

## 報告

## 合成桁床版ハンチ部水平切断後の再合成に用いる ずれ止めの合成作用に関する検討

安藤聡一郎\*, 白水晃生\*, 山浦明洋\*, 丈達康太\*\*, 富井孝喜\*\*\*, 青木峻二\*\*\*

\* (株) 横河ブリッジ, 技術本部コンクリート技術部 (〒261-0002 千葉県千葉市美浜区新港 88)

\*\* (株) 大林組, インフラ大規模更新プロジェクト・チーム (〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2)

\*\*\* (株) 大林組, 生産技術本部リニューアル技術部 (〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2)

床版取替工事では, 社会的かつ環境的負荷を極小化できる既設床版の撤去工法が求められている. 本研究では, 合成桁の床版取替工事において交通規制期間を極力短くするため, 床版ハンチ部を水平切断した後に, 専用治具により桁と床版を連結し, 再度合成桁化する工法を新たに開発した. 本稿では, 専用治具のずれ止めとしての性能を確認する要素試験と, 本工法を実橋に適用した際の合成作用を解析的に検討した結果を報告する.

キーワード: 床版取替, 合成桁, ずれ止め, 再合成化

### 1. はじめに

昨今, 道路橋床版取替工事が増加する中, より急速な床版撤去工法の必要性が高まっている.

これまで筆者らは合成桁の床版取替工事における急速施工を目的に, 床版下面に設置した超低空頭の乾式水平切断装置により, ずれ止めを含むハンチ部を水平切断して, 桁と床版を切り離す工法を開発した<sup>1)</sup>(図-1 参照). この工法は従来工法と比較して, 安全・環境に配慮しながら効率的に全体工期を短縮することが可能である.

本工法から発展して, 交通開放下で桁と床版が切り離された後の主桁に生じる応力超過に対する補強方法として, 床版と主桁を専用治具により連結し, 再度合成桁化(以下再合成化)する工法を開発を進めている.

再合成化の利点として, 通常は交通規制後に行われる床版撤去作業において, 交通規制前に先行してハンチ部を水平切断後, 再合成化することで, 規制期間の短縮と規制後の作業の効率化が可能となる点が挙げられる. 再合成化用治具の構造を写真-1 に示す. 基本構造は, 桁とハンチ部で切り離した床版に対して, 上フランジ下面に上向き溶植した M20 スタッドボルト (F8T 相当) と, 床版に上向き施工したあと施工アンカーにより, 桁側と床版側に各 1 基ずつアングル (等辺山形鋼 150×150×15) を取り付け, アングル同士を M20 高力ボルトにより締結した構造である. なお, 提案治具は本切断装置によるハンチ部の切断後から床版撤去まで適用することを想定している.

筆者らは, これまでに支間 8m の単純合成 2 主桁の

モックアップ橋梁に対してハンチ部の水平切断後の再合成化の実証試験を行い, 桁と床版が分離した状態から合成桁への部分的な断面性能の回復を確認した<sup>1)</sup>.

本稿では, 再合成化用治具のずれ止めとしてのせん断挙動を確認する押抜き試験と計測結果を用いたパラメトリック解析による実橋に適用した際の合成作用について検討した結果を報告する.

