

# GFRP ロッドを用いた超高耐久壁高欄の開発

## Development of Ultra-high Durable Precast Bridge Barrier Reinforced with GFRP Rods

第一構造技術部	狩野 武	TAKESHI KARINO
第一構造技術部	内堀 裕之	HIROYUKI UCHIBORI
四国支店	藤岡 泰輔	TAISUKE FUJIOKA
技術企画部	三加 崇	TAKASHI SANGA
第一構造技術部	永元 直樹	NAOKI NAGAMOTO

高速道路の壁高欄は、経過年数による老朽化だけでなく、凍結防止剤の散布や沿岸部での飛来塩分などにより、鋼材の腐食による劣化が進行しやすい部位である。そこで、抜本的な解決方法として鉄筋の代わりにGFRP ロッドを使用し、腐食する鋼製材料を一切使用しない超高耐久なプレキャスト壁高欄の開発を行った。本構造の接合部を含む耐荷性能を確認するため、実物大の壁高欄の試験体を用いた衝突実験を実施した。その結果、衝突荷重に対して十分な耐荷性能を保有していることを確認した。

キーワード：プレキャスト壁高欄，GFRP，超高耐久，衝突試験

Bridge barriers of expressways are required to be highly durable because those are prone to accelerated deterioration by sprinkling antifreeze chloride agents and airborne salt near the coastlines. Therefore, we have developed ultra-high durable precast bridge barrier reinforced with GFRP rods instead of reinforcing bar. A collision test was conducted using an actual size specimen to verify the load capacity. The test confirmed a collision load capacity equivalent to or higher than that of a typical reinforced concrete bridge barrier.

**Key Words:** Precast bridge barrier, GFRP, Ultra-high durable, Collision test

### 1. はじめに

高速道路の壁高欄は、経過年数による老朽化だけでなく、凍結防止剤の散布や沿岸部での飛来塩分などにより、鋼材の腐食による劣化が進行しやすい部位である。そのため、壁高欄では一般的に鉄筋かぶりを通常の部材より大きく設定することで、鉄筋腐食を抑制している。そこで、根本的な解決方法として、図-1に示す腐食する鋼製材料を一切使用せず、腐食しない材料であるGFRP (Glass Fiber Reinforced Plastics) ロッドを用いた超高耐久プレキャスト壁高欄（以下、Dura-Barrier）の開発を行った。本稿では接合部を含む耐荷性能を確認するため、衝突試験を実施した結果について報告する。

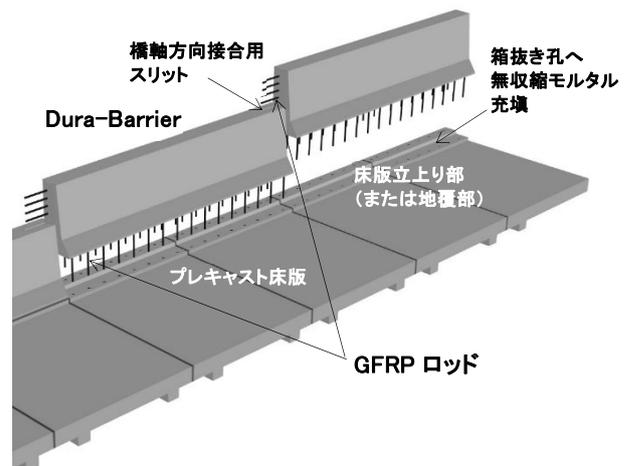


図-1 Dura-Barrier の施工概要

### 2. Dura-Barrierの構造

#### (1) 構造概要

本構造は、図-2および写真-1に示すように高欄と地覆

を一体化したプレキャスト部材をその下面から突出させたGFRPロッドを介して床版に接合させる構造であり、鉄筋を使わない非鉄製の構造である。また、写真-2、写真-3に示すように壁高欄同士の接合は部材端部から

