

## フォームサポート工法により補強された老朽化橋梁の耐震性能評価 —振動台実験による有効性の検証と実務展開に向けた展望—

(株) J S P

### 概 要

日本国内の道路橋は急速に老朽化しており、2032年には供用後50年を超える橋梁が約6割に達すると予測されている。一方で、地方自治体における技術者不足や予算制約は深刻であり、供用下で短期間に施工可能かつ地震後の機能確保に資する補強技術が強く求められている。発泡スチロール（EPS）ブロックと発泡ウレタン等で桁下空間を充填する「フォームサポート工法（以下、FS工法）」は、その有力な解決策として期待されている。

本稿では、2021年の基礎検証から、1G場振動台を用いたレベル2地震動（最大1600Gal）相当の定量評価（2023–2025年）に至る研究の経緯を時系列に整理し、各期の実験条件・結果を具体的に総括する。一連の研究により、(i) 桁下全空間の連続充填がレベル2地震動相当下でも走行性（模型換算で段差2.8mm閾値）を安定的に満足すること、(ii) 部分充填や低剛性材でも無補強より大幅に改善すること、(iii) ボックスカルバート併設時も適切な連続充填で同等の性能が得られることが実証された。一方、高比重材使用時の局所衝撃応答の詳細把握、三次元入力下の検証、材料相似と長期耐久性、浮力条件での設計整理、施工品質管理が今後の課題として挙げられる。本稿では、これらの課題を踏まえつつ、FS工法の普及に向けた設計・施工の標準化、実橋実証、ライフサイクルコスト評価、研修・広報、政策支援等について提案する。

### 目 次

1. はじめに	3
1.1 橋梁老朽化の現状と課題	3
1.2 フォームサポート工法の概要と特徴	3
2. 研究の変遷と成果	4
2.1 第1期：基礎的有効性の確認と適用範囲の拡張（2021-2022年）	4
2.1.1 研究の目的と位置づけ	4
2.1.2 実験条件	5
2.1.3 実験ケース	6
2.1.4 実験結果と所見	7
2.2 第2期：レベル2地震動への挑戦と走行性評価の確立（2023-2024年）	9
2.2.1 研究の目的と位置づけ	9
2.2.2 実験装置	9
2.2.3 実験条件	10
2.2.4 実験ケース	10
2.2.5 実験結果	12
2.2.6 実験結果と所見	12

2.3	第3期：実務的課題への深化（材質・比重・桁下構造物）（2024-2025年）	14
2.3.1	研究の目的と位置づけ	14
2.3.2	追加実験ケース	14
2.3.3	実験結果	14
2.3.4	高比重材に関する補足所見	15
3.	実験結果から得られる有効性	16
3.1	走行性の確保	16
3.2	破壊モードの抑制	16
3.3	適用の柔軟性	16
3.4	材質の幅	16
4.	今後の課題	16
4.1	高比重材料使用時の効果と課題	16
4.2	三次元入力・横断方向挙動	17
4.3	材料相似・長期耐久性	17
4.4	浮力・冠水条件の体系化	17
4.5	施工品質・検査	17
5.	将来への提言	17
5.1	設計・施工の標準化	17
5.2	実橋実証とライフサイクルコスト評価	17
5.3	人材育成・施工研修	17
5.4	政策支援	17
5.5	デジタル維持管理との融合	18
5.6	複合機能空間の創出	18
6.	結論	18
	参考文献	18

JSP Co., Ltd.: Technical Report of Local Resilience Research Institute, Vol.4, No.4, pp.1-19, 2026.4.

## Potential Evaluation of EPS-Reinforced Aged Bridges under Severe Earthquakes: Verification of Effectiveness and Perspectives toward Practical Development

### Abstract

Maintenance and remediation of the aged infrastructures is one of the national issues in Japan to be solved for sustainable development. To overcome these difficult issues, the utilization technique combining EPS (Expanded Polystyrene) with foam urethane which has been expected as a promising solution was verified for maintenance and remediation of the aged bridges under great earthquakes (Level 2 earthquake motion) through shaking table tests at laboratory. In this technique called FS (Foam Support) Technique, EPS (Expanded Polystyrene) was installed at the space under the girder, and the foam urethane (FU) was filled at the gap between the bridge floor and the EPS structures,

respectively. The following new findings through a series of laboratory shaking tests were obtained:

- i) The overall successive fulling of the space under the bridge girder by combining EPS (Expanded Polystyrene) with foam urethane acquires the stability of bridges even under the level 2 great earthquake.
- ii) Even if partly filling and utilization of low stiffness EPS material were adopted, bridge stability are more markedly improved than without non-reinforcement.
- iii) At the case of attachment of box culvert, the properly successive filling of EPS and FU enables to provide the equivalent performance.

## 1. はじめに

### 1.1 橋梁老朽化の現状と課題<sup>1)</sup>

日本国内には約 73 万橋の道路橋が存在し、そのうち 9 割以上は地方公共団体が管理している。建設後 50 年を経過する橋梁は 2022 年時点で 34%であるが、2032 年には 59%へと急増する見込みである。この急速な老朽化は、高度経済成長期に集中的に建設されたインフラの宿命的課題であり、今後も加速度的に進行することが予想される。さらに深刻な問題として、町村部を中心に土木技術者が不在または極めて少数の自治体が多数存在することが挙げられる。限られた人員と予算の中で、膨大な数の橋梁を適切に維持管理し、地震時の安全性を確保することは、現行の体制では極めて困難な状況にある。このため、供用下で短期間に施工可能であり、特殊な技術や大型機械を必要とせず、地震後も緊急輸送路としての機能を確保できる補強技術の開発・普及が緊急の課題となっている。

### 1.2 フォームサポート工法の概要と特徴

こうした背景の中、「フォームサポート工法 (以下、FS 工法)」<sup>2)</sup>が注目されている。本工法は、発泡スチロール (EPS) ブロックと発泡ウレタン等を用いて橋梁の桁下空間を充填し、橋梁と背面盛土を一体化 (半土構造物化) させることで耐震性能を向上させる技術である。FS 工法の施工手順を図-1 に示す。

FS 工法の主な特徴は以下のとおりである。

- ① 軽量性：EPS の単位体積重量は  $0.2\sim 0.4 \text{ kN/m}^3$  と極めて軽量であり、既設構造物への追加荷重が最小限に抑えられる。
- ② 施工容易性：人力での運搬・設置が可能であり、大型重機を必要としない。
- ③ 供用下施工：交通を遮断せずに施工可能であり、社会的影響を最小化できる。
- ④ 短工期：従来工法 (鋼板巻き立て、RC 巻き立て等) と比較して大幅な工期短縮が可能。
- ⑤ 軟弱地盤適用性：軽量であるため、軟弱地盤上の橋梁にも適用可能。
- ⑥ 既存の上下部工の補修が基本的には不要。

