

## 橋梁の急速施工におけるプレキャストコンクリート床版と桁の新たな接続方法（後編） — Precast concrete deck-to-girder mechanical connection for accelerated bridge construction —

著：George Morcouc, Raed Tawadrous  
訳：会誌編集委員会海外部会

橋梁の急速施工に採用可能で、従来の方法に比べてせん断抵抗性能が25%向上したプレキャストコンクリート床版（以下、PCa床版）とプレキャストプレストレストコンクリート桁（以下、PC桁）の新たな機械的接続方法を開発した。本稿では、新しい接合方法の設計概要、新たな接合方法と従来方法を比較した実験的研究、および新型ジベル孔における設計例について報告する。後編では、新たな接合方法と従来方法を比較した実験的研究の結果と考察、新型ジベル孔の設計例について報告する。

キーワード：プレキャストコンクリート床版、ジベル孔、合成構造、急速施工

### 3. 実験的研究（後編）

前編に引き続き実験的研究について報告する。

新型ジベル孔を有する押抜きせん断用試験体の製作手順を図-7に示す。コンクリートブロック上に厚さ76.2 mm (3 in.) の角材でハンチの型枠を配置し、その内側に一方方向に13 mm (#4) の鉄筋4本とその直角方向に13 mm (#4) の鉄筋2本を用いて補強している。次に、PCa床版をハンチ型枠上に配置し、ずれ止めをジベル孔内に収まるようにした。CSP試験体においても、ここまでの2ステップは同様の手順で製作を行った。ジベル孔内側に配置された中空の四角部材（以下、鋼製HSS）は、溶接されたフープ筋で支持した。その後、ジベル先端に構造用のワッシャーと六角ナットを取り付け、HSSを固定し、PCa床版に過度な力が加わらないようにナットを緊結した。最後に609.6 mm (24 in.) のス

ランプフローを有した41.4 MPa (6 ksi) の自己充填コンクリート（以下、SCC）をジベル孔とハンチ部に充填し、一体化した。CSP試験体の場合、SCCは101.6 mm (4 in.) のグラウト注入口を通して打ち込んだ。新型ジベル孔における試験体の詳細図とCSP試験体の詳細図をそれぞれ図-8および図-9に示す。

図-10に押抜きせん断試験の実施状況を示し、試験で使用した主な機材について以下に示す。

- ・一方から反力台に、反対側から水平鋼梁に固定された2本の水平方向ジベルから構成されている支持材
  - ・試験体の回転を防ぐために床版に固定されたH鋼
  - ・油圧ジャッキ、ロードセル、載荷板
  - ・コンクリート床版とコンクリート桁の間における相対変位を測定する線形可変差動変圧器（以下、LVDT）
- 1779.2 kN (400 kip) の油圧ジャッキと鋼梁を用いて、コンクリート床版の中央に水平荷重を載荷した。破壊に



