

論文 緊急仮設橋を想定した鋼製シアキーと機械式鉄筋継手の接続構造を有するプレキャスト RC ブロック連結桁の曲げ・せん断実験

青木 康貴^{*1}・花木 冬芽^{*2}・宇野 洋志城^{*3}・秋山 充良^{*4}

要旨：津波や豪雨を起因とする過大な流体力を受ける橋梁の損壊を防ぐことは難しい。一方、橋梁は、被災者や支援物資の搬送において極めて重要な役割を果たすため、緊急仮設橋の備蓄が検討されている。著者らは、この観点からプレキャスト RC ブロックを簡易に接続し、連続化することで桁構造を実現するための検討を行ってきた。本研究では、着脱可能な形式として、鋼製シアキーと機械式鉄筋継手を用いた RC ブロックの接続法を新たに提案し、それを用いた RC ブロック連結桁の曲げとせん断実験を実施した。そして、RC ブロック連結桁では接続部が弱部とならず、通常の（接続部のない）桁と同等の構造性能を有することを確認した。

キーワード：緊急仮設橋、プレキャスト RC ブロック、鋼製シアキー、機械式継手、レジリエンス

1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震では、津波により太平洋沿岸部にある多くの道路橋や鉄道橋が流出した。例えば、気仙沼線陸前戸倉駅と志津川駅間にある水尻川橋梁（3 径間単純 PC 桁橋）では、3 つ全ての桁が津波により川上側に流出し、中間にあった 2 基の単柱式 RC 橋脚が倒壊している¹⁾。流出した桁の橋梁位置からの移動距離は約 200 メートルである。このような津波被害を受け、ASCE では津波荷重の設定方法が示され²⁾、土木学会でも、橋梁の対津波に対する照査例が紹介されている³⁾。

しかし、相当な重量物である PC 桁橋を数百メートルも流出させる津波荷重から作用力 (D) を計算し、それを受ける橋梁の耐力 (R) との比較から、 $D \leq R$ となる合理的な設計解を見出すことは極めて困難である。中央防災会議「東北地方太平洋沖地震を踏まえた地震・津波対策に関する専門調査会報告」⁴⁾では、津波対策を構築するにあたっては、二つのレベルの津波を想定する必要があるとされている。一つは、住民避難を柱とした総合的防災対策を構築する上で想定する津波であり、発生頻度は極めて低いものの、発生すれば甚大な被害をもたらす最大クラスの津波（レベル 2 津波）であり、もう一つは、レベル 2 津波に比べて発生頻度は高く、津波高さは低いものの大きな被害をもたらす津波（レベル 1 津波）である。現状の技術レベルでは、レベル 1 津波に対しては、 $D \leq R$ の確保を目指し、レベル 2 津波に対しては、橋梁の損壊を前提とした対応が求められる。