本稿では、FS 工法の実証研究がどのように進展し、どのような有効性と課題が明らかになったのかを時系列に沿って整理し、日本国内での普及に向けた課題と展望を論じる。

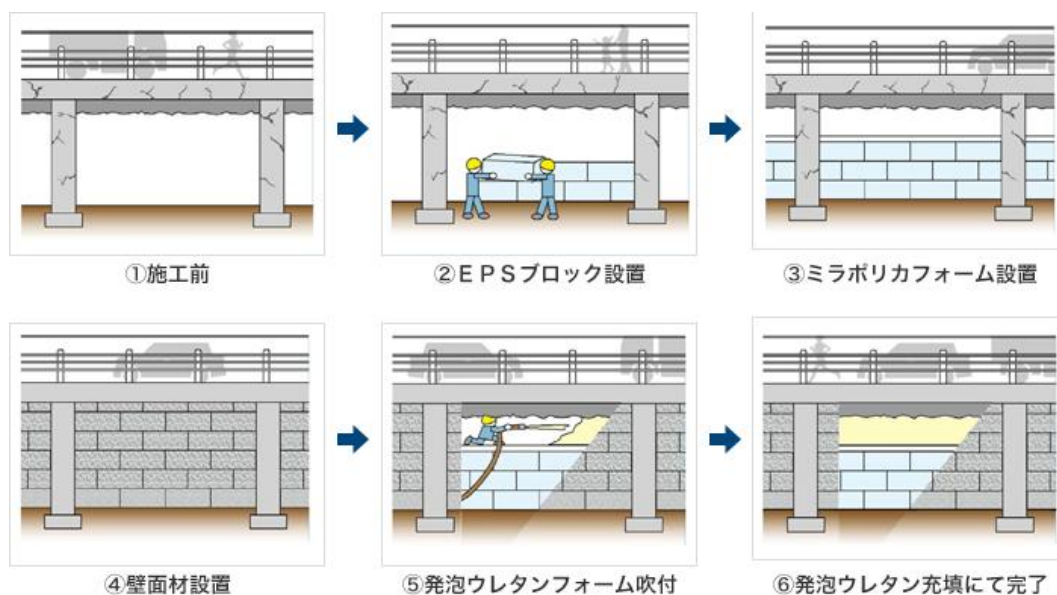


図-1 FS工法の施工手順

## 2. 研究の変遷と成果

FS工法による耐震性評価研究は、2021年から2025年にかけて以下の3つの段階で進展してきた(表-1)。各段階において、研究の目的、実験条件、評価指標が段階的に深化・拡張されてきた経緯を表-1に示す。

表-1 フォームサポート工法に関する研究史と主要な成果

段階	年代	研究テーマ	地震動レベル	主要な評価指標	得られた知見
第1期	2021～2022	基礎的検証・適用範囲拡張	レベル1相当	沈下量	補強による変位抑制効果を確認。傾斜地盤や函渠併設でも有効。
第2期	2023～2024	レベル2耐震性能の定量化	レベル2相当	走行性(段差)	全空間充填によりL2でも走行可能。相似則の適用と計測精度の向上。
第3期	2024～2025	実務的課題への対応	レベル2相当	材質影響・衝撃応答	低剛性材でも有効。高比重材は沈下ゼロで浮力対策にも有効。

### 2.1 第1期：基礎的有効性の確認と適用範囲の拡張 (2021-2022年)

#### 2.1.1 研究の目的と位置づけ

第1期の研究は、「FS工法が耐震補強として機能するか」という基礎的な問いに対する実証を目的として実施された。この段階では、レベル1地震動(中規模地震)を想定した条件下で、補強の有無による挙動の差異を定性的・定量的に把握することに主眼が置かれた。

## 2.1.2 実験条件

実験<sup>3), 4)</sup>は1G場振動台を使用し、以下の条件で実施された。この振動台は以下の性能を備えている。

表-2 1G場振動台の性能

項目	仕様
最大加速度	300 Gal (約0.3G)
最大変位	±50 mm
周波数	4 Hz
土槽寸法	幅1.0m × 奥行0.3m × 高さ0.5m
最大積載重量	0.2t
入力波形	正弦波, 模擬地震波の再現が可能

この振動台の使用により、レベル1地震動相当(最大300 Gal)程度の入力が可能となり、頻繁に起こり得る強さの地震を想定した性能評価を実施した。土槽は剛体土水槽で行った。

### (1) 地盤材料

- ・豊浦砂を使用(最大間隙比  $e_{max}=0.989$ , 最小間隙比  $e_{min}=0.616$ , 土粒子密度  $\rho_s=2.658 \text{ Mg/m}^3$ )
- ・相対密度  $D_r=90\%$ で層状に締固め
- ・色砂を層間に配置し、変形の可視化を実施

### (2) 実験模型

- ・縮尺: 1/20
- ・構成: 単純桁橋梁
- ・橋台: 固定支承側(回転のみ許容)と可動支承側(回転+水平移動許容)
- ・橋桁: アルミニウム製(縮尺に基づく単位重量を模擬)