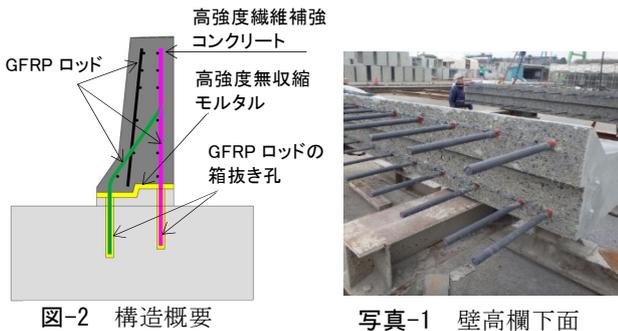


図-2 構造概要



写真-1 壁高欄下面



写真-2 壁高欄同士の接合



写真-3 スリット

表-1 GFRP ロッドの材料特性

	GFRP ロッド	鉄筋(標準値)
弾性係数	$6.0 \times 10^4 \text{N/mm}^2$	$2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$
保証引張強度	$1000 \text{N/mm}^2$	$345 \text{N/mm}^2$
破断ひずみ	0.016667	—

橋軸方向にGFRPロッドを突出させ、隣接部材に設けたスリットに収める構造としている。

Dura-Barrierは、設計基準強度 $80 \text{N/mm}^2$ の緻密な高強度繊維補強コンクリートと、曲げ加工したGFRPロッドを使用しており、腐食する材料は一切使用していない。コンクリート内に混入する短繊維も非鉄製のビニロン繊維としている。Dura-Barrierの形状は、一般的な剛性防護柵であるフロリダ型とし、水平力に抵抗できるようにせん断キーを設け、せん断キーの角度は、施工性も考慮しつつ抵抗力も大きくするため、約 $75^\circ$ とした。施工方法は、プレキャスト壁高欄の下面から突出するGFRPロッドが挿入される箱抜き孔に高強度無収縮モルタルを先に充填し、高強度無収縮モルタルが硬化する前にプレキャスト壁高欄を所定の位置に設置した後、地覆との間詰め部（水平目地）およびプレキャスト壁高欄同士の間詰め部（鉛直目地）に高強度無収縮モルタルを充填する手順である。

なお、ガラス繊維は高アルカリ環境下での劣化が知られているが、GFRPロッドのアルカリ浸漬試験（pH13,  $60^\circ\text{C}$ 環境で3か月）では、ヤング係数の低下がなく、92%以上の強度保持率が確認され、引張ひずみを与えた状態でも90%以上の強度保持率が確認されている。CSA規準<sup>1)</sup>における強度保持率80%以上を満足しており、本構造に適用可能と判断した。

## (2) GFRPロッドによる接合部の機械的性質

### a) 接合部の設計

GFRPロッドの材料特性は、表-1に示すように鉄筋と比較して高強度であり、低弾性である。弾性係数は、GFRPロッドが $6.0 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 、鉄筋が $2.0 \times 10^5 \text{N/mm}^2$ であり、同じ引張力に対してGFRPロッドは約3倍伸びやすい。そのため、ひび割れ近傍の平均ひずみも3倍程度になると考えられる。一方、付着強度はGFRPロッドの方が大きく、必要定着長は(3)節のb)で後述するようにGFRPロッドは $8\phi$ であり、鉄筋は通常 $25\phi$ であるため、GFRPロッドの付着切れの範囲は、鉄筋の約1/3にな

ると考えられる。ひび割れ幅は、付着切れが生じている区間の長さとその部分に生じている平均ひずみの積となるため、GFRPロッドを鉄筋と同程度の断面積で配置すれば、結果としてコンクリートに発生するひび割れは、GFRPロッドを使用した場合と鉄筋を使用した場合で同程度になると想定される。このような考え方から、接合部においてGFRPロッドは、鉄筋の場合と同程度の断面積を確保することとした。