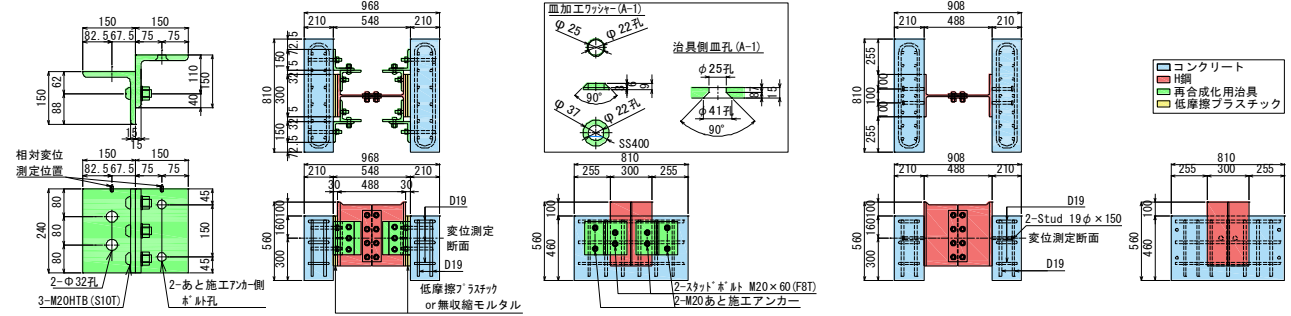


図-1 ハンチ部水平切断工法概要図

写真-1 再合成化用治具

表-1 試験ケース

| ケース | 形式      | 桁側固定方法             | ずれ止め構造                     |          |           |                   | 間詰め材料            | 試験体数             |   |
|-----|---------|--------------------|----------------------------|----------|-----------|-------------------|------------------|------------------|---|
|     |         |                    | アンカーボルト                    | 穿孔径 (mm) | 埋込長さ (mm) | 接着剤               |                  |                  |   |
| A-1 | 再合成化用具  | 高力スタッドボルト M20(F8T) | 全ねじボルト M20×220 S45C        | φ24      | 160       | 変性ビニルエステル系 (カプセル) | 皿加工ワッシャー + φ25皿孔 | 3                |   |
| A-2 |         |                    |                            | φ24      |           |                   |                  | 3                |   |
| A-3 |         |                    |                            | φ32      | 90        |                   | エポキシ樹脂系 (注入式)    | 平ワッシャー + M20タップ孔 | 3 |
| A-5 |         |                    |                            | φ22      |           |                   |                  |                  | 3 |
| B   | 頭付きスタッド |                    | 頭付きスタッド 19φ×150 (片側2本合計4本) |          |           |                   | 3                |                  |   |



(a)再合成化用具

(b)試験体 ケース A-1~5

(c)試験体 ケース B

図-2 試験体概要

## 2. 再合成化用具の押抜き試験

### 2.1 試験概要

押抜き試験は提案用具の橋軸方向せん断力に対するせん断挙動、特にせん断耐力とずれ定数（水平せん断剛性）の把握のため実施した。本試験はJSSCの押抜き試験方法(案)<sup>2)</sup>を参考に試験体形状・荷重方法を決定した（表-1、図-2、図-3参照）。試験ケースははずれ止めが再合成化用具のケース A-1、A-2、A-3、A-5 と 19φ×150（片側2本計4本）の頭付きスタッドのケース B とした。提案用具のケース A では、3タイプのと施工アンカー側の構造の異なる提案用具を用意した。A-1、A-2 は床版下付アングル側ボルト孔が皿ざぐり加工で、ワッシャーが45°のテーパ加工がされており、アンカー孔位置の誤差を吸収しやすい構造とした。A-3 は M20 タップ孔を設けた床版下付アングルに予めアンカーボルトを固定して、エポキシ樹脂を充填したアンカー孔に挿入するだけで設置が可能な現場施工性を重視したタイプである。A-5 はエポキシ樹脂を併用した芯棒打込み式アンカーであり、穿孔径および埋込深さを縮小することで、樹脂量を減らし価格を押さえ、なおかつ樹脂の硬化を待たずとも連結可能なため、コストと施工速度に優れたタイプである。ケース A-1、A-3、A-5 は、実施工ではワイヤーソーの水平切断跡にあたる床版と H 鋼間の隙間に、低摩擦のプラスチック板（超高分子ポリエチレン製、S45C に対する静摩擦係数約 0.04）を 2 枚挿入し摩擦を低減した。ケース A-2 は隙間を無収縮モルタルで間詰めた。一方、ケース B はコンクリートと H 鋼の接触面にグリスを塗布し、付着を低減した。試験

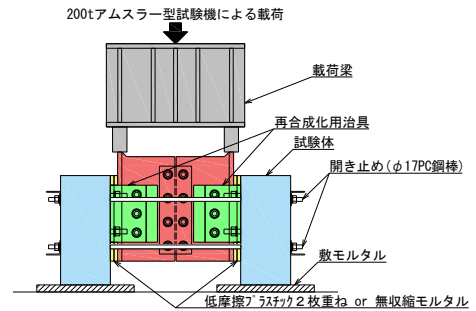


図-3 試験体荷重状況

体は各3体ずつ実施し、内2体を単調荷重、内1体を漸増荷重荷重とした。コンクリートは設計基準強度 24N/mm<sup>2</sup>の普通コンクリートを使用し、試験日のコンクリート強度を圧縮強度試験で確認した。計測項目は荷重荷重、H 鋼とコンクリートのずれ変位及びコンクリート側（床版下付）アングルとコンクリート、H 鋼側（桁付）アングルと H 鋼の鉛直方向相対変位とした。

### 2.2 試験結果

#### (1) せん断耐力とずれ定数

試験より得られたせん断荷重-ずれ変位関係を図-4 に示す。ここでは各ケース1体（単調荷重）の結果を示す。図-4 に示すせん断荷重は頭付きスタッド1本当たりあるいは提案用具1基（図-2(a)）当たりで換算したせん断荷重で、荷重荷重の 1/4 である。ずれ変位は、両ブロックに各2点ずつ合計4点の測点を設け、せん断耐力が計算上大きくなるケースを除き、ずれ定数が小さくなるブロック側の2測点のずれ変位の平均値とした。

