

南海トラフ地震による橋梁被害を想定した プレキャストRCブロック連結桁の開発と 継手部の構造性能に関する実験的検証

石橋 寛樹¹・藤原 昌紀¹・朱 純亮²・弘光 太郎³・森 賢宇³・
宇野 洋志城⁴・秋山 充良⁵

¹学生会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

²非会員 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

³正会員 佐藤工業株式会社 技術センター技術研究所 土木研究部
（〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山14-10）

⁴正会員 博（工）佐藤工業株式会社 技術センター技術研究所所長
（〒243-0123 神奈川県厚木市森の里青山14-10）

⁵正会員 博（工）早稲田大学教授 創造理工学部社会環境工学科（〒169-8555 東京都新宿区大久保3-4-1）

1. はじめに

2011年東北地方太平洋沖地震では、太平洋沿岸部を中心に多くの橋梁が損壊・流出したことで¹⁾、広域で道路の通行規制が余儀なくされ、復旧活動に大きな遅れをきたした²⁾。さらに今後、南海トラフ地震の発生が強く懸念されており、津波により相当数の橋梁が被災するとされている³⁾。橋梁は交通ネットワークの要であり、災害後の復旧活動の迅速化、すなわち災害レジリエンス強化のためには、既存橋梁が損失することを前提とした、早期復旧を可能とする対策を震災前に進める必要がある。

この背景のもと、著者らは、災害後の仮復旧として適用事例のある、自衛隊の所有する機動支援橋⁴⁾や、橋梁の急速施工 (Accelerated Bridge Construction, ABC)⁵⁾に関わる技術開発を参考に、被災後の資材や重機の確保が困難な状況下でも、事前に製造・備蓄したプレキャスト製の鉄筋コンクリートブロック（以下、RCブロック）を組み立てることで簡易に架設可能な緊急仮設橋の開発に取り組んでいる。ABCに関する既存研究は、主に橋梁建設に要する施工コストの削減や施工期間の短縮化、交通渋滞の緩和や現場での安全性向上を目的としており、プレキャスト部材の活用には焦点を当てた技術開発が多い。Zhang et al.⁶⁾は、箱桁を対象とした溶接不要な継手構造を考案し、その性能を実験的および解析的に検

証している。Mehrsoroush and Saiidi⁷⁾は、施工期間の短縮化が可能な橋脚と基礎、および橋脚と梁の接合に使用する継手構造の開発に取り組んでいる。

本稿では、RCブロック端部に設けた鋼材のかみ合わせと炭素繊維シート（以下、CFS）を用いた継手構造により、RCブロックを連結した桁部材の曲げおよびせん断実験の結果を報告する。提案する継手構造に必要なCFSの巻き立て量を同定するために、CFSの補強方法のそれぞれ異なる供試体を製作し、継手構造の無いRC桁部材を基準として曲げおよびせん断耐力の大きさを比較する。

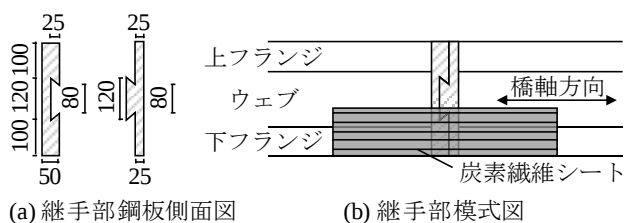
2. 実験供試体

(1) 想定した設計条件

想定する緊急仮設橋は桁長10mとした。開発するRCブロックは、復旧作業等で一般に使用される25tラフタークレーン1台の通行を支える耐荷力を有するように設計した。また、小型ユニック等での運搬・施工・架設を可能にするため、RCブロックの形状は、1つの重量が500kg以内となるように定めた。

(2) 提案する継手構造

RCブロック両端に設ける継手構造を図-1に示す。継手部は、オス型・メス型の鋼板を軸直角方向にスライドさせてかみ合わせることでブロックを軸方向



(c) 接合時の様子



(d) 鋼板と鉄筋の溶接箇所

図-1 RCブロック両端に設ける継手構造

に連結し、継手部に作用する曲げ引張力をCFSに負担させるものとした。継手部の鋼板にはSS400を使用し、RCブロックの軸方向鉄筋は鋼板に溶接した。使用したCFSの目付量は 450g/m^2 、引張強度は 3400N/mm^2 、ヤング係数は 245kN/mm^2 、その厚さは 0.25mm である。CFSは、プライマー、樹脂下塗り、CFS貼付、そして樹脂上塗りの順で貼付した。