Dura-Barrierでは、直径 $22 \text{mm}$ のGFRPロッドを $250 \text{mm}$ ピッチで配置した。高速道路の設計要領<sup>2)</sup>で規定する標準配筋の場所打ち壁高欄（以下、場所打ち壁高欄）の配筋と同じようにGFRPロッドを $125 \text{mm}$ 間隔にすると、それぞれのGFRPロッドの引抜き力に対するコーン破壊面が重なり、耐力の低下が懸念されたため、本構造では重なりが少ない $250 \text{mm}$ 間隔で配置することとした。GFRPロッドの間隔が広がると、ひび割れの分散性が悪くなり、大きなひび割れが発生する可能性があるため、衝突試験を実施する前に静的載荷試験によりひび割れが集中しないことを確認している。Dura-Barrierは、場所打ち壁高欄の鉄筋と同程度の断面積を有するGFRPロッドに置き換えており、背面側のコンクリートが圧壊する曲げ圧縮破壊およびせん断キーのせん断破壊、載荷部の押し抜きせん断破壊よりGFRPロッドの破断による曲げ引張破壊が先行する結果になった。

### b) GFRPロッドの付着強度と定着長

GFRPロッドの付着強度については、図-3に示すようにコンクリートブロックに設けた箱抜き孔に無収縮モルタルを充填しGFRPロッドを埋込み、無収縮モルタルが所定の強度を発現した後に引抜試験を実施することによって検証した。引抜試験は、GFRPロッドの定着性能を把握するため、付着強度が分かるように埋込み長を直径の5倍とした。モルタル強度が異なる試験体①、②について、それぞれ3体ずつ試験を行った。試験条件と試験結果を表-2に示す。Dura-Barrierに適用する高強度モル

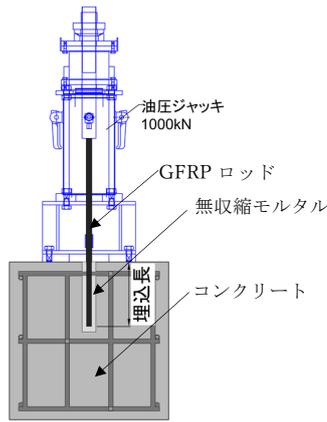


図-3 引抜試験概要図

表-2 GFRP ロッドの付着強度・必要定着長

試験体	単位	試験体①	試験体②
最大外径a	mm	20.5	
埋込長		5φ	
	mm	103	
保証引張荷重	kN	254.5	
モルタル強度	Mpa	107.0	67.4
コンクリート強度	Mpa	54.8	54.8
最大荷重*	kN	162	122
付着強度	Mpa	24.5	18.5
状態		付着切れ	付着切れ
埋込長表面積	mm <sup>2</sup>	6601	6601
必要定着長		7.9	10.4

※最大荷重は、3体の平均値である



写真-4 GFRP ロッドの形状

タルの試験体①の付着強度は24.5N/mm<sup>2</sup>となり、コンクリート部分の圧縮強度と同程度のモルタルによる試験体②の付着強度は18.5N/mm<sup>2</sup>となった。試験体①と②の結果からも分かるように付着強度は箱抜き孔に充填するモルタル強度に依存している。また、その付着強度から保証引張荷重まで引き抜けないように必要定着長を定めた場合、試験体①の必要定着長は8φとなる。Dura-Barrierの定着長は、8φに安全率を考慮し15φとした。