ケース A は、変位 2~3mm でスタッドボルトの滑りが原因と推測される初期のピークが発生した後、コンクリ

ートが破壊されるまで荷重が増え続けるため、変位2~3mmの初期ピーク値を最大せん断荷重とした。ケースBは頭付きスタッドが破断する最大荷重を最大せん断荷重とした。破壊性状については次節で述べる。

表-2に試験結果をまとめて示す。表-2のA-1, A-3, A-5(間詰めが低摩擦プラスチックのケース)およびBの結果より、平均値で比較すると、提案治具の最大せん断荷重は頭付きスタッド19φ×150に対して約53~64%、降伏せん断荷重は約61~81%、ずれ定数は約50~64%程度の結果であった。桁の両側左右対称に各1基の提案治具を取り付ける場合を1セットとすると、2基分のせん断耐力・ずれ定数となるので、頭付きスタッド1本とほぼ同等のせん断耐力とずれ定数となる。ここで、変動係数を比較すると、最大せん断荷重は5%以内で安定した値であるのに対して、ずれ定数とずれ定数を用いて算出する降伏せん断荷重は比較的分散が大きくなっている。変動係数が大きい原因として、以下のような原因が考えられる。①アンカーボルトの施工誤差(樹脂注入量、設置精度など)②各治具に作用する荷重のばらつき等が考えられる。なお最大せん断荷重は軸力管理したスタッドボルトの摩擦接合の滑りが原因のため、比較的分散した結果が得られたと考えられる。

また表-2のA-1, A-2の結果より、水平切断跡の間詰めとして注入した無収縮モルタルの付着力と摩擦力によ

表-2 試験結果

| 実験ケース      | No   | 荷重方法    | $\sigma_c$<br>(N/mm <sup>2</sup> ) | $Q_{max}$<br>(kN) | $Q_y$<br>(kN) | $K_{st}$<br>(kN/mm) | 最大荷重時のイベント |
|------------|--|---------|------------------------------------|-------------------|---------------|---------------------|------------|
| A-1        | 1  | 単調      | 32.6                               | 103.9             | 62.59         | 206.4               | スタッドボルトの滑り |
|            | 2  | 単調      | 33.0                               | 100.7             | 65.93         | 123.0               | スタッドボルトの滑り |
|            | 3  | 漸増      | 33.7                               | 98.90             | 65.11         | 160.3               | スタッドボルトの滑り |
|            |  | 平均      | 33.1                               | 101.2             | 64.54         | 163.3               |            |
|            |  | 標準偏差    | 0.5                                | 2.1               | 1.4           | 34.1                |            |
|            |  | 変動係数(%) | 1.4                                | 2.1               | 2.2           | 20.9                |            |
| A-2        | 1  | 単調      | 34.1                               | 137.1             | 79.37         | 22856.7             | スタッドボルトの滑り |
|            | 2  | 単調      | 34.4                               | 140.1             | 94.15         | 2877.2              | スタッドボルトの滑り |
|            | 3  | 漸増      | 33.7                               | 141.9             | 78.90         | 2131.8              | スタッドボルトの滑り |
|            |  | 平均      | 34.1                               | 139.7             | 84.14         | 9288.6              |            |
|            |  | 標準偏差    | 0.3                                | 2.0               | 7.1           | 9598.9              |            |
|            |  | 変動係数(%) | 0.8                                | 1.4               | 8.4           | 103.3               |            |
| A-3        | 1  | 単調      | 34.8                               | 95.47             | 62.58         | 109.1               | スタッドボルトの滑り |
|            | 2  | 単調      | 34.5                               | 98.73             | 60.49         | 285.1               | スタッドボルトの滑り |
|            | 3  | 漸増      | 34.0                               | 93.49             | 44.58         | 202.5               | スタッドボルトの滑り |
|            |  | 平均      | 34.4                               | 95.90             | 55.88         | 198.9               |            |
|            |  | 標準偏差    | 0.4                                | 2.2               | 8.0           | 71.9                |            |
|            |  | 変動係数(%) | 1.0                                | 2.3               | 14.4          | 36.1                |            |
| A-5        | 1  | 単調      | 33.8                               | 85.76             | 44.07         | 130.9               | スタッドボルトの滑り |
|            | 2  | 単調      | 34.0                               | 93.60             | 49.11         | 190.5               | スタッドボルトの滑り |
|            | 3  | 漸増      | 34.0                               | 86.72             | 52.81         | 125.1               | スタッドボルトの滑り |
|            |  | 平均      | 33.9                               | 88.69             | 48.66         | 148.8               |            |
|            |  | 標準偏差    | 0.1                                | 3.5               | 3.6           | 29.6                |            |
|            |  | 変動係数(%) | 0.2                                | 3.9               | 7.4           | 19.9                |            |
| B          | 1  | 単調      | 31.2                               | 171.6             | 82.81         | 313.5               | 頭付きスタッド破断  |
|            | 2  | 単調      | 32.0                               | 168.1             | 77.98         | 286.9               | 頭付きスタッド破断  |
|            | 3  | 漸増      | 33.6                               | 155.2             | 77.55         | 325.1               | 頭付きスタッド破断  |
|            |  | 平均      | 32.2                               | 165.0             | 79.45         | 308.5               |            |
|            |  | 標準偏差    | 1.0                                | 7.1               | 2.4           | 16.0                |            |
|            |  | 変動係数(%) | 3.1                                | 4.3               | 3.0           | 5.2                 |            |
| 記号説明       |  |         |                                    |                   |               |                     |            |
| $\sigma_c$ | コンクリート圧縮強度   |         |                                    |                   |               |                     |            |
| $Q_{max}$  | 最大せん断荷重  |         |                                    |                   |               |                     |            |
| $Q_y$      | 降伏せん断荷重: $Q_{max/3}$ 荷重点(最大せん断荷重の1/3)を通る初期割線に平行なずれ量0.2mmを通る直線とせん断荷重-ずれ変位曲線の交点の荷重 |         |                                    |                   |               |                     |            |
| $K_{st}$   | ずれ定数: $Q_{max/3}$ 荷重点の初期割線剛性   |         |                                    |                   |               |                     |            |