実験模型の概要を図-2に示す。

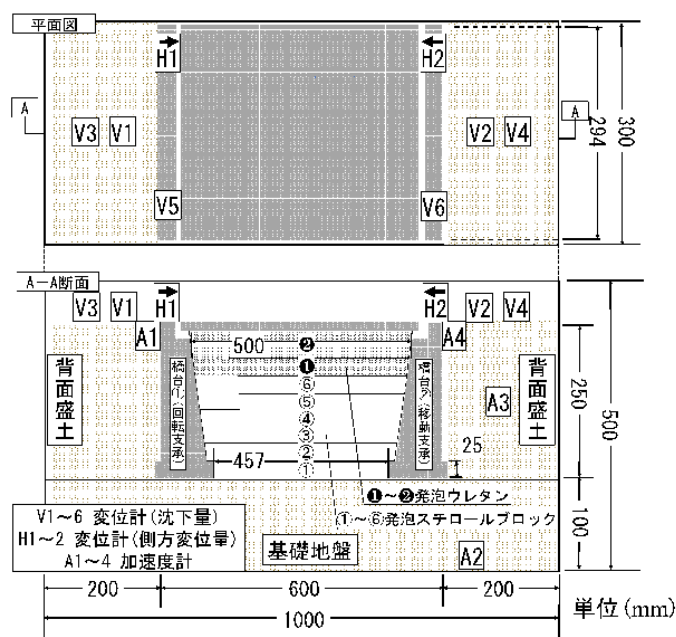


図-2 実験模型の概要

### (3) 入力条件

- ・波形：正弦波
- ・周波数：4 Hz
- ・波数：30 波
- ・最大加速度：約 300 Gal（レベル1 地震動相当）

### (3) 計測項目

- ・レーザ変位計：背面盛土天端の沈下量
- ・加速度計：橋台および桁の応答加速度
- ・土圧計：初期土圧の測定

### 2.1.3 実験ケース

実験ケースを表-3 に示す。

表-3 実験ケース

ケース	中詰めの状態
Case1	補強なし
Case2	補強あり（発泡スチロールブロック 6 枚＋ウレタン）
Case3	補強あり（発泡スチロールブロック量（2 枚）
Case4	補強あり（発泡スチロールブロック量（4 枚）
Case5	補強あり（発泡スチロールブロック量（6 枚）

実験ケースにおける模型地盤の模式図（Case1 と Case2）を図-3 に示す。



a) Case1 補強無し



b) Case2 補強あり（発泡スチロールブロック 6 枚＋ウレタン）

図-3 実験ケースにおける模型地盤の模式図

## 2.1.4 実験結果と所見

### (1)背面盛土を有する橋梁模型にフォームサポート工法による補強を行った場合

この実験により次のことが明らかになった。<sup>3)</sup>

- ① 背面盛土・橋台の沈下量を抑制することが確認できた (図-4 参照)。
- ② 橋台の側方変位量を抑制することが確認できた (図-5 参照)。
- ③ 補強量と沈下量・側方変位量には高い相関がみられた (図-6 参照)。

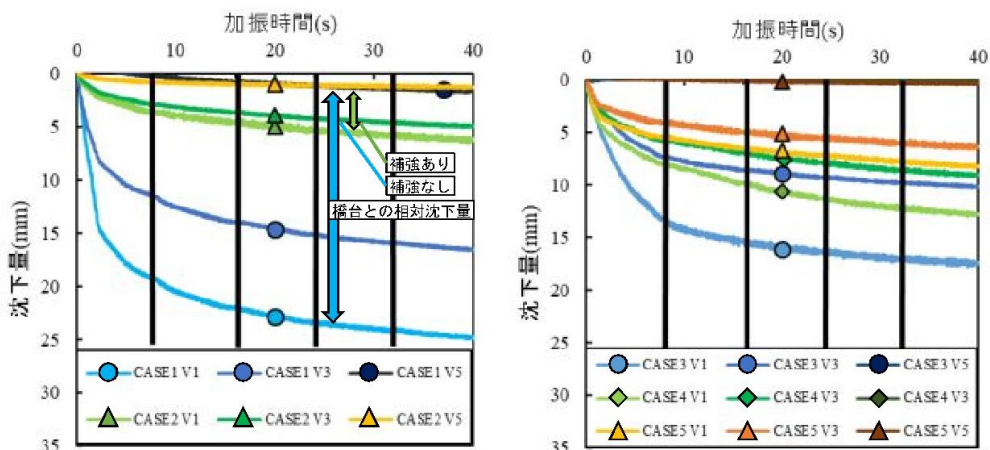


図-4 橋台及び背面盛土の沈下量と経過時間の関係

(左図：CASE1～2, 右図：CASE3～5)

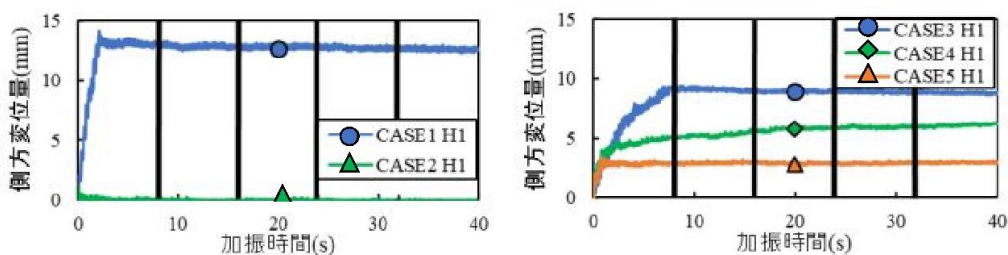


図-5 橋台の側方変位量と経過時間の関係

(左図：CASE1～2, 右図：CASE3～5)

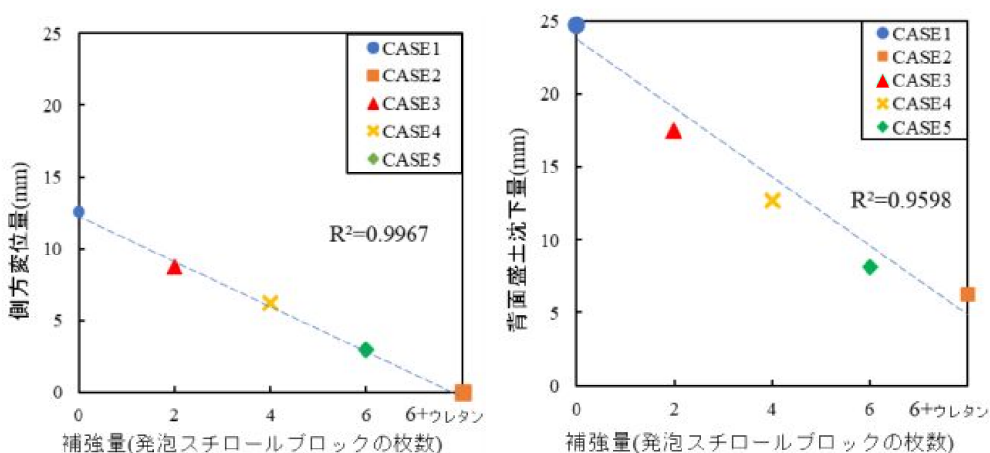


図-6 補強量と背面盛土沈下量・側方変位量の関係

(左図：V1の計測値, 右図：H1の計測値)