### c) GFRP ロッドの曲げ成形部の強度

Dura-Barrierでは、写真-4に示すようにGFRPロッドを曲げ加工しており、曲げ成形による強度低下の影響を把

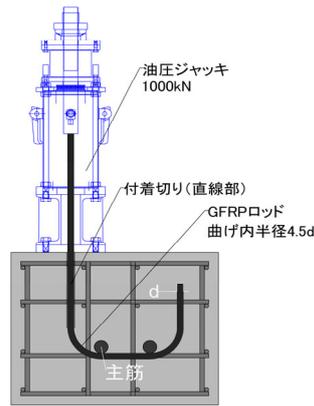


図-4 試験方法



写真-5 GFRP ロッド 曲げ成形部試験体

表-3 GFRP ロッド曲げ成形部 荷重保持率

試験体	単位	試験体A	試験体B
最大外径a	mm	20.5	26.2
最大荷重*	kN	167	285
保証引張荷重	kN	254.5	415
荷重保持率(実験)	%	65.6	68.7
荷重保持率(設計)	%	40.0	40.0
モルタル強度	Mpa	67.4	67.4
コンクリート強度	Mpa	54.8	54.8
破壊位置		曲げ成形部	曲げ成形部

※最大荷重は、3体の平均値である

握するために曲げ成形部の強度を検証した。試験方法および試験体の大きさはコンクリート工学会の試験法<sup>3)</sup>に準拠した(図-4)。曲げ加工したGFRPロッドを写真-5に示す。GFRPロッドは曲げ内半径を最大外径の4.5倍とし、ジャッキ下のGFRPロッド直線部の付着を切り、GFRPロッドの曲げ成形部の引張試験を実施し検証した。径が異なる試験体A、Bについて、それぞれ3体ずつ試験した結果を表-3に示す。荷重保持率は径の大きさで大きな差はなく、66~69%となり、「連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針(案)」<sup>4)</sup>に示される曲げ成型部の設計引張強度式で算出される40%より大きい結果となることを確認した。

## 3. 衝突試験

### (1) 試験概要

衝突試験は図-5に示す衝突箇所が異なる3体の試験体を製作し、実施した。試験体は、中央載荷を試験体No.1、端部載荷を試験体No.2、接合部載荷を試験体No.3とし、試験体の大きさは、適用箇所が多い壁高欄の種別となるSB種を対象とし、長さは4mを標準とした。試験体No.3は、スリット部の影響も確認するために、スリット側が載荷位置となるように設置した。試験状況

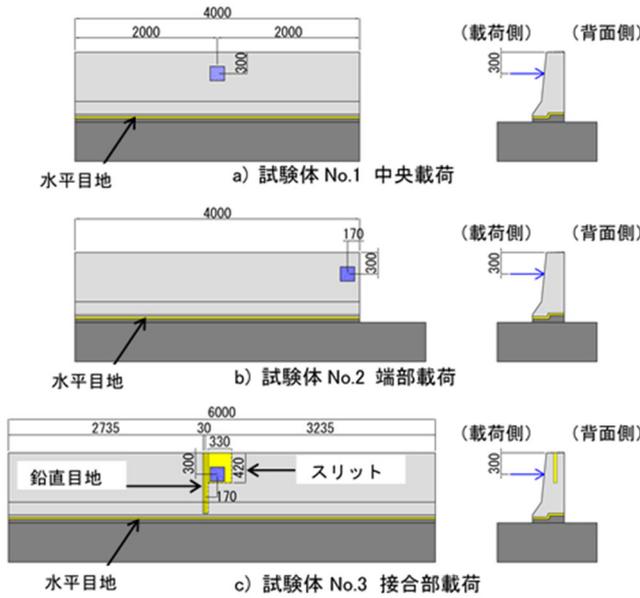


図-5 衝突試験体

表-4 プレキャスト壁高欄の要求性能（規格値）

衝突条件	衝突度	項目	規格値
「設計荷重相当」の衝突を与えた場合	2.8 kJ (SB種)	外観変状	① 有害なひび割れ(目安:0.2mm)が発生しないこと ② 構成部材が飛散しないこと
		構成部材のひずみ	壁高欄及び接合部に残留ひずみが発生しないこと
「場所打ち壁高欄における耐力相当」の衝撃を与えた場合	28 kJ (SB種)	外観変状	① 壁高欄基部の背面側のかぶりコンクリートにはく離が生じないこと ② 接合部の引張部材に破断や抜けが生じないこと