るせん断耐力とずれ定数の大幅な向上を確認した。ずれ定数は頭付きスタッドより大きく向上しており、提案治具設置後、水平切断跡に無収縮モルタルを注入することで、更に完全合成桁に近づけることが期待できる。

(2) 試験体の破壊性状

提案治具には、載荷荷重による鉛直方向荷重と偏心による曲げモーメントが作用するため、各接合部にせん断力と曲げモーメントが作用する。図-5に試験体A-5③の漸増載荷試験における提案治具の各部位ごとの鉛直方向相対ずれの残留変位の関係を代表として示す。図-5より初期ピーク値発生前の初期段階(<86.72kN)ではアンカーボルトの変形が卓越し一部が塑性変形する。この段階では、スタッドボルトの摩擦接合が有効なため、H鋼とH鋼側アングルの相対変位はほぼ増加しない。その後初期ピーク値に近づくと、スタッドボルト側の摩擦接合が滑り初め、H鋼とH鋼側アングルの相対変位が増加し始めたとみられる。さらに荷重を増加させていくとアンカーボルトに起因してコンクリートが破壊した。なお提案治具のアンクル同士のボルト接合は試験終了までに滑ることはなかった。図-6に鋼部材を撤去したコンクリート表面の破壊性状を示す。A-5③では曲げモーメントの反力の水平力により上側のアンカーボルトは軽微な

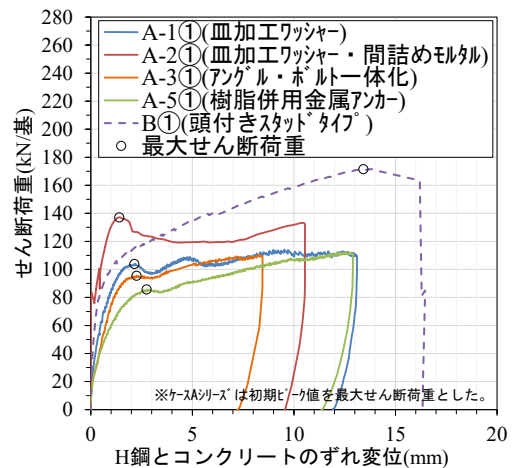


図-4 せん断荷重-ずれ変位関係

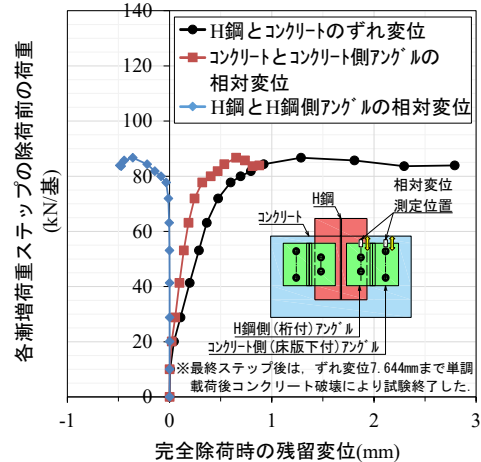


図-5 漸増載荷試験における残留変位 A-5③

コンクリートの支圧破壊によるひび割れが発生し、下側のアンカーボルトは端あき方向のコーン状破壊に起因するひび割れが発生した。なおコンクリートの破壊に関しては試験体特有の可能性はあるが、実際の床版は端あきが長く、初期ピーク値を最大せん断荷重として使用すれば設計上は安全側であるため問題ないと考えられる。