また、レベル 2 津波と同じく、極めて大きな流体力が構造物に生じる現象は、大雨時に勾配が急な河川内橋梁で見ることができる。例えば、令和 2 年 7 月豪雨の際、

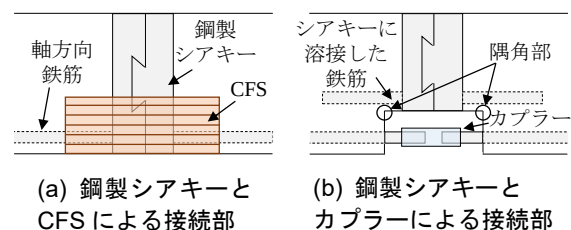


図-1 プレキャスト RC ブロックの接続部

熊本県球磨川では多数の橋梁が流出した⁵⁾。地球温暖化に伴う気候変動の影響により、このような豪雨による構造物被害はさらに増える可能性が指摘されている⁶⁾。

橋梁は、被災者の被災地からの搬出、あるいは緊急支援物資の被災地への搬入に不可欠なものである。我が国では、1990 年に地震時保有耐力法が導入され、その後、1995 年の兵庫県南部地震を契機とした耐震・地震工学研究の進歩もあり、耐震設計法は一段と高度化し、地震動を受ける橋梁の安全性や修復性に係る性能は飛躍的に向上した。一方で、レベル 2 津波やそれに相当する豪雨などに対しては、構造計画における配慮により対処しているに過ぎない。この問題に対して、被災地の復旧・復興に要する時間の短縮、つまりレジリエンス強化につながる方策として、緊急仮設橋^{7),8)}の備蓄が検討されている。前記した水尻川橋梁に隣接する国道 45 号線に架かる折立橋も津波により一部が流出したが、自衛隊が所有する機動支援橋が緊急仮設橋として使用され、救助・救急活動に貢献している¹⁾。既存研究⁸⁾では、鋼製、あるいは軽合金を用いた緊急仮設橋が検討されてきたのに対して、著者らは、プレキャスト製の RC ブロックを使用し、安価で、かつ被災後の状況でも簡易に連結可能な桁構造の

*1 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻 修士（工学）（学生会員）

*2 早稲田大学大学院 創造理工学研究科建設工学専攻

*3 佐藤工業（株）技術センター 博士（工学）（正会員）

*4 早稲田大学 創造理工学部社会環境工学科 教授 博士（工学）（正会員）

表－１ 供試体諸元の一覧

供試体	(a) 構造諸元 (単位:mm) □: ひずみゲージ貼付位置	(b) 継手位置	(c) 材料特性			(d) 試験結果	
B-0		無	コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	41.7	軸方向 鉄筋 降伏時	荷重 (kN)	61.3
						変位 (mm)	3.8
			SD345鉄筋 降伏点強度 (N/mm ²)	D6 349 D13 386	最大 荷重時	荷重 (kN)	99.3
						変位 (mm)	44.6
B-1		純曲げ 区間	コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	38.9	軸方向 鉄筋 降伏時	荷重 (kN)	53.3
						変位 (mm)	3.3
			SD345鉄筋 降伏点強度 (N/mm ²)	D6 349 D13 378	最大 荷重時	荷重 (kN)	103.6
						変位 (mm)	39.5
B-2		曲げ せん断 区間	コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	44.8	軸方向 鉄筋 降伏時	荷重 (kN)	69.6
						変位 (mm)	5.6
			SD345鉄筋 降伏点強度 (N/mm ²)	D6 364 D13 379	最大 荷重時	荷重 (kN)	96.6
						変位 (mm)	48.9
S-0		無	コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	41.4	軸方向 鉄筋 降伏時	荷重 (kN)	－
						変位 (mm)	－
			SD345鉄筋 降伏点強度 (N/mm ²)	D6 349 D22 386	最大 荷重時	荷重 (kN)	218.6
						変位 (mm)	11.0
S-1		曲げ せん断 区間	コンクリート 圧縮強度 (N/mm ²)	41.7	軸方向 鉄筋 降伏時	荷重 (kN)	184.5
						変位 (mm)	10.6
			SD345鉄筋 降伏点強度 (N/mm ²)	D6 349 D22 394	最大 荷重時	荷重 (kN)	217.2
						変位 (mm)	17.3

開発を目指している。

参考文献^{9),10)}では、図－1(a)に示すように、オス型・メス型の鋼板（鋼製シアキー）を橋軸直角方向にスライドさせてかみ合わせ、その断面の引張縁を曲げモーメントに抵抗するように炭素繊維シート（CFS）で補強することで、ブロック相互を連結・一体化させる接続構造を提案し、その曲げ・せん断実験の結果を報告した。炭素繊維シートの定着長さを適切に設定することで、接続部のない桁部材と同等な曲げやせん断耐力を得られることが実験的に確認されたが、炭素繊維シートを現場で貼付する作業とその養生期間が必要となり、さらに、緊急仮設橋がその役割を終えた後の解体時に炭素繊維シートを剥がす必要がある欠点を抱えていた。

本研究では、図－1(b)に示されるように、ブロック端部に設けた鋼製シアキー、および露出させた軸方向鉄筋に取付けた機械式継手（カプラー）を用いた着脱可能な接続構造を提案し、これを用いて連結した桁の曲げ・せん断実験を実施する。接続部を有しない RC 桁から得られる曲げやせん断耐力との比較、あるいは軸方向鉄筋やスターラップのひずみ値から、接続部が RC ブロック間