(3) 供試体の構造諸元

図-2にRCブロックの断面諸元、図-3に供試体側面図をそれぞれ示す。RCブロックは軽量化のためにI型断面とし、実験で用いたRCブロックの断面寸法は、想定する実スケールの1/2とした。コンクリートは普通ポルトランドセメントを使用し、材齢28日における圧縮強度は約 30N/mm^2 である。粗骨材最大寸法は 15mm 、水セメント比は55%である。鉄筋はSD345を基本とし、せん断供試体の軸方向鉄筋のみSD490を使用した。

図-3に示される各供試体名にある「B」および「S」は、それぞれ破壊形式が曲げ破壊およびせん断破壊であることを意図している。せん断供試体は曲げ供試体よりも軸方向鉄筋の量とその強度が大きく、また、せん断破壊させるため、RCブロック内に配筋するスターラップの間隔が大きくなっている。なお、継手部の影響を考慮せずに算定した曲げせん断耐力比は、曲げ破壊型で2.6程度、せん断破壊型で0.5程度である。

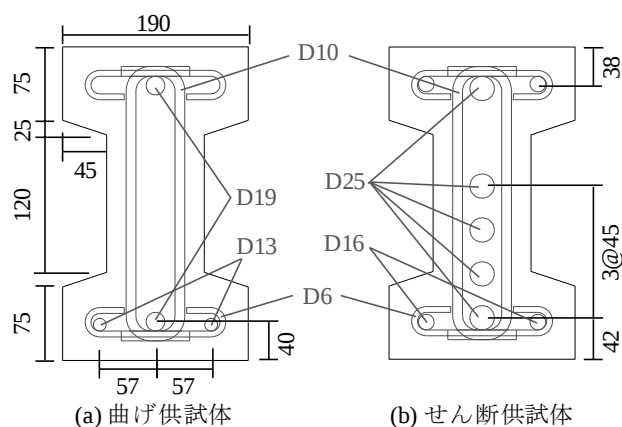
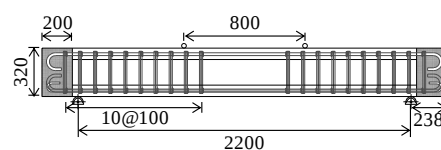
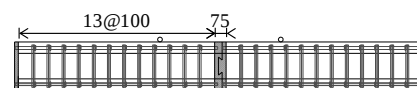