### 2.3 再合成化用具の押抜き試験のまとめ

試験結果の要点を以下にまとめる。

- 1) 再合成化用具を桁両側に各1基ずつ左右対象に2基使用した場合のせん断耐荷力とずれ定数は頭付きスタッド(19φ×150)1本分と同等以上である。
- 2) 再合成化用具の変形性状は、初期にアンカーボルトの変形が卓越し塑性変形が始まり、初期ピーク値においてスタッドボルトの摩擦接合の滑りが発生した後、荷重が増加していくと本試験体ではアンカーボルトが起因となりコンクリートが破壊した。

## 3. 一定せん断流パネル解析によるパラメトリック解析

### 3.1 解析目的と概要

2.で得られた提案用具のずれ定数は頭付きスタッド比べて小さい。そこで、実橋における提案用具を用いた再合成化工法の適用性を、端部の合成区間長とずれ定数をパラメータとしたパラメトリック解析により検討した。

本解析ではずれ定数を解析モデルに反映することが可能な一定せん断流パネル要素を利用する解析手法を採用した<sup>3)</sup>。この手法は、ずれ止めのずれ定数が小さく、たとえ不完全合成桁となっても、床版と鋼桁の弾性結合の影響を再現して格子解析を実行することが可能である。

解析モデルを図-7に示す。解析対象橋梁は、一般的な事例として、昭和40年代に建設された支間30mの単純合成3主桁橋である。橋軸方向要素長は1000mm、床版と上フランジとの図心間隔は173mm、主桁間隔は3100mm、床版厚は200mm、手前が固定支承側とした。

解析モデルは文献3)を参考に以下のように作成した。

- ① 床版と鋼桁のフランジ部材は、各図心位置で一定せん断流パネルの縁部材としてモデル化する。断面剛性は、ウェブの断面積を鋼桁の剛性に一致するようにフランジとウェブ中心の縁部材に振り分けてモデル化する。これを図-8に示す。
- ② ずれ止めのモデル化概要を図-9に示す。床版とフランジを結ぶ縁部材の剛性は断面積のみ考慮する。コンクリート床版と鋼桁との弾性結合の影響を反映する一定せん断流パネルの板厚は以下の様に求める。

なお本解析では、ずれ定数を反映したせん断変形を等価とする板厚を一定せん断流パネルの板厚 $t$ として用いる。そのため板厚 $t$ を以後、等価板厚とも呼ぶ。

コンクリート床版と鋼桁間に水平せん断力 $T$ が作用したときのずれ量 $\delta$ は、(1)式の通りである。

$$\delta = T/C \quad (1)$$

ここに、 $C$ ：単位長さ当たりの弾性結合のばね定数 (N/mm/mm)

この単位長さ当たりの弾性結合のばね定数 $C$ は、前述した押抜き試験より得たずれ定数を使用する。

一定せん断流パネルにせん断力 $T$ が作用した場合のせん断変形量 $\delta$ は、下式のとおりである。

$$\delta = T \times h / (G \times t) \quad (2)$$

ここに、 $h$ ：上フランジと床版との図心間隔(mm)

$G$ ：一定せん断流パネルのせん断弾性係数 ( $G=7.7 \times 10^4$  N/mm<sup>2</sup>)