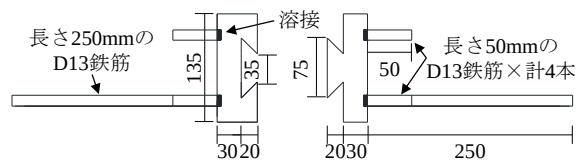
の応力伝達や連結桁の挙動に及ぼす影響を考察する。

2. 緊急仮設橋を想定した RC ブロックの接続構造

緊急仮設橋は、平常時の備蓄が可能であり、災害後の制約条件下でも迅速かつ容易に運搬・架設でき、一方で、所要の耐荷力を確保しながら支間長を自由に調整可能で、かつその役割を果たした後の処理・解体法が確立していることが求められる^{7),8)}。本研究では、特殊な工具を用いずに着脱可能な接続構造を開発し、一体化と分離を繰り返し行うことができる RC ブロック連結桁を提案する。

RC ブロック両端に設ける接続部は、図－1(b)に示すように、鋼製シアキーを橋軸直角方向にスライドさせてかみ合わせ、露出した軸方向鉄筋をカプラーにより継ぐことで、ブロック相互を連結・一体化させる構造となっている。炭素繊維シートを用いた既往の接続部^{9),10)}（図－1(a)）では、RC ブロックの断面全体に鋼製シアキーが配置され、その引張部に炭素繊維シートを貼付していたのに対し、着脱可能なカプラーにより継いだ軸方向鉄筋が曲げによる引張力を負担する。

RC ブロックを連結した桁部材の曲げやせん断挙動は、



(a) 鋼製シアキー側面図

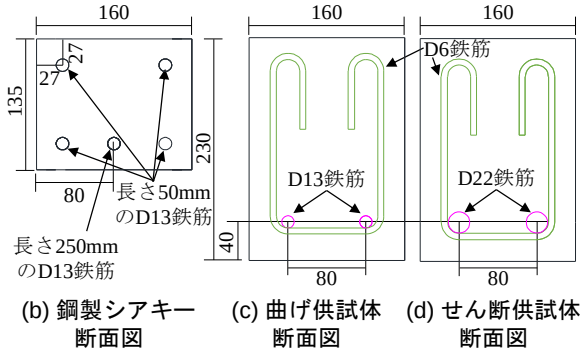


図-2 供試体側面図・断面図（単位：mm）

接続部における断面力の伝達に依存する。そこで本研究では、提案する接続部が純曲げ区間、あるいは曲げせん断区間に位置するプレキャスト RC ブロック連結桁を製作し、曲げおよびせん断実験を行う。

3. RC ブロック連結桁の曲げ・せん断実験の概要

3.1 供試体の構造諸元および材料特性

供試体の構造諸元と材料特性を表-1 に、鋼製シアキーの側面図と供試体断面図を図-2 にそれぞれ示す。表-1 に示す頭文字が「B」および「S」の供試体は、それぞれ曲げ破壊およびせん断破壊させることを意図したものである。せん断供試体は、曲げ供試体よりも終局曲げモーメントを大きくするために軸方向鉄筋径が大きく、また、RC ブロック内のスターラップ間隔が大きい。接続部の影響を考慮せずに算定した曲げせん断耐力比は、B 供試体で約 2.1、S 供試体で約 0.8 である。接続部を有しない B-0、および S-0 供試体と、B-1、B-2 および S-1 供試体の実験結果をそれぞれ比較することで、接続部が連結桁の曲げやせん断挙動に及ぼす影響を検証する。使用する RC ブロック数は、B-1 供試体で 2 つ、B-2 および S-1 供試体で 3 つである。

供試体の製作に使用したコンクリートの水セメント比は 45%、また、粗骨材最大寸法は 20 mm である。鋼製シアキーには、参考文献^{9), 10)}と同じく、SS400 を使用した。また、図-1(a)に示す既存の接続部と異なり、提案する接続部では、カプラーを使用して軸方向鉄筋を現場において継ぐことで RC ブロックを連結するため、軸方向鉄筋を露出させている。事前の予備検討において、載荷中、図-1(b)に示す隅角部からのひび割れの進展が懸念されたことから、図-2(a)に示すように、長さ 250mm の D13 鉄筋をシアキーである鋼板に溶接している。また、