表-6 衝突試験結果

衝突条件	試験体 No.	衝突位置	ひび割れ	GFRP ロッド ひずみ	有害なひび割れが発生しないこと	構成部材が飛散しないこと	壁高欄及び接合部に残留ひずみが発生しないこと	壁高欄基部の背面側のかぶりコンクリートにはく離が生じないこと	接合部の引張部材に破断や抜けが生じないこと
STEP1 設計荷重相当(2.8 kJ)	No.1	中央部	無し	最大 0.000015	OK	OK	OK	—	—
	No.2	端部	無し	最大 0.000102	OK	OK	OK	—	—
	No.3	接合部	無し	最大 0.000023	OK	OK	OK	—	—
STEP3 場所打ち壁高欄における耐力相当(28 kJ)	No.1	中央部	最大 0.25mm	接合部目開き (最大 0.65mm)	—	—	—	OK	OK
	No.2	端部	最大 0.20mm	接合部目開き (最大 4.0mm)	—	—	—	OK	OK
	No.3	接合部	最大 0.06mm	接合部目開き (最大 0.25mm)	—	—	—	OK	OK

を写真-6、試験装置の概要を図-6示す。試験法はNEXCO試験法441（プレキャスト壁高欄の接合構造の性能試験方法）<sup>5)</sup>に準拠し、その要求性能（規格値）を表-4、衝突条件を表-5に示す<sup>6)</sup>。

STEP1、STEP3はそれぞれ試験法441における設計荷重相当、場所打ち壁高欄の耐力相当の衝突条件である。なお、STEP4以降は独自に、破壊に至るまで衝突エネルギーを漸増させた。

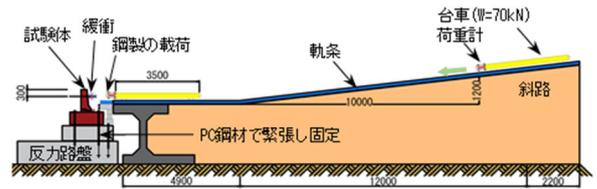


図-6 衝突試験装置の概要



写真-6 衝突試験

表-5 衝突条件

衝突ケース	衝突エネルギー
STEP 1	2.8 kJ
STEP 2	14.0 kJ
STEP 3	28.0 kJ
STEP 4	42.0 kJ
STEP 5	56.0 kJ
STEP 6	61.6 kJ
STEP 7	82.3 kJ

(2) 試験結果と考察

a) 試験結果の概要

表-6に示すように、いずれの試験体においても、試験法441の要求性能をすべて満足する結果となった。

b) STEP1の試験結果

STEP1では、いずれの試験体においても変位やひずみは弾性範囲内の挙動を示しており残留ひずみはなく、壁高欄のひび割れや接合部材の破断や抜け出しによる接合部の目開き、構成部材の飛散については確認されなかった。

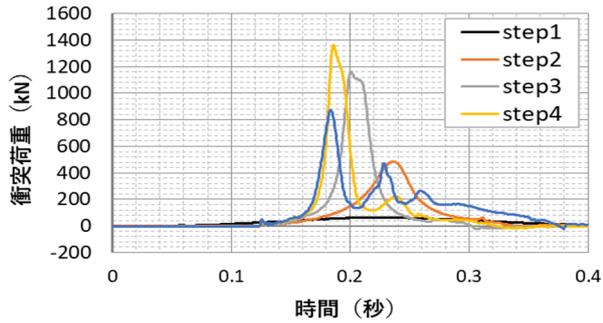


図-7 衝突荷重時刻歴 (No.1)