(2)ボックスカルバートを設けフォームサポート工法による補強を行った場合

この実験により次のことが明らかになった。<sup>4)</sup>

- ① 背面盛土の残留沈下量, 橋台の側方変位量が抑制された。
- ② 異なる用途の空間利用を想定し, 2種類のボックスカルバートをを用いて実験を行ったが, いずれにおいても耐震性が向上することが確認できた。
- ③ 橋台直下の地盤に傾斜を加えた実験についても背面盛土の残留沈下量, 橋台の側方変位量が抑制された。

以上より, 空間利用のある径間に対して, 及び桁下高の異なる橋梁に対してフォームサポート工法の適用可能性を示した。図-7に無補強, ボックスカルバート大小, 傾斜地盤での補強有無についての各測定結果を示す。

また, 図-8に実験時における土槽写真を示す。a)は加振後の補強無しと補強あり(発泡スチロールブロック6枚+ウレタン), b)は複数桁と上部充填材を高流動コンクリートとしたものである。

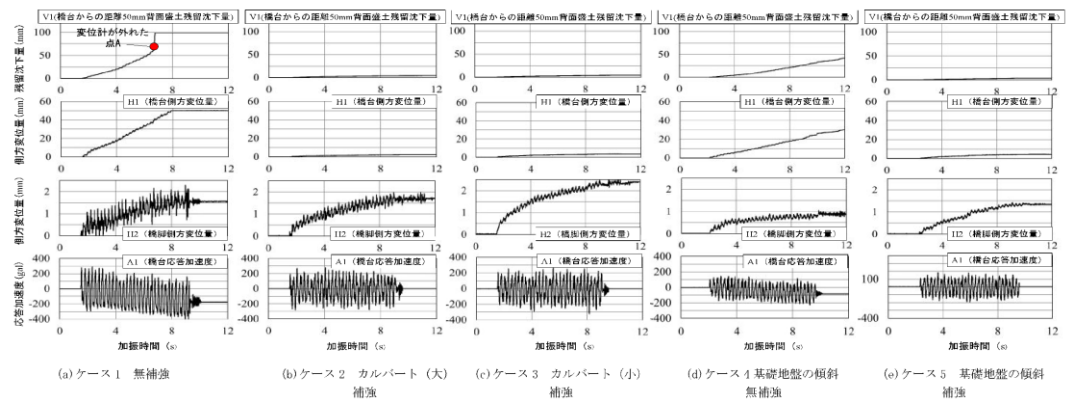


図-7 各計測器の測定結果



a)補強有無による結果(単純桁)



b)加振後の適用条件による結果

図-8 実験時における土槽写真

## 2.2 第2期：レベル2地震動への挑戦と走行性評価の確立（2023–2024年）

### 2.2.1 研究の目的と位置づけ

第2期の研究は、南海トラフ地震や首都直下地震等の巨大地震（レベル2地震動）を見据え、より厳しい条件下でのFS工法の性能を定量的に評価することを目的とした。この段階での最大の転換点は、評価指標を単なる物理量（沈下量）から、「地震直後に緊急車両が通行できるか（走行性）」という機能的指標へ昇華させた点である。

### 2.2.2 実験装置

第2期以降の実験は、1G場振動台を使用して実施された<sup>5)・6)</sup>。この振動台は以下の性能を備えている。

表-4 1G場振動台の性能

項目	仕様
最大加速度	1960 Gal（約2.0G）
最大変位	±200 mm
周波数範囲	0.1～10 Hz
土槽寸法	幅1.0 m × 奥行0.4 m × 高さ0.7 m
最大積載重量	1.5 t
入力波形	正弦波、模擬地震波の再現が可能

この振動台の使用により、レベル2地震動相当（最大1600 Gal）の入力が可能となり、実際の巨大地震を想定した厳密な性能評価が実現した。1G場振動台実験装置を写真-1に示す。

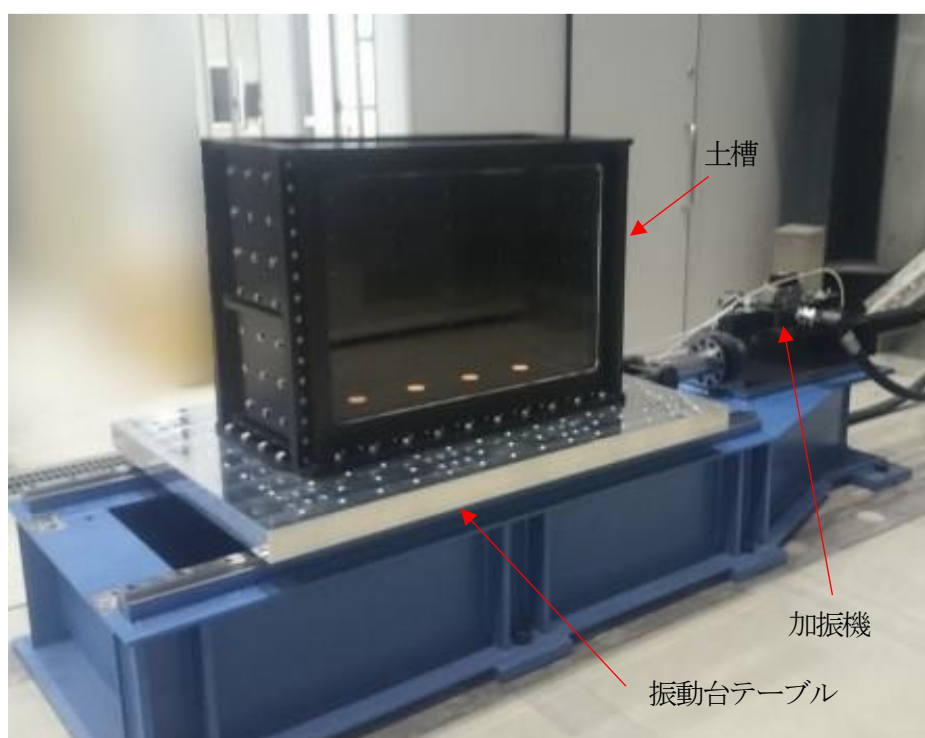


写真-1 1G場振動台実験装置

### 2.2.3 実験条件

#### (1) 地盤材料

- ・豊浦砂，相対密度  $D_r=90\%$ （第1期と同様）

#### (2) 橋梁模型

- ・縮尺：1/20
- ・構成：単純桁橋梁（第1期と同様の支承条件）

#### (3) 入力条件

- ・波形：正弦波
- ・周波数：4 Hz
- ・波数：30 波
- ・加速度：100 Gal から 1600 Gal まで 100 Gal 刻みのステップ加振

#### (4) 計測項目

- ・レーザ変位計：背面盛土の段差（左右 V2', V3'）
- ・加速度計：桁中央，橋台天端，地盤

#### (5) 相似則と計測精度の改善

- ・井合（1987）<sup>7)</sup> の相似則に基づき，実物の EPS 剛性を模擬した代替材料（ポリエチレンフォーム等）を選定
- ・砂漏れ防止壁の設置等により，レーザ計測の信頼性を向上<sup>6)</sup>