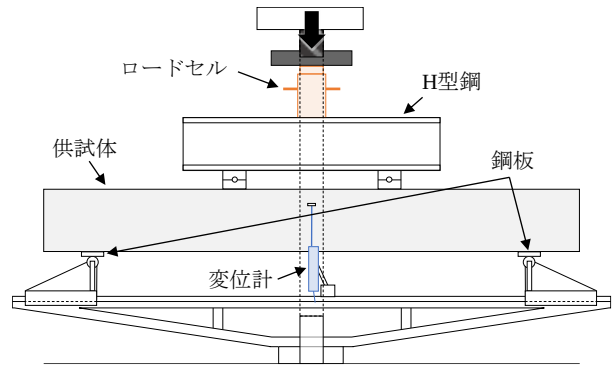


図-3 供試体載荷状況（4点曲げ試験）

シアキーとコンクリートの定着を図るため、鋼板の四隅に長さ 50mm の D13 鉄筋を溶接した。なお、用いた機械式鉄筋継手は、モルタルやエポキシ樹脂等のグラウト材の充填が不要であり、容易に着脱可能なものである。十分な継手長さ（カプラーの長さ）を確保した本実験では、鉄筋継手部でのがたつきは載荷中に生じなかった。

3.2 載荷条件および測定項目

供試体の載荷状況を図-3 に示す。全ての供試体において、荷重とスパン中央位置のたわみ（中央変位）、および表-1(a)に示すゲージ貼付位置で、軸方向鉄筋、スターラップ、そして鋼製シアキーに溶接した鉄筋の各ひずみを計測した。また、載荷中の鋼製シアキー下部の開口変位を測定している。

載荷は、中央変位の載荷速度を 1 mm/分とする変位制御にて行った。供試体中央部で測定された軸方向鉄筋のひずみが降伏ひずみを超えた時点を降伏と定義し、その際の中央変位を δy とした。曲げ破壊させることを意図した B 供試体の載荷手順は、 δy 、 $3\delta y$ 、 $5\delta y$ …と降伏変位後に $2\delta y$ 毎に載荷を一旦停止し、接続部や RC ブロックの損傷状況をスケッチした。そして、最大荷重の 80%まで荷重が低下した時点を終局と定義し、載荷を終了した。せん断破壊を意図した S 供試体では、途中で載荷を停止することなく、終局状態に達するまで単調に加力した。

4. 曲げ・せん断実験結果

4.1 曲げ実験結果

接続部を持たない B-0 供試体、接続部が純曲げ区間にある B-1 供試体、および曲げせん断区間にある B-2 供試体の荷重－変位関係と損傷状況を比較することで、接続部の位置が連結桁の曲げ挙動などに及ぼす影響を検証する。曲げ試験により得られた荷重－変位関係を図-4 に、軸方向鉄筋降伏時および最大荷重時の荷重と変位の各値を表-1(d)に、そして、各供試体の終局時の損傷状況を写真-1 にそれぞれ示す。

(1) B-0 供試体

接続部の無い B-0 供試体は、鉄筋降伏後に純曲げ区間

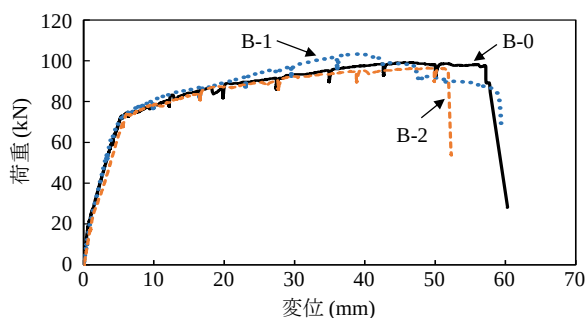


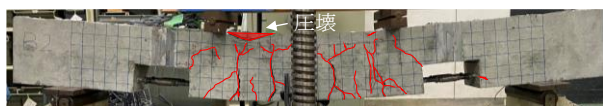
図-4 荷重－変位関係の比較（曲げ供試体）



(a) B-0供試体



(b) B-1供試体



(c) B-2供試体

写真-1 曲げ供試体の損傷状況（終局時）



(a) 鋼製シアキーの開口挙動 (b) 開口挙動の抑制 (c) ひずみ分布のイメージ

図-5 鋼製シアキーの開口挙動

内のコンクリート圧縮縁が圧壊することで、荷重が低下し、終局を迎えた。典型的な曲げ引張破壊である。

(2) B-1 供試体

提案する接続部を純曲げ区間に配置した B-1 供試体では、図-4 の荷重－変位関係や写真-1 の終局時の損傷状態に示されるように、接続部を有しない B-0 供試体とほぼ同じ曲げ挙動や曲げ耐力が得られ、圧縮縁コンクリートが圧壊するなど、終局時の損傷状況も同様である。