図-7 新型ジベル孔における製作手順

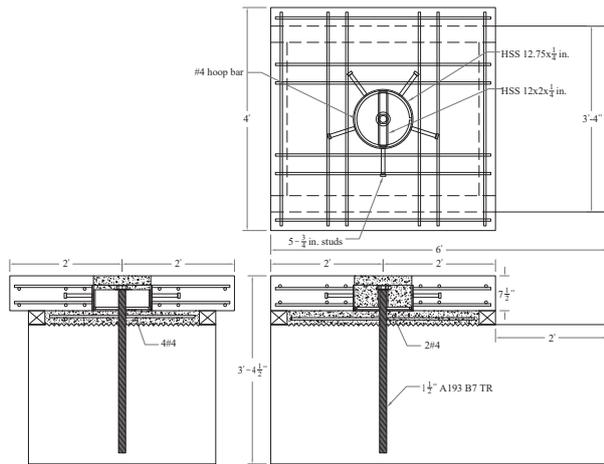


図 - 8 新型ジベル孔における試験体の詳細図

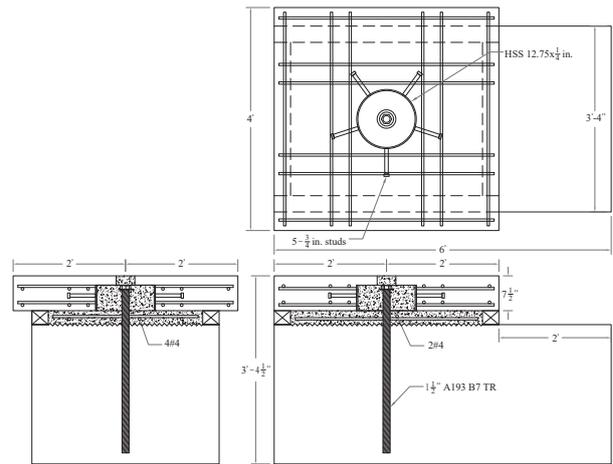


図 - 9 CSP 試験体の詳細図

至るまでは、荷重は約 17.8 kN/s (4 kip/sec) の速度で徐々に載荷した。コンクリートブロックに対するコンクリート床版の水平および垂直変位は、LVDT を水平に 2 箇所、垂直に 1 箇所設置し測定した。4 体の試験体の荷重変位測定値を図 - 11 および図 - 12 のように記録、平均化、およびプロットした。

図 - 11 に、水平方向の荷重変位曲線を示し、図 - 12 に、垂直方向の荷重変位曲線を示す。また、機械式接合の 2 体の試験体を MCSP-1 および MCSP-2 で示し、従来の CSP 接合の 2 体の試験体を CSP-1 および CSP-2 で示している。

図 - 11 および図 - 12 に示す荷重変位曲線では、3 段階の特徴的な界面せん断挙動が示された。1 段階目では、グラフの傾きが大きく 0.254 mm (0.01 in.) 未満と相対変位が小さい線形部分で、これはコンクリートの界面せん断抵抗の付着成分を表す。2 段階目では、傾斜が緩やかで最大 2.54 mm (0.1 in.) と相対変位が大きい折れ線部分で、これはジベルと骨材のかみ合せの締付け力による界面せん断抵抗の摩擦成分を表す。3 段階目では、残りの非線形部分で、最大 43.2 mm (1.7 in.) と相対変位が大きく、これはダウエル効果として知られるジベルの曲げに対する抵抗を表す。MCSP 接合の試験体の場合、この 3 段階目では、ジベルが機械式接合により固定され、ダウエル効果が界面のせん断抵抗に寄与するため、大きな変形が発生した後完全にせん断破壊に至るまで、かなりの荷重の増加を伴った。一方で、CSP 接合の試験体の

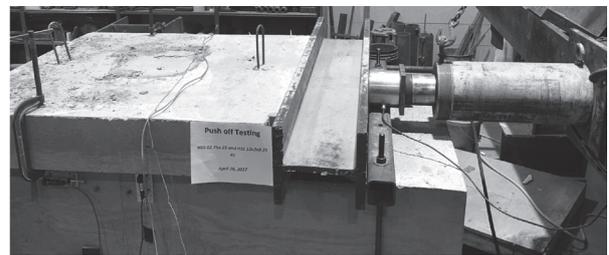


図 - 10 押抜きせん断試験の実施状況

場合、ジベルが完全に固定されていないため、3 段階目で耐荷重性能が低下し、小さな変位でコンクリートの脆性的な破壊が生じた。CSP 接合では、ジベルのダウエル効果が発揮されず、そのせん断抵抗力はジベル孔を埋めたグラウトまたはコンクリートの強度に依存していたため、脆性的な破壊に至った。

2 種類の MCSP 接合の平均最大耐力は 856.24 kN (192.5 kip) であり、この時点の水平および垂直変位の平均値は、それぞれ 42.42 mm および 10.67 mm (1.67 in. および 0.42 in.) となった。2 種類の CSP 接合の平均最大耐力は 686.3 kN (154.3 kip) であり、この時点の水平および垂直変位の平均値は、それぞれ 2.54 mm および 2.286 mm (0.1 in. および 0.09 in.) となった。これは、MCSP 接合が CSP 接合よりも平均 25% 高い界面せん断抵抗を有し、機械式接合により固定されたジベルのダウエル効果により高い延性を示し、グラウトまたはコンクリートの強度への依存を低減したことを示す。