#### (6) 走行性閾値の設定

・常田・小田（2009）<sup>8)</sup> の提案に基づき，模型縮尺（1/20）を考慮して「段差 2.8 mm」を走行可否の閾値と定義。この数値は，走行可能（通行機能は低下するが，その確保は比較的容易）な段差高を，1G 場振動台実験における相似則で算出したものである。

FS による橋台間の拘束効果の判断指標として，段差に着目したのは，パラペットの変位による背面盛土の沈下量に関係しているためである。

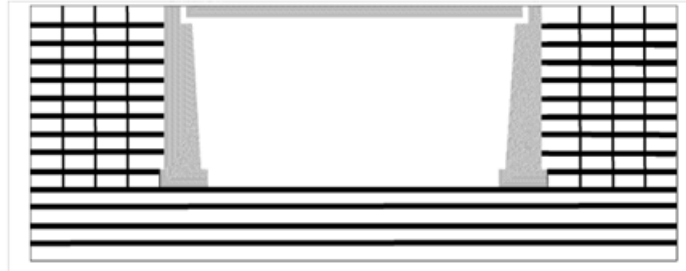
### 2.2.4 実験ケース

実験ケースを表-5 に示す。

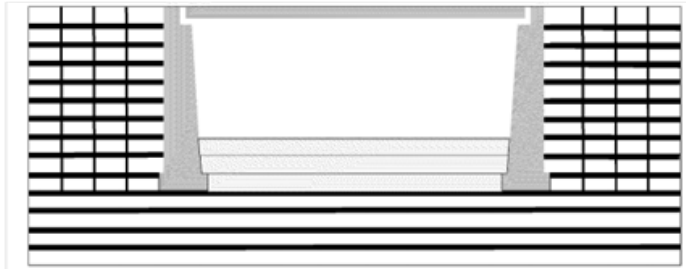
表-5 実験ケース

ケース	補強内容	補強材枚数
Case1	無補強	0 枚
Case2	下部補強	3 枚
Case3	上部補強	3 枚
Case4	上下補強	6 枚 (3+3)
Case5	全空間充填	9 枚

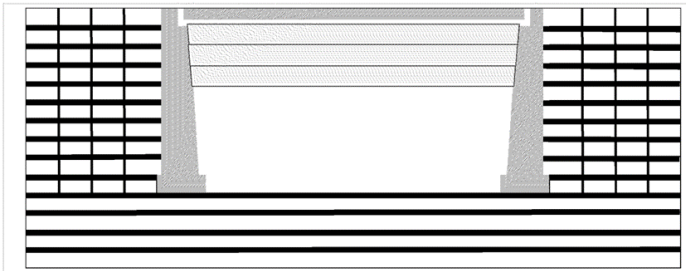
実験ケースにおける模型地盤の模式図を図-9 に示す。



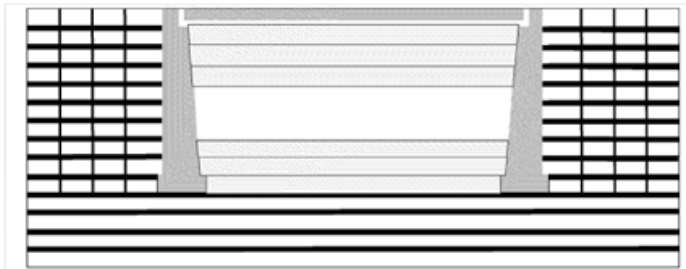
a) Case1 無補強



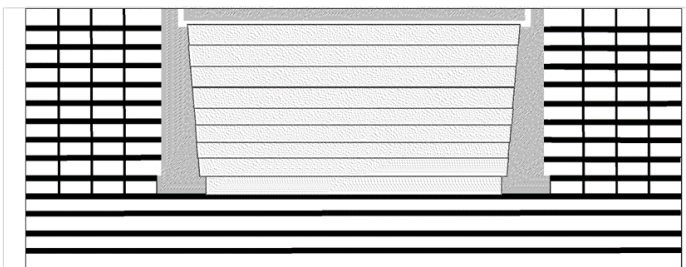
b) Case2 下部のみ補強 (EPS 代替材 3 枚)



c) Case3 上部のみ補強 (EPS 代替材 3 枚)



d) Case4 上部・下部のみ補強 (EPS 代替材 6 枚)



e) Case5 全部補強 (EPS 代替材 9 枚)

図-9 実験ケースにおける模型地盤の模式図

### 2.2.5 実験結果<sup>5), 9)</sup>

実験結果を以下に示す。

#### (1) Case1 (無補強)

- ・ 400 Gal で背面盛土にすべり面が発生 (縦断方向のすべり)
- ・ 500 Gal 時点で段差が閾値 (2.8 mm) を超過し, 走行性喪失
- ・ 1200 Gal で橋台が転倒

#### (2) Case2 (下部補強)

- ・ 600 Gal ですべり面が発生
- ・ 700 Gal で桁端とパラペットの接触が発生
- ・ 段差は 600 Gal 付近で閾値に到達
- ・ 1400 Gal で橋台が転倒

#### (3) Case3 (上部補強)

- ・ 1100 Gal で固定支承側にすべり面が発生
- ・ 段差は 1000~1100 Gal で閾値に到達
- ・ 1200 Gal で橋台が転倒

#### (4) Case4 (上下補強)

- ・ 1100~1200 Gal で小~中規模のすべり面兆候
- ・ 段差は上限域で閾値近傍に接近
- ・ 1600 Gal まで転倒なし

#### (5) Case5 (全空間充填)

- ・ 1600 Gal まで, すべり面・転倒ともに発生せず
- ・ 最終段差は約 1.5 mm で閾値 (2.8 mm) 未満
- ・ 走行性が完全に確保された

### 2.2.6 実験結果と所見<sup>9)</sup>

この実験により, 次のことが明らかになった。

- ① 走行性確保には全空間の連続充填が最も確実: 部分充填でも効果はあるが, レベル2 地震動域では限界が早い。
- ② 部分充填の役割分担: 上部補強は背面天端の変形 (段差) 抑制に効果的であり, 下部補強は転倒遅延に寄与するという役割分担が観察された。

