面に垂直に作用する平均圧縮応力

P'_c : 部材の圧縮側断面に作用する軸方向力

A_{cc} : せん断面の圧縮側面積

β : 面形状を表す係数

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

$$V_k = 0.1 \cdot A_k \cdot f'_{cd}$$

γ_b : 部材係数

A_k : せん断キーのせん断面上における圧縮側部分の断面積

f'_{cd} : コンクリート (ウェットジョイント部) 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

3.5 面形状を表す係数 β の設定

このせん断伝達耐力算定式における、摩擦の分担分 $\tau_c \cdot A_{cc}$ の算定においては、面形状を表す係数 β の値を、せん断面の状態に合わせて適切に選択する必要がある。特に部材厚が薄いためせん断面に垂直に作用する平均圧縮応力度 σ_{nd} の値が、 $\sigma_{nd} = 10 \sim 30 \text{N/mm}^2$ 程度と非常に高い UFC 橋においては、せん断伝達力における摩擦の分担分が大きく、この β 値の設定はせん断伝達耐力を算定する上では大変重要となる。

コンクリート標準示方書 (構造性能照査編 : 以下、標準示方書) の「6.3.7 設計せん断伝達耐力」では、この β 値 (この章では、記号に β ではなく b を用いている) は、粗度の効果を表す係数とし、普通強度のコンクリートのひび割れ面では 2/3 を、打継面 (処理あり) あるいはブ

レキャスト部材の継目に接着剤を用いた場合の継目面では 1/2 を、打継面処理を省いた場合は 2/5 を用いてよいと示されている。

UFC 指針の参考資料 8 に示されている設計例では、酒田みらい橋²⁾ をモデルとして実施した要素実験の結果 (参考資料 5)¹⁾ を用いて、面形状を表す係数 β を 0.4 と設定している。これは、標準示方書の「打継面処理を省いた場合は 2/5」に因らずも一致した値となっている。また、せん断キーの分担する V_k についても、その要素実験結果により妥当性の検証を行っている。

しかしながら、設計例のモデルとなった酒田みらい橋と GSE 橋では多くの相異点がある。

表-1 UFC 橋 構造比較

	酒田みらい橋	羽田空港GSE橋梁	
構造形式	単純1室箱桁橋 (全外ケーブル方式)	単純合成3室箱桁橋 (内ケーブル方式)	
UFC材料	UFC指針における標準配合粉体		
橋種	歩道橋	道路橋	
支間長	49.35m	46.00m	
総幅員	2.4m	16.2m	
桁高	0.55~1.56m	1.83~2.17m	
荷重	群集荷重	B活荷重 トインクトラクター荷重 (総質量50tの連行荷重)	
ウェブ厚	80mm	150~220mm	
せん断キー形状	15mm×60mm	75mm×300mm	
桁端面の平滑度(粗度)	平滑	粗面仕上げ	
ウェット ジョイント 部	幅	30mm	150mm
	圧縮強度	180N/mm ²	120N/mm ²
	プレストレスによる 圧縮応力度	30N/mm ²	10N/mm ²

GSE 橋におけるウェットジョイントの、酒田みらい橋との相異点を表-1 にまとめ、以下に説明する。

- ・支間長はほぼ同等である両橋であるが、GSE 橋は 50 t 車両の連行荷重を想定しており、また、内ケーブル方式の採用によりウェブ内にケーブルシースの配置スペースが必要であることから、ウェブ厚が 150~220mm と大きくなっている。
- ・内ケーブル方式の採用により、桁間でシースをジョイントする必要性があり、その作業スペースを確保するため、ウェットジョイントの幅も 150mm と大きく設定し、その結果せん断キー形状も大型となった。
- ・せん断伝達耐力の向上を図るため、鋼製型枠により非常に平滑であった桁端面を、型枠に加工を加え、桁端面をわずかに粗面に仕上げた。
- ・常温下で長期的には 160N/mm² 程度まで強度増進するポテンシャルを持っている UFC ではあるが、施工途中で強度管理を行うウェットジョイントにおいては、諸条件を踏まえてその設計強度を設定する必要がある。夏季の猛暑時期に施工され、理想的な養生が行われた