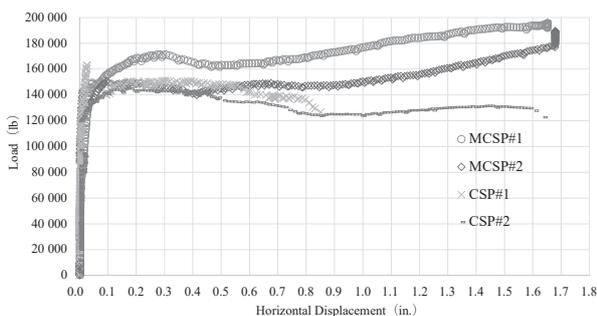


図 - 11 4 体の試験体の荷重変位曲線 (水平変位)

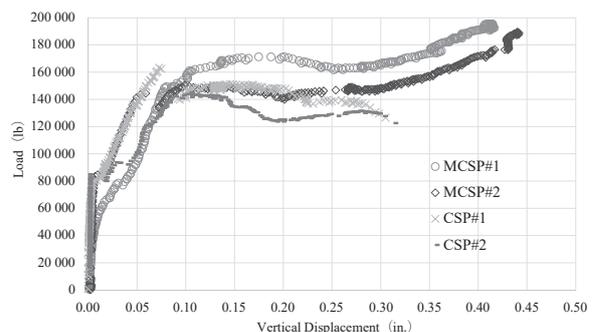


図 - 12 4 体の試験体の荷重変位曲線 (垂直変位)



図 - 13 MCSP 接合におけるせん断破壊状況



図 - 14 CSP 接合におけるコーン破壊状況

図 - 13 および図 - 14 に、MCSP 接合と CSP 接合の破壊形態を示す。MCSP 接合は、ジベル孔またはハンチ内のコンクリートに損傷を与えることなく、ジベルおよび接続部がせん断破壊に至った。CSP 接合は、ジベル孔周辺がコンクリートの脆性的なコーン破壊に至った。なお、すべての試験体のハンチおよびジベル孔周辺のグラウトに使用された SCC は、試験時の平均圧縮強度が 44.8 MPa (6.5 ksi) であった。

#### 4. 設計例

2 種類の接合方法のせん断抵抗を推定するために、実橋への設計例が実施された。新たな接合方法は、PCI Bridge Design Manual の橋梁設計例<sup>1)</sup>のために設計された。対象橋梁の上部構造は、中心間隔 2.7 m (9 ft.) で配置された 6 本の BT-72 桁で構成されている (図 - 15)。PCa 床版は PC 桁と完全に合成して機能するように設計されており、すべての死荷重、活荷重、および衝撃のすべての組み合わせに抵抗する。設計活荷重は HL-93 であり、橋梁は 1 径間 36.6 m (120 ft.)、全幅 15.4 m (51 ft.) である。

対象橋梁の分析の結果、合成断面に作用する全荷重により発生する着目断面の水平せん断力  $V_h$  が 0.323 kN/m (2.86 kip/in.) であることがわかった。ジベル孔は、主桁ラインに沿って 1 219 mm (48 in.) 間隔で配置されているため、最小界面せん断抵抗  $V_{ni}$  (ジベル孔 1 箇所あたり) は 0.9 の抵抗低減係数  $\phi$  を使用して次のように推定された。

$$V_{ni} = \frac{V_h}{\phi} = \frac{2.86 \times 48}{0.9} = 152.5 \text{ kip (678.3 kN)}$$

ジベルを設計するために、PCa 床版、ジベル孔、およびハンチ部における材齢 28 日の最小コンクリート圧縮強度を 41.4 MPa (6 ksi) に設定した。ジベル孔は、ASTM A500<sup>2)</sup> のプレート B の HSS 324 mm × 6.35 mm (12.75 in. × 0.25 in.) を用いて成型されるため、界面せん断面積は 76 039 mm<sup>2</sup> (117.86 in.<sup>2</sup>) となる。直径 38.1 mm (1.5 in.) の ASTM A1939、プレート B7 ジベルを用いたため、1 箇所あたりの断面積が 910 mm<sup>2</sup> (1.41 in.<sup>2</sup>) となる。これらは、前章の実験的研究で試験を行った接合方法と同様の性能をもつ。