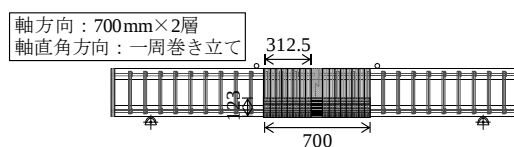
図-2 RCブロックの断面諸元



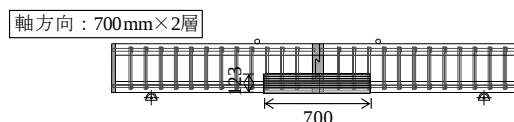
(a) B-1供試体（継手：無）



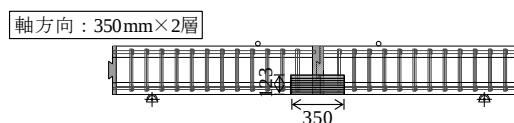
(b) B-2供試体（継手：有，CFS：無）



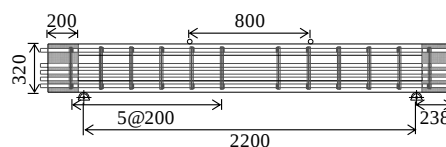
(c) B-3供試体（継手：有，CFS：軸方向700mm+直角方向）



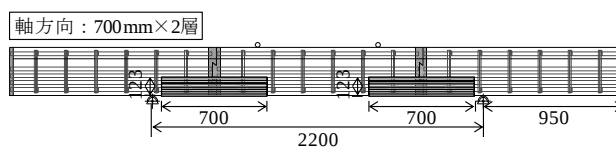
(d) B-4供試体（継手：有，CFS：軸方向700mm）



(e) B-5供試体（継手：有，CFS：軸方向350mm）



(f) S-1供試体（継手：無）



(g) S-2供試体（継手：有，CFS：軸方向700mm）

図-3 供試体側面図

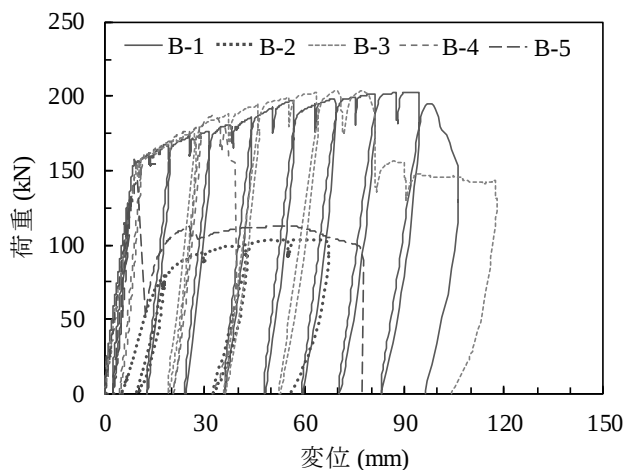


図-4 荷重－変位関係（曲げ供試体）

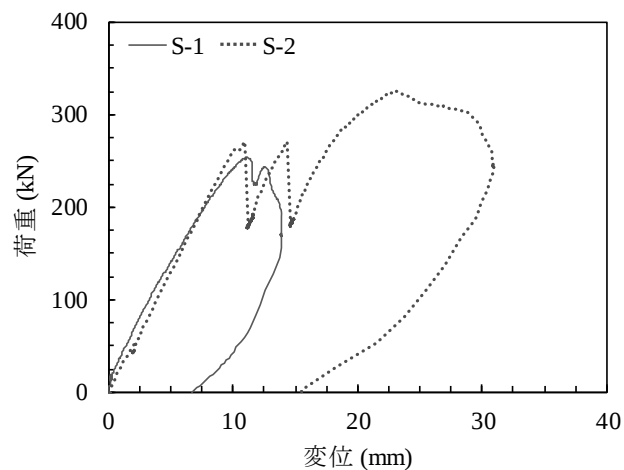
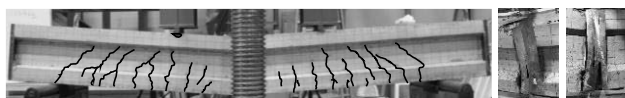


図-5 荷重－変位関係（せん断供試体）



(a) B-1供試体



(b) B-2供試体



(c) B-3供試体



(d) B-4供試体



(e) B-5供試体

写真-1 曲げ供試体の損傷状態（終局時）



(a) S-1供試体



(b) S-2供試体

写真-2 せん断供試体の損傷状態（終局時）

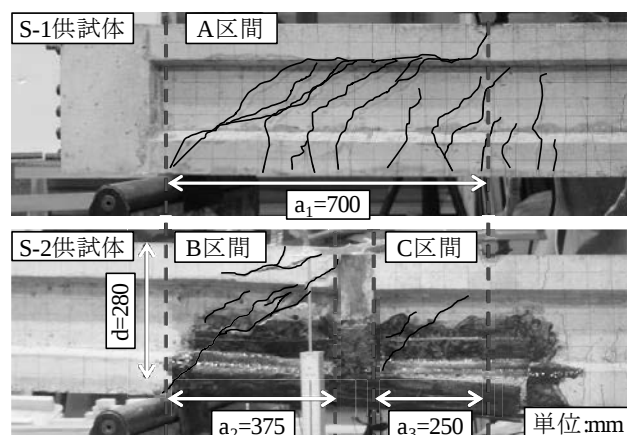


写真-3 せん断供試体のせん断スパン

RCブロックを連結した桁部材の曲げ・せん断挙動は、鋼板のかみ合わせ、およびCFSの巻き立て方法に依存することが予想される。そこで本実験では、CFSに着目し、その巻き立て方法の異なる供試体を製作した。B-1およびS-1供試体は、継手構造の無いRCブロックである。B-2～B-5供試体では、CFSの巻き立て方法や定着長さを変え、その違いが曲げ挙動に及ぼす影響を検証する。S-2供試体では、後述するように、曲げ実験結果の比較から、本構造に最も適した継手構造と同等されたB-4供試体と同じ定着構造を曲げせん断区間に設け、これが桁部材のせん断挙動に及ぼす影響を検証する。

(4) 荷重条件

荷重実験には、耐圧2000kNの自動荷重制御装置を使用した。曲げ・せん断実験ともに、全ての供試体で支点間距離は2200mmであり、荷重点距離（純曲げ区間）は800mmである。

本実験では、軸方向鉄筋のひずみが降伏ひずみを越えた時点を降伏と定義し、その際の変位を δ_y として、 δ_y 、 $3\delta_y$ 、 $5\delta_y$ …と $2\delta_y$ ごとに除荷・再荷重を行った。また、最大荷重の80%まで荷重低下した時点を終局と定義した。

3. 曲げ実験結果

曲げ実験から得られた荷重－変位関係を図－4に示す。また、各曲げ供試体の終局時における損傷状態を写真－1に示す。継手構造の無いB-1供試体では、荷重156kN・変位12.9mmの際に最下段にある軸方向鉄筋が全て降伏した。変位91.7mmの際に最大荷重203kNを発現し、その後、純曲げ区間内のコンクリート圧縮縁が圧壊することで終局を迎えた。