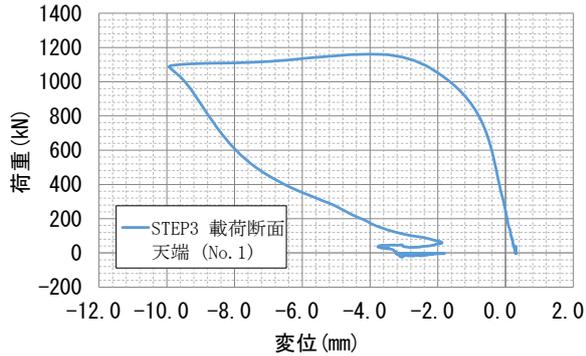


図-8 荷重と変位の関係 (No.1)

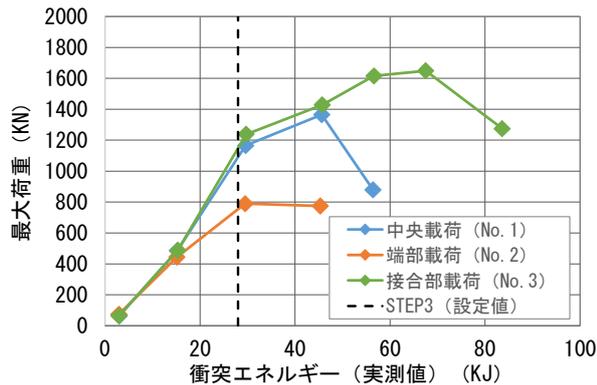


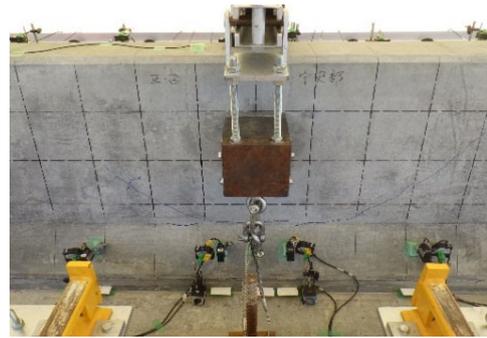
図-9 最大荷重と衝突エネルギー

接合部荷重の試験体No.3の鉛直目地についても飛散は確認されなかった。

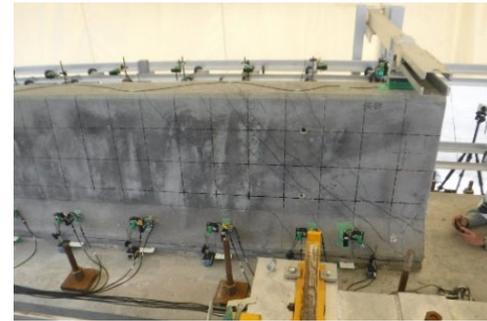
### c) STEP3の試験結果

STEP3においても、すべての試験体でコンクリートの剥離は確認されなかった。試験体No.1に着目し衝撃力の時刻歴応答を図-7に示す。衝突エネルギーの増加に伴い衝突時の最大荷重が大きく、衝突時間が短くなっている。荷重は、STEP4で最大になっており、STEP4までは十分な耐荷性能を保持していることが分かる。

さらに、図-8に試験体No.1におけるSTEP3の載荷断面天端の水平変位と荷重の関係を示すが、最大荷重後に約2mmまで戻っており、十分な復元性能も保持していることが分かる。そのため、接合部の引張部材であるGFRPロッドは、STEP3では破断していないと判断できる。また、試験体No.1において、試験体の破壊後に、



a) 中央載荷 (No.1)



b) 端部載荷 (No.2)



c) 接合部載荷 (No.3)

写真-7 場所打ち壁高欄における耐力相当時 (STEP 3) の試験体の損傷状況一覧

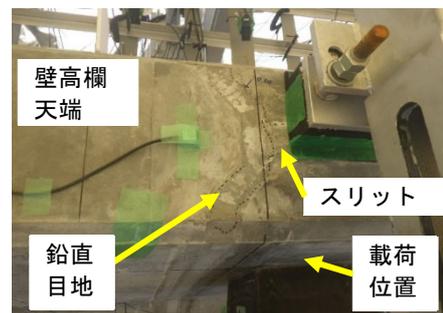


写真-8 場所打ち壁高欄における耐力相当時 (STEP 3) の鉛直目地の損傷状況 (No.3)