この等価板厚 $t$ は下式より得られる。(1)、(2)式より

$$t = C \times h / G \quad (3)$$

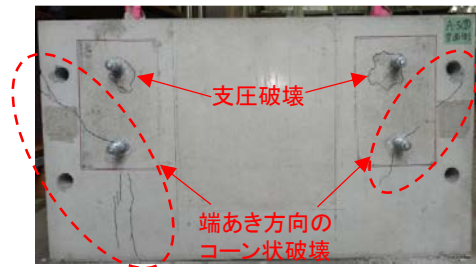


図-6 A-5③(樹脂併用アンカー)のコンクリート破壊状況

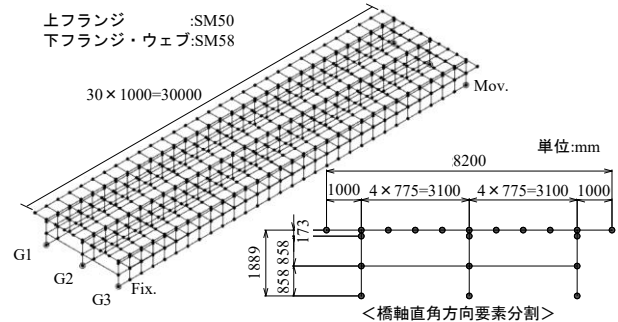


図-7 解析モデル

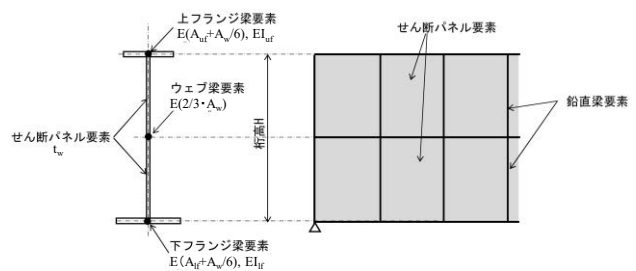


図-8 主桁のモデル化(参考文献3)を基に作成

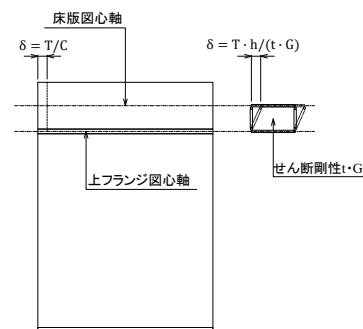


図-9 ずれ止めのモデル化

である。ここで表-3 に 2. で得られた測定結果から算出した降伏せん断荷重とずれ定数の特性値を示す。表-3 では正規分布と仮定して (I) 降伏せん断荷重は低めの値とするため非超過確率が 5%以下, (II) ずれ定数は解析結果にて後述するが, 大きい値ほどせん断力が高くなる傾向のため, 安全側に配慮して大きめの値となる非超過確率が 95%以上となる値を各特性値とした。

表-3 より A-5 のずれ定数の特性値  $C_1$  は

$$C_1=200(\text{kN/mm})$$

である。仮に 1000mm 間隔で桁の両側に各 1 基ずつ使用する場合, 単位長さ当たりの弾性結合のばね定数  $C$  は

$$C=2 \times C_1=400(\text{kN/mm/m})=400(\text{N/mm/mm})$$

である。ゆえに(3)式より等価板厚  $t$  は次のようになる。

$$t=400 \times 173 / (7.7 \times 10^4) = 0.90(\text{mm})$$

### 3.2 解析ケース

表-4 に解析ケースを示す。解析は提案治具のずれ定数と, 再合成化区間をパラメータとして 8 通りの解析を試みた。③~⑦は伸縮装置を含む端部を最後に残して施工する状況を想定したケースである。①, ②, ⑧は全橋の等価板厚を一律に変更したケースである。ここで合成桁の等価板厚  $t$  は, 表-2 のケース B の結果より,  $\phi 19$  の頭付きスタッド 1 本当たりのずれ定数を 300kN/mm とし, 30 本/m で配置すると仮定して等価板厚を 20mm とした ( $C=9000\text{kN/mm/m}$ )。非合成桁の等価板厚  $t$  は床版と鋼桁の弾性結合の度合いを示すフレキシビリティ定数  $s^4$  が理論上の非合成桁とされる  $s=7.0$  となる等価板厚の 0.090mm とした。荷重条件は①活荷重 (TL-20) と②温度差荷重 +10°C (鋼桁 < 床版) の 2 ケースを解析した。

### 3.3 解析結果

#### (1) ずれ止めに作用する橋軸方向せん断力

図-10, 11 にずれ止めに作用する橋軸方向せん断力分布を示す。図-10, 11 の横軸は, 橋軸方向で支間中央から端部までの 15m の範囲を示している。また一定せん断流パネル要素のため階段状のグラフで示した。図-10 の①, ⑧より, 再合成化を全橋実施した場合, 完全合成桁よりも低いせん断力が得られた (支間中央から 15m 位置で -58.7%)。図-10 の③, ④, ⑤より, 端部の合成区間が長いほど再合成化区間の負担する水平せん断力は小さくなる傾向がある。図-10 の④, ⑥, ⑦より, 提案治具のずれ定数が高いほど提案治具の負担するせん断力は大きくなった。図-10 より④のせん断力分布に対して, ばね定数  $C$  が 2 倍である⑥の同位置のせん断力の大きさを比較すると再合成化区間 (支間中央 ~ 12m) で +6.5 ~ +33.6%であった。一方で, ばね定数  $C$  が 0.5 倍である⑦と比較すると, 再合成化区間で -29.6 ~ -11.2%であった。なお図-10③~⑦より端部を残して再合成化を行う場合, 合成区間と再合成区間の境界付近のせん断力が急増するが, より正確な評価には詳細にモデル化する必要がある。

また図-11 より温度差荷重による水平せん断力は, 端部の合成区間が短い③のケースが最も大きい, ①完全

表-3 降伏せん断荷重とずれ定数の特性値

|              | 降伏せん断荷重<br>$Q_y(\text{kN})$ |       |       | ずれ定数<br>$K_s(\text{kN/mm})$ |       |       |
|--------------|-----------------------------|-------|-------|-----------------------------|-------|-------|
|              | A-1                         | A-3   | A-5   | A-1                         | A-3   | A-5   |
| 平均値          | 64.54                       | 55.88 | 48.66 | 163.3                       | 198.9 | 148.8 |
| 標準偏差         | 1.4                         | 8.0   | 3.6   | 34.1                        | 71.9  | 29.6  |
| 特性値          | 62                          | 42    | 42    | 220                         | 320   | 200   |
| 特性値の非超過確率(%) | 3.7                         | 4.2   | 3.2   | 95.2                        | 95.4  | 95.8  |