また、図-5(a)に示されるように、既存の接続部^{9), 10)}では、断面全体に鋼製シアキーが存在するため、炭素繊維シートを用いなくとも、写真に示されるようにシアキー下端が荷重中に開口する。一方、提案構造では、カプラーを用いて継いだ軸方向鉄筋により曲げによる引張力を負担するため、図-5(c)に示されるように、鋼製シアキーの開口は炭素繊維シートを用いなくとも抑制できる（図-5(b)）。なお、接続部を有する全ての供試体で鋼製シアキーの開口は終局状態まで観察されていない。

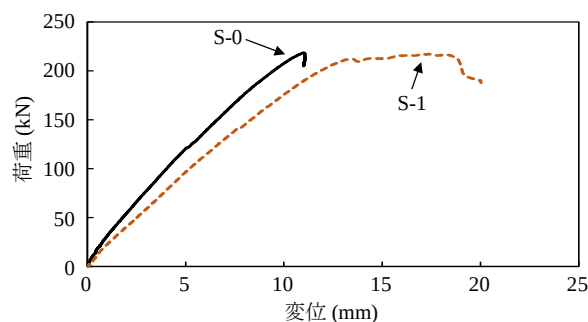
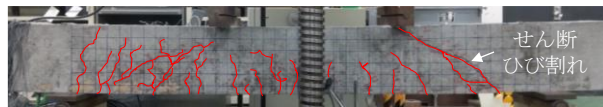


図-6 荷重－変位関係（せん断供試体）



(a) S-0供試体



(b) S-1供試体

写真-2 せん断供試体の損傷状況（終局時）

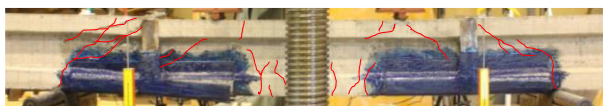


写真-3 鋼製シアキーと CFS による接続構造を有するせん断供試体の損傷状況（終局時）⁹⁾

(3) B-2 供試体

曲げとせん断が作用する領域に提案する接続部を設けた B-2 供試体では、曲げせん断区間のひび割れ性状は異なるものの、接続部のない B-0 供試体に近い曲げ挙動と曲げ耐力が得られた。写真-1 (c) に示されるように、接続部周辺の隅角部から荷重点へ向かって斜めひび割れが進展している点が B-0 供試体との主な違いである。

B-1 供試体、および B-2 供試体の曲げ荷重実験の結果より、提案する接続部を用いて RC ブロックを連結した桁は、接続部を持たない場合と同様の曲げ挙動を呈すると期待できる。

4.2 せん断実験結果

接続部を有しない S-0 供試体、および接続部が曲げせん断区間にある S-1 供試体のせん断実験結果を比較することで、提案する接続部がせん断力を受ける連結桁の挙動に及ぼす影響を検証した。せん断実験により得られた荷重－変位関係を図-6 に、軸方向鉄筋降伏時および最大荷重時の荷重と変位の各値を表-1(d)に、そして、終局時の両供試体の損傷状況を写真-2 にそれぞれ示す。

接続部を有しない S-0 供試体では、曲げひび割れの発生後、支点と荷重点を結ぶ斜めひび割れが発生し、その進展により終局に至った。典型的な斜め引張破壊である。一方で、接続部が曲げせん断区間にある S-1 供試体では、軸方向鉄筋が降伏した後にコンクリート圧縮縁が圧壊することで終局を迎えており、その破壊モードは、曲げ引