AASHTO LRFD Bridge Design Specifications<sup>3)</sup> (以下、AASHTO LRFD Specifications) 5.8.4 によると、打継目の

ないコンクリート床版下端における界面せん断抵抗は次のように算出される。

$$\begin{aligned} V_{ni} &= cA_{CV} + \mu (A_{VF}f_y + P_c) \\ &= 0.4 \times 117.86 + 1.4 (1.41 \times 60 + 0.0) \\ &= 165.6 \text{ kip (736.6 kN)} \end{aligned}$$

ここで、

$c$  = 付着係数

$A_{CV}$  = 界面せん断の伝達に関与していると考えられるコンクリートの断面積

$\mu$  = 摩擦係数

$A_{VF}$  =  $A_{CV}$  内のせん断面と交差する界面ジベルの断面積

$f_y$  = 界面ジベルの降伏応力 (60 ksi 以下)

$P_c$  = せん断面に作用する永久圧縮力

設計で使用されるせん断抵抗  $V_{ni}$  は、次のいずれの値以下とする。

ここで、

$$V_{ni} \leq K_1 f'_c A_{CV} = 0.25 \times 6.5 \times 117.86 = 191.5 \text{ kip (851.8 kN)}$$

$$V_{ni} \leq K_2 A_{CV} = 1.5 \times 117.86 = 176.8 \text{ kip (786.4 kN)}$$

ここで、

$K_1$  = 界面せん断に抵抗するために用いられるコンクリート強度

$K_2$  = 最大界面せん断抵抗係数

$f'_c$  = 指定されたコンクリート圧縮強度

したがって、 $V_{ni}$  は 736.6 kN (165.6 kip) であり、これは CSP 試験体の推定耐力を示し、必要な強度である 678.3 kN (152.5 kip) よりも大きくなる。

Hatami<sup>4)</sup> によると、接合部のダウエル効果は、次のように界面せん断抵抗に寄与する。

$$\begin{aligned} V_{dowel} &= \frac{knf_d d_b^3}{3.5 l_a} \leq \frac{A_{VF} f_d}{\sqrt{3}} \\ V_{dowel} &= \frac{2 \times 1 \times (105 - 60) \times 1.5^3}{3.5 \times 4.5} \\ &= 19.3 \text{ kip (85.8 kN)} < 36.6 \text{ kip (162.8 kN)} \end{aligned}$$

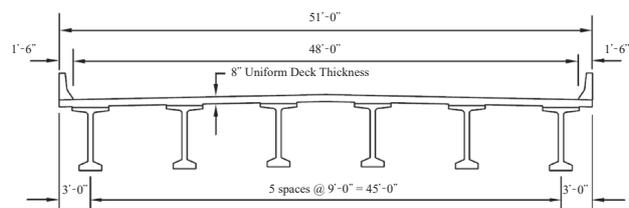


図 - 15 対象橋梁の断面図 (PCI Bridge Design Manual より)

表 - 1 押抜きせん断試験結果まとめ

Specimen ID	$V_{measured}, kip$	Average $V_{measured}, kip$	$V_{predicted}, kip$	$\frac{V_{measured}}{V_{predicted}}$	Mode of failure
MCSP#1	195.5	192.5	184.9	1.04	Connector was sheared off; no concrete failure in shear pocket
MCSP#2	189.4				
CSP#1	163.2	154.3	165.6	0.93	Connector was bent; concrete breakout in the shear pocket
CSP#2	145.3				

注) MCSP-1, 2 の破壊形態: 接続部はせん断破壊 (鋼製 HSS 内でコンクリート破壊なし)  
 CSP-1, 2 の破壊形態: 接続部は曲げ破壊 (鋼製 HSS 内でコンクリート破壊あり)  
 $V_{measured}$  = 界面せん断抵抗 (実測値),  $V_{predicted}$  = 界面せん断抵抗 (推定値)

ここで,

$V_{dowel}$  = ダウエル効果を考慮した界面せん断抵抗

$k$  = ジベルの種類による係数 (頭付きジベルの場合は 2.0, 頭なしジベルの場合は 1.0)