酒田みらい橋のウェットジョイントに対して、それ以降に建設されたUFC橋では、設計における必要強度と施工条件を加味して、ウェットジョイントの圧縮強度が設定されている。冬季に施工が予定されているGSE橋では、ウェットジョイントの圧縮強度を $120\text{N}/\text{mm}^2$ と設定した。

- ・部材厚と設計プレストレスの関係により、ジョイント部の圧縮応力度は、酒田みらい橋の $1/3$ の $10\text{N}/\text{mm}^2$ となった。

UFC指針の設計例におけるせん断伝達耐力の算定には、以上に示したように、酒田みらい橋での条件に基づいて実施された要素実験により β 値を 0.4 としているが、GSE橋とは相違点が多いため、GSE橋梁の設計においてこの算定式および β 値の 0.4 を用いるに際して、改めて要素実験により、その適用の妥当性の確認を行った。

4. ウェットジョイント要素実験

4.1 実験の目的

本実験は、GSE橋でのUFC桁間ウェットジョイント部の設計において、UFC指針の設計例で示されている面形状を表す係数 β 値 0.4 と、せん断伝達耐力算定式の適用についての妥当性の検証を目的としている。そのため、2タイプの試験体を用意し、以下の項目の確認を行った。

表-2 試験体タイプおよび確認項目

試験体タイプ1:せん断キー無し	
確認項目	面形状をあらわす係数 β 値が 0.4 以上であること
	ジョイント面でのすべりの有無
	ひび割れ状況、耐力および破壊状況
試験体タイプ2:せん断キー有り	
確認項目	せん断キーによる耐力増分
	ひび割れ状況、および破壊状況

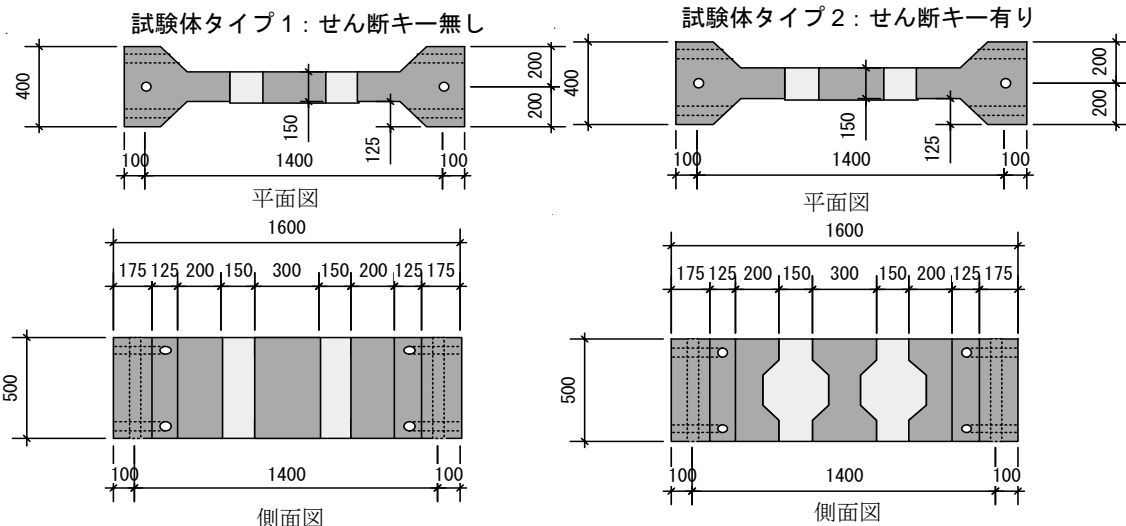


図-4 ウェットジョイント要素試験体

(単位: mm)