水平目地に沿って切断した結果、GFRPロッドの破断は見られたが、引き抜けが生じていないことを確認した。

各試験体の衝突エネルギーと最大荷重の関係を図-9に示す。いずれの試験体においても、場所打ち壁高欄における耐力相当となるSTEP3までは、ほぼ直線状に増加

しており、場所打ち壁高欄における耐力相当以降もじん性を有している。写真-7に示すSTEP3の試験体損傷状況からも分かるようにいずれの試験体においても損傷は軽微であった。写真-8に示す試験体No.3の接合部荷の鉛直目地やスリットについても破壊やずれはなく、一体性を保っていた。

#### d) 破壊形状に対する考察

試験体の破壊状況は、試験体No.1の中央荷および試験体No.3の接合部荷では壁高欄背面側に鉛直方向のひび割れが発生した。荷面には同心円状となるひび割れが発生し、壁高欄背面のコンクリートの圧壊およびGFRPロッドの破断により破壊に至った。試験体No.2の端部荷では荷面に斜めにひび割れが発生し、押抜きせん断破壊およびGFRPロッドの破断により破壊に至った。ただし、台車が壁高欄を突破するようなことは無く、余剰耐力も十分にあることが確認できた。試験体No.3の接合部荷についても、鉛直目地に若干ずれは発生したが、鉛直目地やスリットに大きな損傷はなく一体性を保っており、十分な耐力を確保していることを確認できた。

#### e) GFRPロッドの曲げ成形部に対する考察

試験体が破壊するまで衝突させた後に、試験体No.1において水平目地に沿って切断した結果、破断したGFRPロッドは曲げ成形部付近で破断していることが分かった。GFRPロッドの曲げ成形部での強度低下はあるが、衝突試験の結果、いずれの試験体についても場所打ち壁高欄における耐力相当（STEP3）まで「NEXCO試験法441」を満足できているため、曲げ成形部があっても接合部は十分な耐力を確保していることを確認できた。

## 4. 結論

開発したDura-Barrierの衝突試験で得られた知見を以下に示す。

- ① 鉄筋の代替としてGFRPロッドを用いたDura-Barrierは、衝突荷重に対して十分な耐荷性能を保有していることが確認できた。
- ② 壁高欄同士の接合の鉛直目地についても、場所打ち壁高欄における耐力相当の衝突荷重において破壊やずれはなく、一体性を保つことを確認できた。
- ③ GFRPロッドの曲げ成形部があっても、接合部は十分な耐力を確保していることを確認できた。

謝辞：本研究は、平成26年12月からの西日本高速道路㈱と三井住友建設（株）の共同研究『非鉄製橋梁の実現化に関する共同研究』によるものであり、西日本高速道路㈱の関係者の方々から多くのご助言を頂くとともに、細部にわたりご指導戴きました。深く感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) Canadian Standards Association : S807-10 Specification for fiber-reinforced polymers, March 2010
- 2) 東, 中, 西日本高速道路㈱ : 設計要領第二集 橋梁建設編, 2016.8
- 3) 日本コンクリート工学協会 : JCI 規準集.1977-2002 年度, 連続繊維補強コンクリート研究委員会報告書および同 (II), 連続繊維補強材の曲げ成形部引張試験方法 (試案), 2004.4
- 4) 土木学会 : 連続繊維補強材を用いたコンクリート構造物の設計・施工指針 (案), 土木学会コンクリートライブラリー88, 1996.9
- 5) 東, 中, 西日本高速道路㈱ : NEXCO 試験方法 第4編 構造関係試験方法, 2019.7
- 6) 東, 中, 西日本高速道路㈱ : 構造物施工管理要領, 2019.7