$n$  = ジベルの数

$f_d$  = ジベルの降伏強度 (60 ksi 以上)

$d_b$  = ジベルの直径

$l_a$  = ジベルの埋込み長

$$V_{dowel} = \frac{2 \times 1 \times (105 - 60) \times 1.5^3}{3.5 \times 4.5}$$

$$= 19.3 \text{ kip (85.8 kN)} < 36.6 \text{ kip (162.8 kN)}$$

したがって,  $V_{ni} + V_{dowel} = 165.6 + 19.3 = 184.9 \text{ kip (822.4 kN)}$  は, 新たな接合方法によるジベル孔の推定耐力を示す。

表 - 1 は, 4 つの試験体の破壊状態と推定される界面せん断抵抗を含む押抜きせん断試験結果をまとめたものである。AASHTO LRFD specifications における界面せん断抵抗を用いて, 設計例に示されている CSP 試験体の推定耐力を算出した。ただし, MCSP 試験体の場合は, 設計例で詳細に示されている Hatami の成果を基に, ダウエル効果を考慮した。CSP 試験体の実測値と推定値の界面せん断抵抗の比率 (0.93) は, CSP 試験体の界面せん断耐力が AASHTO LRFD specifications で推定されたものよりもわずかに小さいことを示しており, これは界面の接合が不十分であるか, ジベル孔のコンクリートとグラウトまたは, その両方の強度不足が原因となっている可能性がある。しかしながら, MCSP 試験体の実測値と推定値の界面せん断抵抗の比率 (1.04) は, ダウエル効果を考慮した AASHTO LRFD specifications によって MCSP 試験体の界面せん断耐力を正確に推定できていることを示している。これが, 界面の接合が完全に行われたときの MCSP 試験体の利点である。

## 5. 結 論

本稿では, PCa 床版施工のための新たな接合方法の設計と試験について報告した。新たな接合方法は, 製作と架設の許容誤差に対応しながら, PCa 床版を PC 桁に機械的に接合する。新たな接合方法と従来の CSP 試験体の性能を比較するために, 押抜きせん断試験を実施した。試験結果に基づいて, 以下のように結論づけられる。

- ・ MCSP 試験体を用いると, CSP 試験体を用いた場合と比較して, 界面せん断抵抗が 25% 増加する。
- ・ 新たな接合方法の構成部品は容易に入手でき, 製作と架設の許容誤差に対応しながら, 簡易かつ経済的に製作および組立てが行える。
- ・ 新たな接合方法はジベルがジベル孔に完全に固定されるため, ジベルのダウエル効果を十分に発揮できる。これにより, コンクリートとグラウト充填材の強度と品質に大きく依存し, コンクリートの脆性的な破壊挙動によって支配される CSP 接続よりも延性のある挙動が得られる。
- ・ ジベルのダウエル効果を考慮した AASHTO LRFD specifications における界面せん断抵抗は, 新たな接合方法の耐力を正確に推定できる。

## 参 考 文 献

- 1) PCI Bridge Design Manual Steering Committee. 2011. PCI Bridge Design Manual. MNL-133. 3rd ed. Chicago, IL: PCI.
- 2) ASTM Subcommittee A01.09. 2018. Standard Specification for Cold-Formed Welded and Seamless Carbon Steel Structural Tubing in Rounds and Shapes. ASTM A500/A500M-18. West Conshohocken, PA: ASTM International.
- 3) AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). 2017. AASHTO LRFD Bridge Design Specifications. 8th ed. Washington, DC: AASHTO.
- 4) Hatami, A. 2014. Design of Shear Connectors for Precast Concrete Decks in Concrete Girder Bridges. PhD diss., University of Nebraska-Lincoln.

This article was first issued in *PCI Journal (Precast Concrete Institute Journal)*, 2020, May-June, page 37-52  
<https://doi.org/10.15554/pcij65.3-01>

\* : 会誌編集委員会海外部会委員  
 堀内 祐樹 (首都高速道路 (株))  
 渡邊 秀知 (株 ビーエス三菱)  
 佐藤 千鶴 (株 銭高組)  
 田中 慎也 (株 IHI インフラ建設)  
 森田 遼 (鹿島建設 (株))

【2020 年 12 月 25 日受付】