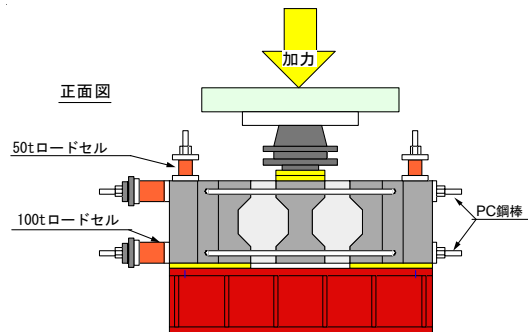
4.2 試験体

試験体形状を図-4に示す。ウェットジョイントのせん断実験は、左右対称の2面せん断として载荷を行った(図-5)。試験体の各寸法はGSE橋梁の実寸法(表-1)により設定し、部材厚およびウェットジョイント幅は 15cm である。また、プレストレスによってGSE橋梁のウェットジョイント部に生じる圧縮応力は $10\text{N}/\text{mm}^2$ であるため、試験体においてもPC鋼棒により同等の圧縮力を導入した。なお、この圧縮力は载荷過程で変化するが、 β 値の算定には载荷時に計測された圧縮力を用いた。ウェットジョイント部のUFC強度についても、GSE橋と同様の $120\text{N}/\text{mm}^2$ を設定強度とした。

今回はウェットジョイント部のせん断特性を把握することが目的であることから、桁側の部材下面全面には鋼板を設置して、桁側部のせん断クラック発生を抑制した。また、ジョイント部へ圧縮力を与えるためのPC鋼棒が、試験結果へ影響を与えることを排除するため、PC鋼棒はジョイントを通過させずに、側面へ設置した。

さらに表-1に示すように、GSE橋においては、せん断伝達耐力の向上のため桁端面の粗度を上げるように仕上げているため、両試験体においても同様の仕上げを施した。

図-5 载荷状況 概要図



試験体は、ばらつきを評価するために3体準備し、全くの同一条件で実験を行った。表-3に試験体の各強度を、写真-2に荷重状況写真を示す。

なお、ウェットジョイント部は、その圧縮強度の目標強度を 120N/mm^2 とし、その強度が確認された段階で 40°C の熱養生を停止したが、UFC 自体が常温下で 160N/mm^2 程度まで強度増進するポテンシャルを持っているため、荷重実験までの約 10 日間に上記に示すように、約 140N/mm^2 まで強度の増進が確認された。

4.3 実験結果

要素実験の荷重-変位図（桁部とウェットジョイント部の相対変位）を、せん断キー無しとせん断キー有りの各タイプ3体分を図-6 および図-8 に、最大荷重時のクラック図を図-7 および図-9 に示す。この荷重-変位関係および実験結果から確認された事項を以下に示す。

(1) タイプ1：せん断キー無し

試験体3体に荷重-変位関係に大きなばらつきはなく、ジョイント面のずれはごくわずかであり、実験結果より β 値を逆算したところ、3体とも係数 $\beta=0.4$ を大きく上回る $\beta=0.7$ 以上の数値を示している。最終荷重の平均値は $2,813\text{kN}$ であり、最後までジョイント面のすべりは生じることなく、最大変位は 0.2mm 以下であった。破壊形態はウェットジョイント部にせん断クラックが生じるせん断破壊であるが、そのクラック幅は鋼繊維の架橋効果によって抑制され、 $0.06\sim 0.1\text{mm}$ といった微細なものであった（図-7）。試験体の状態からは、荷重の継続が可能と思われたが、 $3,000\text{kN}$ もの大荷重で脆性的なせん断破壊した場合の危険性を考慮して、せん断クラック数が増加した時点で荷重を終了とした。

(2) タイプ2：せん断キー有り

平均最終荷重は $4,164\text{kN}$ であり、せん断キー無しに比べて約 $1,350\text{kN}$ （45%以上）の耐力増加が確認された。荷重-変位の勾配に若干の差が確認されたが、これは、せん断キーの形状により、荷重によってジョイントを押し広げる方向に力が作用する点と、せん断キーの角部に応力集中し、せん断キー内部のひずみ分布に差が生じている点などが考えられるが、最大の変位量でも 0.6mm 以下とわずかであり、各試験体の変位量としては、数十 μm でしかないため、ばらつきとしては少ないものと判断される。荷重が $1,000\sim 4,000\text{kN}$ の段階では、せん断キーの隅角部から、わずかに数本のクラックが発生したに過ぎず、主なクラック発生は最終荷重付近であった（図-9）。最終破壊形態は、せん断キーの上側隅角部と下側隅角部から発生したクラックが、連結する形でせん断破壊であった。今回もせん断キー無しの実験と同様に、大荷重で脆性的なせん断破壊した場合の危険性を考慮し、