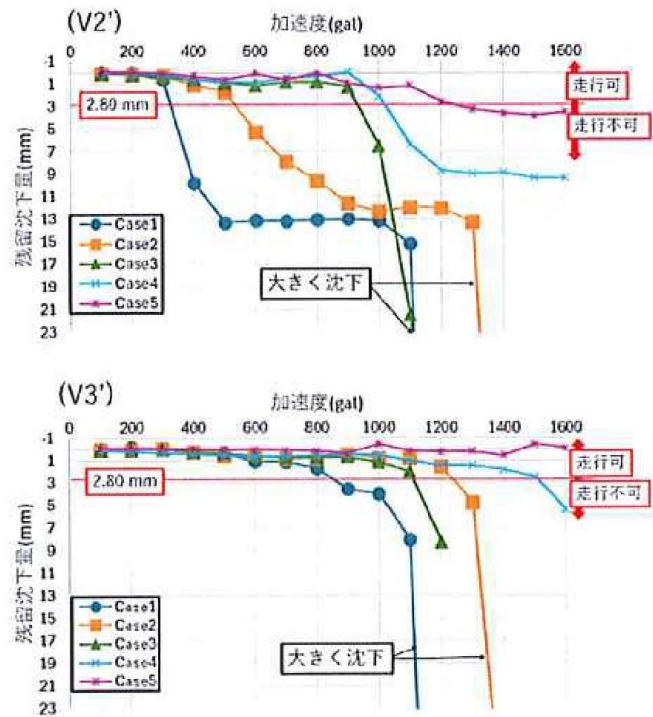
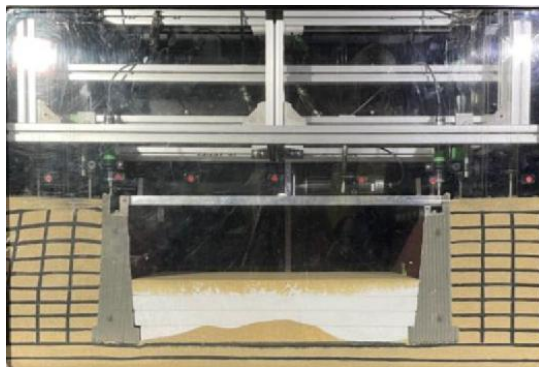


図-10 背面盛土の残留沈下量

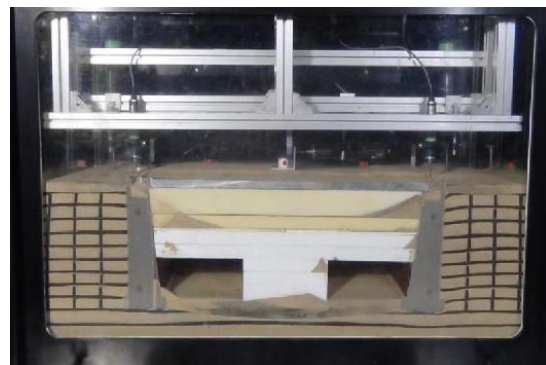
また、充填範囲の違いによる実験の土槽写真を図-11 に示す。



全補強



下部充填



上部充填

図-11 充填範囲違いによる実験の土槽写真

## 2.3 第3期：実務的課題への深化（材質・比重・桁下構造物）（2024-2025年）

### 2.3.1 研究の目的と位置づけ

第2期でFS工法の基本的有効性が確立された後、第3期では実務適用に向けた詳細課題の検討へと研究が深化した。具体的には、①材料剛性の影響、②浮力対策としての高比重材の適用、③桁下に既設構造物（ボックスカルバート等）が存在する場合の性能、について検証が行われた。

### 2.3.2 追加実験ケース

追加実験ケースを表-6に示す。実験条件および実験模型の基本は第2期と同様で行った。

表-6 追加実験ケース

ケース	補強内容	目的
Case6	低剛性材（メラミンフォーム）・全空間	材料剛性の影響評価
Case7	全空間充填+ボックスカルバート（大）	桁下構造物併設時の性能
Case8	全空間充填+ボックスカルバート（小）	桁下構造物併設時の性能
Case9	全空間充填+高比重中詰	浮力対策・沈下抑制

### 2.3.3 実験結果

実験結果を以下に示す。

#### (1) Case6（低剛性材・全空間充填）<sup>10)</sup>

- ・メラミンフォーム（相似則より低剛性）を使用
- ・無補強と比較して段差到達が大幅に遅延
- ・1600 Gal まで転倒なし
- ・段差は1100 Gal 前後で閾値超過
- ・沈下量は無補強比で約50%低減

#### (2) Case7・Case8（ボックスカルバート併設）<sup>11)</sup>

- ・桁下にボックスカルバート（水路・道路を想定）を配置
- ・周囲を連続充填することで性能を維持
- ・最終段差：Case7（箱大）で約2.0 mm，Case8（箱小）で約2.3 mm
- ・いずれも閾値（2.8 mm）未満で走行性確保

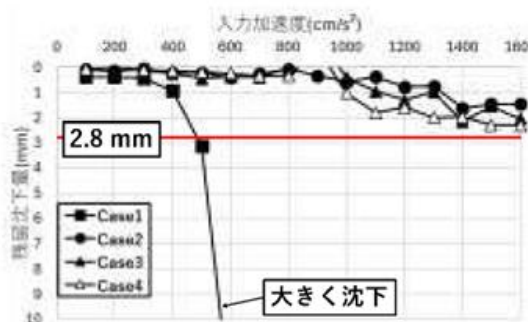


図-12 背面盛土の残留沈下量

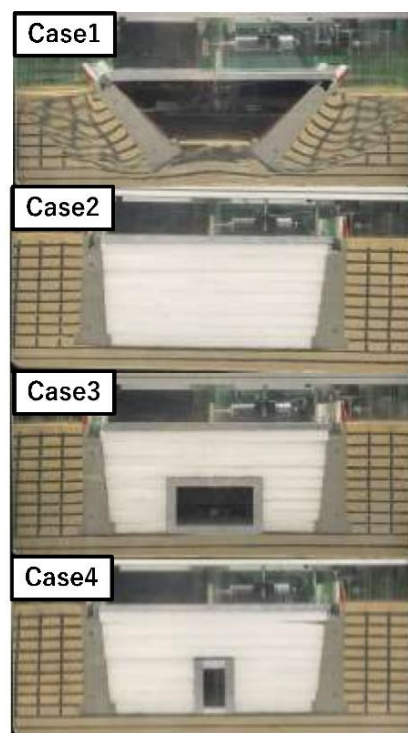


図-13 各ケースの模型地盤の様子

(2) Case9 (高比重中詰) <sup>6)</sup>・<sup>10)</sup>

- ・高流動コンクリート相当の高比重材を使用 (模型ではアルミニウムで模擬)
- ・最終沈下量: 0.0 mm (走行性は最良)
- ・橋台天端加速度に約 5000 Gal の不規則ピークを観測 (衝撃的局所応答の可能性)
- ・適切なディテール設計により管理可能性は高い