表-4 解析ケース

| ケース | 非再合成<br>区間 | 再合成<br>区間 | 等価板厚 $t(\text{mm})$ |       |                    |
|-----|------------|-----------|---------------------|-------|--------------------|
|     |            |           | 合成                  | 非合成   | 再合成                |
| ①   | 全橋         | -         | 20                  | -     | -                  |
| ②   | 全橋         | -         | -                   | 0.090 | -                  |
| ③   | 端部 1m      | 中間部       | 20                  | -     | 0.90               |
| ④   | 端部 3m      | 中間部       | 20                  | -     | 0.90               |
| ⑤   | 端部 5m      | 中間部       | 20                  | -     | 0.90               |
| ⑥   | 端部 3m      | 中間部       | 20                  | -     | 1.80 <sup>*1</sup> |
| ⑦   | 端部 3m      | 中間部       | 20                  | -     | 0.45 <sup>*2</sup> |
| ⑧   | -          | 全橋        | -                   | -     | 0.90               |

※1:  $C=400(\text{N/mm/mm})$  図の凡例では 2 バネと表現

※2:  $C=100(\text{N/mm/mm})$  図の凡例では 0.5 バネと表現

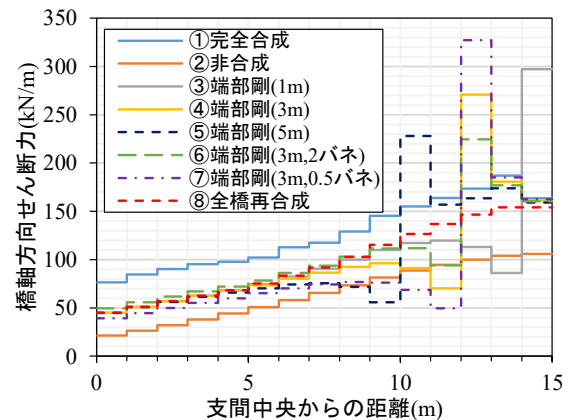


図-10 活荷重による橋軸方向せん断力分布(G1)

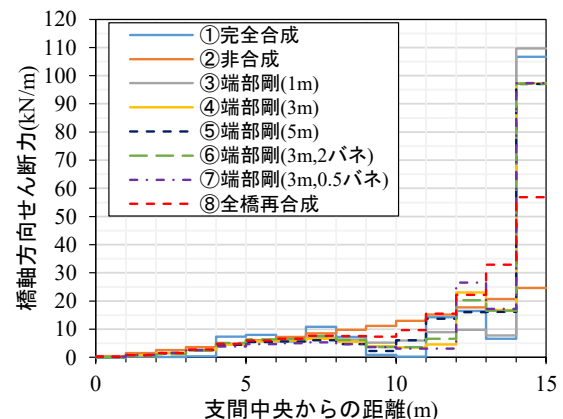


図-11 温度差荷重による橋軸方向せん断力分布(G1)

合成桁のケースに比べて約3.0kN/mの増加である。

ここでA-5タイプを用いる場合を例に、設計せん断耐力の考え方の一例を述べる。表-3より提案治具1基当たりの降伏せん断荷重の特性値は42kNである。

仮に安全率を3すると、提案治具の1セット当たりの設計せん断耐力 $Q_d$ は

$$Q_d = 2 \times 42.0(\text{kN}) / 3 = 28(\text{kN})$$

となり、これに応じて提案治具を配置すれば良い。ここでは左右2基で1セットとして計算した。

例えば提案治具を500mm間隔で配置すれば1m当たりの設計せん断耐力は56kN/mとなる。配置は一般的なずれ止めと同様にせん断力が高い端部を密な配置とする方が効率的であるが、配置（ばね定数）によって橋軸方向せん断力分布が変化することに留意する必要がある。

## (2) 上下フランジの主桁応力度の比較

最も軸力が大きい支間中央の上下フランジの軸力をフランジの断面積で割った応力度を表-5に示す。

表-5の④、⑥、⑦より活荷重による支間中央部の上フランジの応力度は、ずれ定数が高いほど小さくなる。また表-5の③、④、⑤より再合成区間の範囲の影響は、本解析で設定した範囲ではほぼない。一方で、活荷重による下フランジの応力度、温度差荷重による上下フランジの応力度は再合成化の影響は少ない。