せん断クラック幅が増大し始めたところで荷重を終了した。

表-3 試験体強度

試験体	部位	圧縮強度 N/mm^2	ひび割れ発生強度 N/mm^2	ヤング係数 10^4kN/mm^2
タイプ1 せん断キー無し	桁部	207	10.0	5.3
	WJ部*1	145	5.2*2	5.1
タイプ2 せん断キー有り	桁部	200	9.2	5.3
	WJ部*1	141	7.1*2	5.0

*1:ウェットジョイント部
*2:養生終了時強度



写真-2 せん断実験 荷重状況

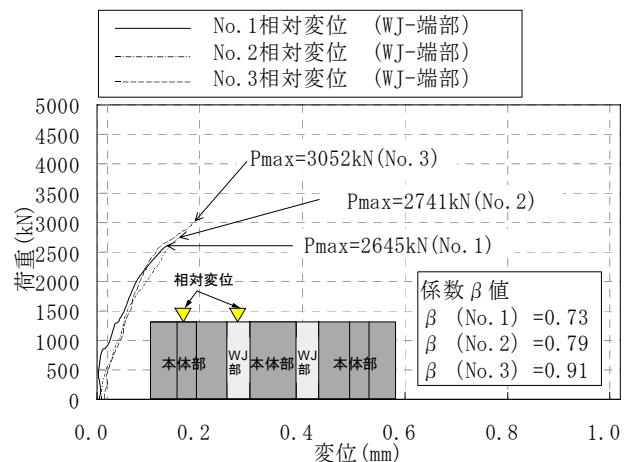


図-6 荷重-変位関係（せん断キー無し）

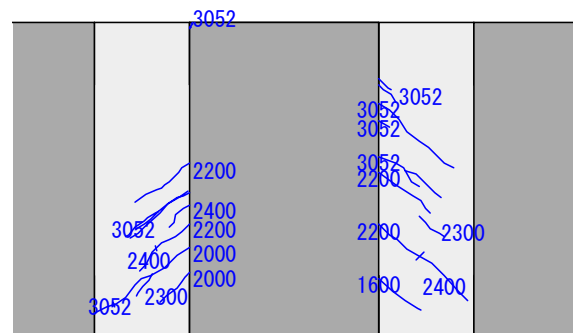


図-7 クラック図（せん断キー無し：No.3）

*1: 数値はクラック確認時の荷重荷重 (kN)
*2: クラック幅は全て $0.06\sim 0.1\text{mm}$ の範囲

(3) 結果の考察

せん断キー無しのケースにおいて、UFC 指針の参考資料や既往の実験結果に比べて、 β 値が大きく増大した理由は、前述のように β 値は接続面の粗度の効果を表す係数であるため、GSE 橋において桁端面の粗度を上げるように仕上げた効果によるところが多いものと判断される。粗度を上げた桁端面に、充填性の極めて高い UFC を後打ちした場合、高圧縮応力下で摩擦力が大きくなることは、緻密で超高強度の UFC の特性を考えれば、想像に難くない。さらには、鋼繊維の補強効果により、せん断によって生じるクラック幅も抑制されるため、その摩擦力が維持されたものと考えられる。これらの点からは、今回の GSE 橋での β 値は、標準示方書で示すところの「打継面処理を省いた場合は 2/5」でなく、ひび割れ面の UFC の微細な骨材のかみ合わせ効果を期待した「コンクリートのひび割れ面では 2/3」の状態に近いのではないかと考える。

せん断キー有りのケースでは、最終荷重付近までひび割れの発生は非常に少なかった。これは、せん断キーの形状により、図-10 に示すような圧縮斜材が超高強度の UFC で形成されたことによると考えられる。そして、圧縮斜材がせん断破壊することによって、このウェットジョイント構造が最終破壊に至っており、今回の3試験体のみならず、UFC 指針および既往の実験例⁷⁾においても、今回と同様の破壊状態(図-11)を示している。