CFSを使用せず、鋼板のかみ合わせのみで連結されたB-2供試体では、写真－1(b)に示されるように、載荷時に継手部の鋼板が変形・開口し、最大荷重はB-1供試体の半分程度となった。また、本継手構造では、製作上、かみ合わせ部に数mmの遊間を設けている。B-2供試体では、載荷前の自重のみが作用する状態で、供試体中央部で5mm程度の初期変位が生じた。なお、CFSで補強された供試体では、自重による初期変位は確認されなかった。

B-3～B-5供試体では、CFSを巻き立てたことで、B-2供試体の継手部で発生した鋼板の開口挙動が抑制された。また、B-3およびB-4供試体では、その最大荷重は継手を有しないB-1供試体と同程度まで増加した。B-5供試体では、軸方向鉄筋が降伏する前にCFSに剥離が生じた。なお、B-3～B-5供試体では、CFS剥離後に荷重が低下し、B-2供試体と同じく、継手部が開口することで終局に至った。

一般に、CFSを用いてRC部材を補強する際は十分な定着長さが必要であり、本実験供試体の場合、純曲げ区間外までCFSを巻き立てる必要がある。緊急仮設橋では、施工時間や部材運搬の容易さが重要な要素であり、長期の安全性は一般の橋梁に比べて重要ではないと思われる。そのため、軸方向鉄筋の曲げ降伏までCFSが機能し、最大荷重が継手部を有しないB-1供試体と同程度となり、CFSの巻き立て量の少ないB-4供試体の継手構造（CFS・2層を部材軸方向に700mm巻き立てた構造）が緊急仮設橋として最も要件を満たしていると考ええる。

4. せん断実験結果

S-2供試体では、曲げ実験結果を踏まえて、B-4供試体と同じ継手構造を曲げせん断領域に設けた。せん断実験で得られた荷重－変位関係を図－5に示す。また、各せん断供試体の終局時における損傷状態を写真－2に示す。継手構造の無いS-1供試体では、曲げひび割れの発生後、支点と載荷点を結ぶ斜めひび割れが表れ、ひび割れ幅が拡大することで斜め引張

破壊した。S-2供試体では、最大荷重を発現する前に2度、CFSの剥離による荷重低下が生じたが、その後も荷重が上昇し、変位23.1mmの際に最大荷重325kNを発現すると同時にせん断圧縮破壊した。S-2供試体では、写真－3に示されるように、継手部の鋼板を介してせん断力が伝達されたことで、見かけのせん断スパンが小さくなったため、S-1供試体と破壊形式が異なり、せん断耐力が大きくなった。

5. 結論

南海トラフ地震後の被災地の状況を想定し、橋桁を迅速かつ容易に架設するための継手構造を提案した。また、曲げ・せん断実験を行い、CFSの補強方法の違いが荷重－変位関係に及ぼす影響を考察した。今後も実験結果を踏まえた改良を行い、災害レジリエンス強化につながる構造を模索したい。

参考文献

- 1) Akiyama, M., Frangopol, D.M., Arai, M. and Koshimura, S.: Reliability of bridges under tsunami hazards: Emphasis on the 2011 Tohoku-Oki Earthquake, *Earthquake Spectra*, Vol. 29, No. S1, pp.S295-S314, 2013.
- 2) 能島暢呂, 加藤宏紀: 自動車交通量にみる高速道路機能の時空間的分析－東日本大震災と阪神・淡路大震災の事例比較－, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.69, No.4, pp.I_121-133, 2013.
- 3) 内閣府中央防災会議防災対策推進検討会議南海トラフ巨大地震対策検討ワーキンググループ: 南海トラフ巨大地震対策について (最終報告), 2013.
- 4) Akiyama, M. and Frangopol, D.M.: Lessons from the 2011 Great East Japan earthquake: Emphasis on life-cycle structural performance, *Proceeding of 3rd International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering*, Vienna, Austria, 2012.
- 5) Palermo, A. and Mashal, M.: Accelerated bridge construction (ABC) and seismic damage resistant technology: A New Zealand challenge, *Bulletin of the New Zealand Society for Earthquake Engineering*, Vol.45, No.3, pp.123-133, 2012.
- 6) Zhang, J., Guan, Z., Liang, L. and Ling, X.: Experimental study on longitudinal joints with accelerated construction features in precast multibox girder bridges, *Journal of Bridge Engineering*, Vol.23, 04017116, 2018.
- 7) Mehrsoroush, A. and Saiidi, M.: Cyclic response of precast bridge piers with novel column-base pipe pins and pocket cap beam connections, *Journal of Bridge Engineering*, Vol.21, 04015080, 2016.