また、図-14 に追加実験 (Case6~Case9) 時における土槽写真を示す。

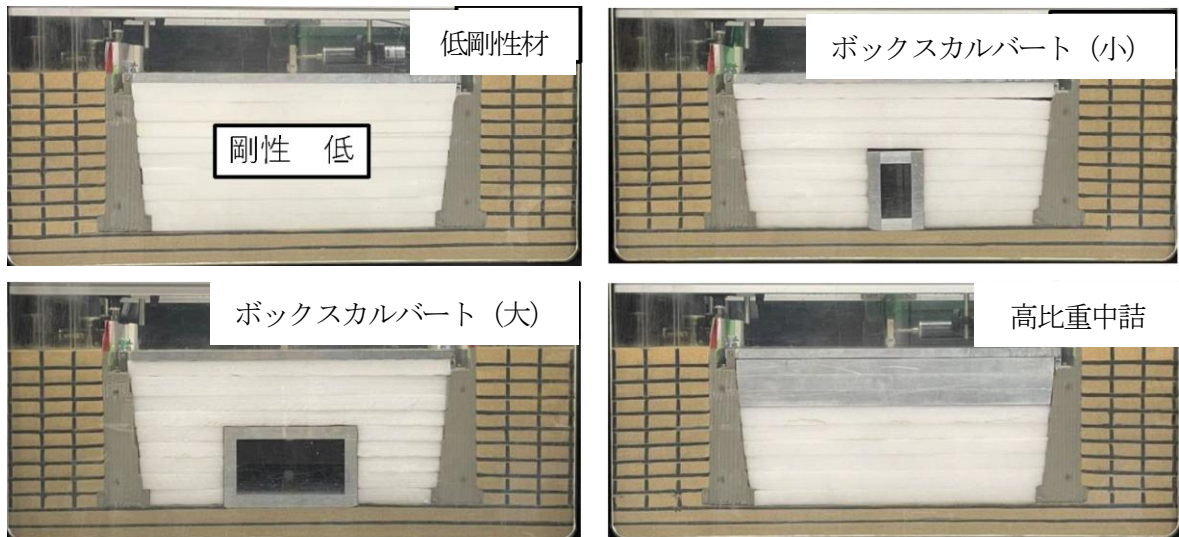


図-14 追加実験時における土槽写真

### 2.3.4 高比重材に関する補足所見

高比重材の使用に関する補足所見を以下に示す。

- ① 新設橋梁での実績：新規橋梁においても、橋台の巻込みコンクリートや桁に接続する階段などの周辺構造に高比重材料を使用するケースは一般的である。これらの事例から、適切な設計がなされていれば、高比重材料の使用が大きな問題を引き起こすことはないと考えられる。
- ② 浮力リスクの軽減効果：高水位場では、EPSなどの軽量材料のみで充填した場合、浮力により構造全体が浮き上がるリスクが懸念される。高比重材料を上部や一部に使用することで、構造全体の安定性を向上させ、浮力による挙動を抑える効果が期待される。
- ③ 設計課題：振動台実験で観測された局所的な応答ピーク (約 5000 Gal) については、発生メカニズムの詳細説明が望まれる。ただし、緩衝材の配置、桁端クリアランスの確保、緊結金具の最適化、荷重分散ディテールの採用等により、設計的に管理可能と考えられる。

### 3. 実験結果から得られる有効性

一連の研究結果を総括すると、FS工法の有効性は以下のように結論付けられる。

#### 3.1 走行性の確保

桁下全空間を連続的に充填することで、レベル2地震動相当（最大1600Gal）の激震時においても、背面盛土の段差を許容値（2.8mm）以下に抑え、緊急輸送路としての機能を維持できることが実証された<sup>5)・6)・9)・10)</sup>。全空間充填ケース（Case5）では、最終段差が約1.5mmに留まり、閾値に対して十分な余裕を持って走行性が確保された。

#### 3.2 破壊モードの抑制

無補強では比較的小さい加速度（400Gal程度）で背面盛土にすべり面が発生し、1200Galで橋台が転倒するのに対し、全空間充填では1600Galまですべり面・転倒ともに発生しなかった<sup>5)・6)・9)</sup>。充填材が橋台を支持・拘束することで、転倒やすべり破壊を完全に防止できることが示された。

#### 3.3 適用の柔軟性

桁下にボックスカルバート（水路・道路）が存在する場合でも、周囲を連続充填すればレベル2地震動域で閾値（2.0～2.3mm）未満に段差を制御可能であることが確認された<sup>11)</sup>。また、傾斜地盤条件でも補強効果が維持されることが第1期で示されており<sup>4)</sup>、多様な現場条件への適用可能性が実証されている。

#### 3.4 材質の幅

低剛性材（メラミンフォーム）を使用した場合でも、無補強と比較して大幅な改善効果が得られることが確認された<sup>9)</sup>。また、高比重材は沈下抑制効果が最も高く（沈下0.0mm）、浮力対策としても有望である<sup>6)・10)・12)</sup>。設計的配慮により衝撃応答も管理可能と考えられ、材料選択の幅が広いことがFS工法の強みである。

### 4. 今後の課題

FS工法の実務適用と普及に向けて、以下の課題が明らかになった。

#### 4.1 高比重材料使用時の効果と課題

##### (1) 効果

- ・沈下をほぼゼロに抑制し、走行性確保の観点で最も優れた性能を示す。
- ・浮力発生時の安定性向上に寄与（上部・一部配置で構造全体を安定化）。
- ・新設橋梁の巻込みRC・階段等の高比重周辺部材の実績から、適切な設計・施工が行われれば大きな問題は生じにくいと考えられる。