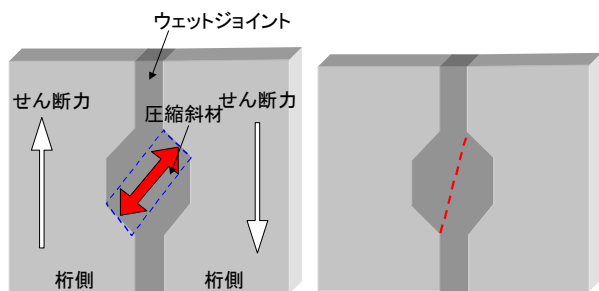


図-10 圧縮斜材イメージ図 図-11 最終破壊クラック位置

5. まとめ

今回の要素実験により、GSE 橋の設計において、UFC 指針の設計例で用いられている、桁間ジョイント部のせん断伝達耐力算定式における面形状を表す係数 β 値 0.4 の適用の妥当性が確認された。また、東京国際空港 GSE 橋のウェットジョイント構造は、GSE 車両等の大きな荷重でも十分なせん断伝達耐力を有し、UFC 指針に準ずることにより十分に安全側の設計が可能であることが分かった。

謝辞：本実験の実施に際して、ご指導・ご意見を頂きました東京大学の前川宏一教授に深く感謝いたします。

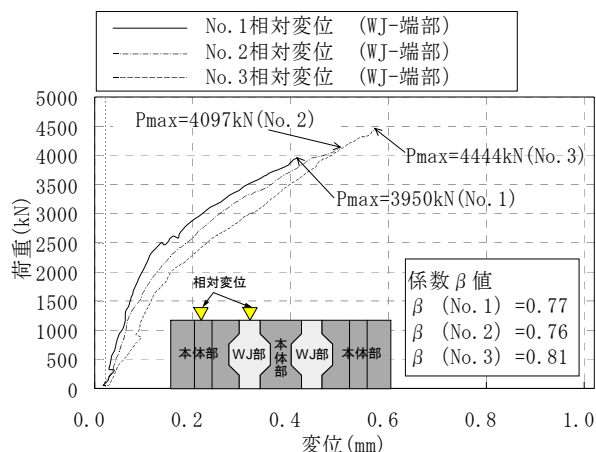


図-8 荷重-変位関係(せん断キー有り)

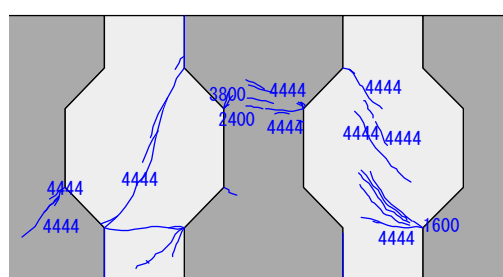


図-9 クラック図(せん断キー有り: No.3)

* : 数値はクラック確認時の載荷荷重 (kN)

参考文献

- 1) 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)，コンクリートライブラリー第113号，2004
- 2) 武者浩透，大竹明朗，児玉明彦，小林忠司：超高強度繊維補強コンクリート「ダクトル」を用いた PC 橋梁の設計・施工—酒田みらい橋—，プレストレストコンクリート，Vol.45, No.2, pp40-48, 2003.3
- 3) 細谷学，武者浩透，安部吉広，信夫榮：「赤倉温泉ゆけむり橋」の施工-超高強度繊維補強コンクリートを使用した PC 歩道橋-，プレストレストコンクリート，Vol.46, No.3, pp16-23, 2004.5
- 4) 武者浩透，大島邦明，細谷学，稲原英彦：UFC を用いた PC 歩道橋の事例とその特徴，プレストレストコンクリート，Vol.49, pp48-45No.6, 2007.11
- 5) 黒岩正，西川孝一，岩崎郁夫，大熊光：超高強度繊維補強コンクリートを用いた道路橋の開発～北九州 JCT 堀越 C ランプ橋～，橋梁と基礎，Vol.41, pp23-29, 2007.4
- 6) 田中良弘ほか：超高強度繊維補強コンクリートを適用した長大スパン・モノレール桁の技術開発，コンクリート工学，Vol.45, pp27-34, 2007.11
- 7) 平陽兵ほか：超高強度繊維補強コンクリートを用いたプレキャスト部材間のせん断伝達力，第16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論文集，pp359-362, 2007.10