ここで、上フランジの再合成化による活荷重の応力度について検討する。表-5より①完全合成桁と再合成化したケースとの差は最大でも⑦ずれ定数を低い場合の14.4N/mm<sup>2</sup> (=  $\Delta\sigma_{\text{⑦①}}$ ) である。ここでSM50材の許容応力 $\sigma_a$  (186N/mm<sup>2</sup>) より、 $\Delta\sigma_{\text{⑦①}}/\sigma_a$ は約7.7%である。参考文献5)では既往の検討結果から一般的な多主桁橋では、格子解析で算出した主桁応力は実測応力よりも安全側の値を示すとして、主桁応力が20%程度制限値を超えない場合は主桁補強を検討しなくても良いとしている<sup>5)</sup>。本ケースでは、 $\Delta\sigma_{\text{⑦①}}/\sigma_a$ は約7.7%と小さく、上記方針に照らし合わせれば鋼桁を補強せずに再合成化できる可能性が高いと考えられる。一方で、架設時の一時的な構造物であることや提案治具の設置期間が短いことから、施工時の許容応力の割増が道路管理者に認められた場合、

治具配置間隔をより広くできるほか、更に余裕をもって再合成化できる。その割増係数を仮に1.25とすると、許容応力の増分値 $\Delta\sigma_a$ は46.5N/mm<sup>2</sup>である。 $\Delta\sigma_{\text{⑦①}} < \Delta\sigma_a$ であるため、この場合も再合成化時の鋼桁の補強は必要ないと考えられる。

## 3.4 考察

3.3(1)より提案治具のずれ定数を高くすると、提案治具に作用するせん断力が大きくなる。そのため提案治具のタイプ・配置間隔を変更して、せん断耐力が許容値以下になるずれ定数を設定すれば、再合成化後、床版上を車両が走行しても問題ないと考えられる。また前述の通り治具配置によりせん断力分布が変化する点に留意して実施工の荷重状態を想定して設計し、応力超過する場合は必要に応じて鋼桁の補強等の対策やレーン載荷により活荷重を低減して検討することが考えられる。

## 4. おわりに

以下に検討結果をまとめる。

- ・提案した再合成化用治具のずれ定数と設計耐力をJSSCの押抜き試験法に準拠して確認した。
- ・設計で用いる再合成化用治具のずれ定数と降伏せん断荷重を提案した。
- ・押抜き試験の結果を反映したパラメトリック解析により、再合成化は可能であると判断できた。
- ・提案治具を用いて再合成化を行う場合、上フランジの応力度は増えるが、本解析ケースでは桁の補強は必要がない可能性が高いことが分かった。

実際に本工法を適用する場合、提案治具は最大せん断荷重後も耐力が低下しないが、モニタリングと併用して再合成化を行えば、より安全に適用可能と考えている。

## 参考文献

- 1) 青木峻二, 大場誠道, 丈達康太, 神田憲成, 白水晃生, 山浦明洋, 安藤聡一郎, 藤尾浩太: 合成桁床版ハンチ部水平切断工法と切断後の再合成化工法に関する実物大実験, 土木学会第75回年次学術講演会, 2020.
- 2) (社)日本鋼構造協会: 頭付きスタッドの押抜き試験方法(案)とスタッドに関する研究の現状, JSSCテクニカルレポートNo.35, 1996.
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所: 鋼道路橋の合理的な設計解析手法に関する研究 - 一定せん断流パネルを主体とした鋼道路橋の設計手法 -, 国総研資料第841号, 2015.3.
- 4) 小松定夫, 佐々木孝: 不完全合成格子桁橋の理論と近似計算法について, 土木学会論文報告集, 第329号, pp.27-37, 1983.
- 5) 中日本高速道路(株): 既設鋼橋の床版取替えに関する設計方針(案), 2017.

(2020年7月17日受付)

表-5 支間中央部の上下フランジ応力度

| 解析ケース            | フランジ応力度(N/mm <sup>2</sup> ) |       |       |       |
|------------------|-----------------------------|-------|-------|-------|
|                  | 活荷重                         |       | 温度差   |       |
|                  | U-Flg                       | L-Flg | U-Flg | L-Flg |
| ① 完全合成           | -9.0                        | 89.1  | 19.3  | -4.7  |
| ② 非合成            | -52.7                       | 98.4  | 15.4  | -3.8  |
| ③ 端部剛(1m)        | -17.9                       | 91.1  | 19.1  | -4.7  |
| ④ 端部剛(3m)        | -17.9                       | 91.1  | 19.1  | -4.7  |
| ⑤ 端部剛(5m)        | -17.8                       | 91.1  | 19.1  | -4.7  |
| ⑥ 端部剛(3m, 2パネ)   | -14.0                       | 90.3  | 19.2  | -4.7  |
| ⑦ 端部剛(3m, 0.5パネ) | -23.4                       | 92.3  | 18.9  | -4.6  |
| ⑧ 全橋再合成          | -17.9                       | 91.0  | 19.1  | -4.7  |