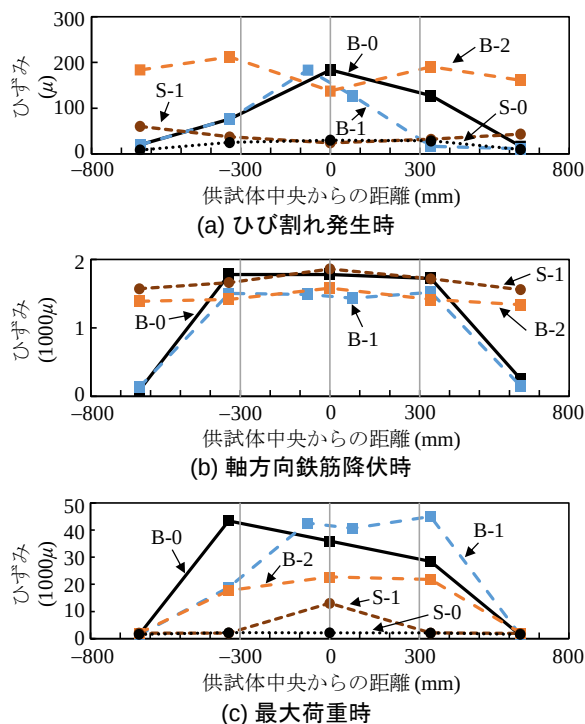


図-7 軸方向鉄筋のひずみ

張破壊となった。これは、曲げせん断区間にある高い剛性を有する鋼製シアキーが支点と載荷点を結ぶ斜めひび割れの進展を防ぎ、その結果として曲げ破壊になったと予想される。参考文献^{9),10)}で提案した鋼製シアキーを断面全体に持つ接続部でも、鋼製シアキーにより斜めひび割れの進展が抑制され（写真-3）、接続部がある供試体では大きなせん断力に耐えることができていた。

なお、図-6に示されるように、S-1 供試体の剛性は、S-0 供試体よりも小さく、写真-2に示されるように、斜めひび割れが接続部の隅角部から支点および載荷点を結ぶように発生している。写真-1(c)の B-2 供試体との比較からも明らかなように、せん断破壊させるために太径の軸方向鉄筋を用いた S-1 供試体では、接続部周辺に多くのひび割れが発生している。カプラーを設けるために軸方向鉄筋が剥き出しの状態であり、結果として、接続部と支点間で軸方向鉄筋を引き抜く挙動が生じ、太径を使っている S-1 供試体でのみその箇所に複数のひび割れが生じ、これが部材全体の剛性に影響したと思われる。

せん断実験の結果から、過大な量の引張鉄筋を RC ブロックに与えた場合には、カプラーを設けるために軸方向鉄筋を剥き出しにした影響として、接続部周辺に多くのひび割れが発生し、桁全体の剛性がやや小さくなるが、その点を除き、接続部のある RC ブロック連結桁の挙動は、それが無い場合と同等のものになると言える。