##### (2) 課題

- ・局所的な衝撃応答（～5000Gal）の発生メカニズム解明。
- ・緩衝材の配置、桁端クリアランス、緊結金具、荷重分散ディテールの最適化。
- ・実橋での挙動確認の継続。

#### 4.2 三次元入力・横断方向挙動

これまでの実験は橋軸方向の一次元入力を中心であり、実際の地震動に含まれる横断方向成分やねじれ連成の影響は未検証である<sup>9)</sup>。三次元入力での検証と、それに対応した評価指標の拡張が必要である。

#### 4.3 材料相似・長期耐久性

模型実験で使用した代替材（ポリエチレンフォーム等）と実材（EPS・ウレタン）の間には、繰返し特性、ひずみ依存性、クリープ挙動等に差異がある可能性がある<sup>6) 10) 12)</sup>。また、実橋における長期耐久性（吸水、接着界面の劣化、紫外線劣化等）についても、継続的な評価が必要である。

#### 4.4 浮力・冠水条件の体系化

高水位・地下水位変動時の浮力作用に対し、高比重化、緊結、排水・圧抜き複合設計指針を整備する必要がある<sup>12)</sup>。特に河川橋梁や沿岸部の橋梁では、冠水時の挙動を含めた検討が重要である。

#### 4.5 施工品質・検査

充填の連続性、空隙の有無、界面の一体化がFS工法の性能を左右する鍵である。施工管理手順と出来形検査の標準化、簡易モニタリング（段差計測、内部センサー等）の導入が必要である。

### 5. 将来への提言

FS工法は単なる「桁下埋戻」を超え、多くの可能性を秘めている。将来への提言を以下に示す。

#### 5.1 設計・施工の標準化

レベル2地震動後の走行性（段差<2.8 mm相当）を目標性能に据え、全空間充填を基本とする設計要領を整備する。浮力対策、衝撃対策、ボックスカルバート併設時の連続充填等の条件別設計指針を含める。

#### 5.2 実橋実証とライフサイクルコスト評価

パイロット適用により、実橋での性能、工期、交通影響、コストを可視化し、従来工法（鋼板巻き立て、RC巻き立て等）に対するライフサイクル優位性を定量的に示す。

#### 5.3 人材育成・施工研修

地方施工会社・自治体向けに施工講習、簡易マニュアル、動画教材を展開し、技術者不足下でも適切な施工が可能な体制を構築する。

#### 5.4 政策支援

国土交通省の新技术情報提供システム（NETIS）への登録や個別補助制度の活用・拡充により、公共工事への採用を促進する。特に、南海トラフ地震や首都直下地震の想定地域での導入を優先的に推進する。

## 5.5 デジタル維持管理との融合

充填材内部にセンサーを埋め込み、地震後の変位や空隙発生をモニタリングすることで、技術者不足の自治体でも遠隔で健全性を判断できるシステムへと発展させる。簡易計測と連携した点検・モニタリング枠組みにより、地震後の機能確認を迅速化する。

## 5.6 複合機能空間の創出

ボックスカルバート併設時の安全性が確認されたことから、桁下を単に埋めるだけでなく、水路・歩道・配管スペースとして活用しながら耐震補強を行う「機能維持+補強」のハイブリッド工法としての展開が期待される。

## 6. 結 論

以上をまとめると次のようになる。

- (1) 2021年から2025年にかけて実施された一連の研究により、フォームサポート工法はレベル2地震動に対しても極めて高い耐震性能（走行性維持）を有することが実証された。また、研究の経過を追うごとに、評価手法は精緻化し、適用範囲は拡大してきた。
- (2) 特に1G場振動台を用いた定量的評価により、桁下全空間の連続充填が最も確実に走行性を確保できること、部分充填や低剛性材でも無補強より走行性を大幅に改善すること、ボックスカルバート併設時も適切な連続充填で同等性能が得られることが明らかになった。
- (3) 今後は、高比重材併用時の衝撃対策の詳細解明、三次元挙動の検証、材料相似と長期耐久性の評価、浮力条件での設計整理、施工品質管理の標準化といった残された課題を解決することで、国土強靱化に資する信頼性の高い工法として社会実装が進むことが期待される。

謝 辞：本研究の進展にあたり、茨城大学 安原一哉名誉教授、および（一社）地域国土強靱化研究所「LRRI」には研究当初より多大なご助言・ご指導を賜りました。ここに深甚なる感謝の意を表します。また、第2期以降の実験において振動台設備の提供と運用にご協力いただいた東亜建設工業株式会社の関係各位にも厚く御礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：老朽化の現状・老朽化対策の課題  
<https://www.mlit.go.jp/road/sisaku/yobohozen/torikumi.pdf>
- 2) 株式会社 JSP：フォームサポート工法  
<https://www.co-jsp.co.jp/product/kentiku/foamsupport/>
- 3) 池澤雄之介ほか：フォームサポート工法により補強された橋梁の1G場振動台による耐震性評価，第48回土木学会関東支部技術研究発表会，III-18，2021.
- 4) 池澤雄之介ほか：フォームサポート工法により補強された橋梁の1G場振動台実験，第49回土木学会関東支部研究発表会，III-14，2022.

- 5) 川崎綾太ほか：FS 工法共研最終報告会「軽量地盤材料を用いた耐震補強の性能評価に関する研究」，2024. (FS 工法共研最終報告会 2-2.pdf)
- 6) 東亜建設工業ほか：フォームサポート工法に関する模型実験 2023 年度業務報告書，2024. (フォームサポート工法：論文まとめ.pdf)
- 7) 井合 進：1G 場での地盤・構造物系の模型振動台実験の相似則について，地震工学研究発表会講演概要，第 19 巻，pp.341-344, 1987.
- 8) 常田賢一・小田和広：道路盛土の耐震性能評価の方向性に関する考察，土木学会論文集 C，Vol.65, No.4, pp.857-873, 2009.
- 9) 川崎綾太ほか：EPS により補強された橋梁のレベル 2 地震動に対する耐震性評価，第 59 回地盤工学研究発表会，NO.23-11-4-02，2024.
- 10) 川崎綾太ほか：EPS を活用した橋梁中詰め工法の補強効果に関する材質の影響，第 60 回地盤工学研究発表会，NO.24-10-4-06，2025.
- 11) 川崎綾太ほか：水路や道路を横断する橋梁に対し EPS を活用し補強した際の耐震性，土木学会第 80 回年次学術講演概要集，2026. (予定)
- 12) 株式会社 JSP：フォームサポート工法 製品資料 (2023.04) . (フォームサポート工法 202304-2.pdf)