4.3 接続部が RC ブロック連結桁の挙動に及ぼす影響

ここでは、表-1 に示す位置に貼付したひずみゲージにより測定されたひずみ値から、接続部を設けることがプレキャスト RC ブロック連結桁の曲げやせん断挙動に

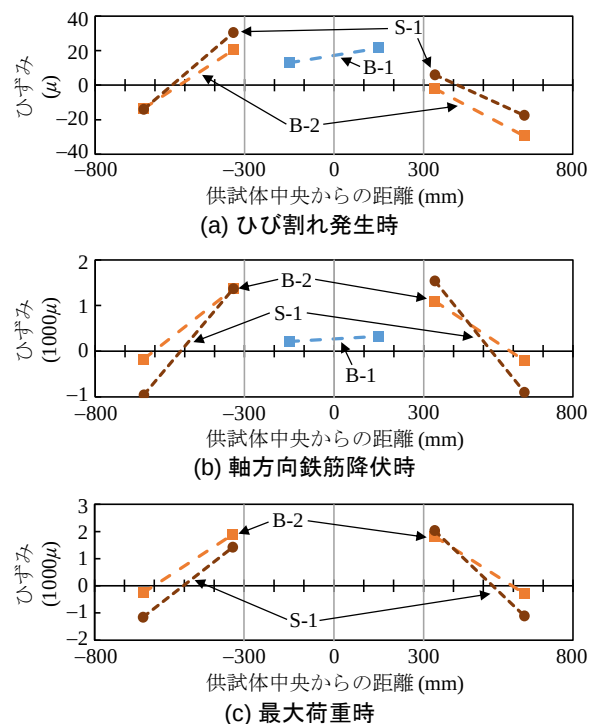


図-8 シアキーに溶接した鉄筋のひずみ

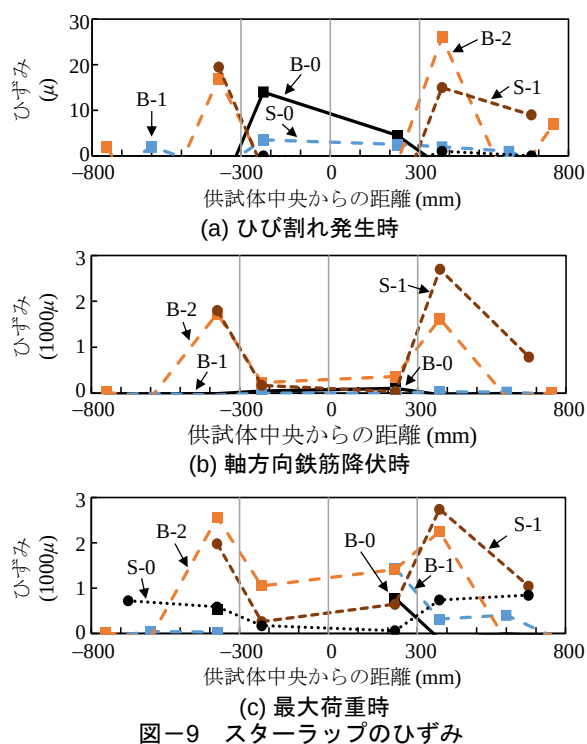
及ぼした影響を考察する。図-7、図-8、および図-9に軸方向鉄筋、鋼製シアキーに溶接した鉄筋、およびスターループのひずみ値をそれぞれ示す。

図-7 より、接続部が曲げせん断領域にある B-2 および S-1 供試体では、軸方向鉄筋が曲げ降伏するまで、部材の曲げモーメントの分布と関係なく、部材全長にわたり軸方向鉄筋にひずみが生じている。これは、カプラーにより軸方向鉄筋を継ぐため、接続部で軸方向鉄筋が剥き出しになっており、その位置での付着がないため、支点近くであっても軸方向鉄筋に大きなひずみが生じる。軸方向鉄筋の降伏時の B-2 と S-1 供試体のひずみに大差はないが、太径 (D22) を用いている S-1 供試体では、相当に大きな引張力が生じる結果として、4.2 で述べたように、支点近くでも多くのひび割れが発生し、部材の剛性低下が生じた理由となっている。

写真-1(c)や写真-2に示されるように、B-2 および S-1 供試体において、載荷点と、載荷点に近い側にある隅角部（図-1）を結ぶ斜めひび割れが発生している。図-8 と図-9 に示されるように、鋼製シアキーに溶接した長さ 250mm の軸方向の鉄筋、あるいはその近くにあるスターループには、大きなひずみが発生している。このことは、この箇所の補強が提案する接続部において重要であることを示唆している。

5. まとめ

2011 年東北地方太平洋沖地震による津波、あるいは令和 2 年九州豪雨など、津波や豪雨を起因とする過大な流体力を受ける橋梁の損壊が報告されている。切迫する南



海トラフ地震による津波，あるいは，地球温暖化の影響により，水災害の発生頻度が高まることへの懸念，さらには，現状の技術レベルでは，そのような流体力を受ける橋梁の損壊を防ぐことは難しいことを踏まえると，緊急仮設橋の一層の備蓄を進めることがレジリエンス強化の観点から重要である。本研究では，既往の接続構造を改良し，鋼製シアキーとカプラーによりプレキャストRCブロックを連結する構造を提案した。

提案する接続部を持つ連結桁の曲げ，およびせん断実験を実施し，接続部のない場合との荷重－変位関係などを比較した。全体としては，接続部があっても，接続部がない桁とほぼ同等の荷重－変位関係，破壊性状，あるいは最大荷重が得られることを確認した。ただし，カプラーにより軸方向鉄筋を継ぐため，鉄筋が一部，剥き出しになり，その影響のため，軸方向鉄筋が多くなると（径が大きくなると）接続部周辺にひび割れが発生し，剛性低下を招く可能性がある。今後，接続部周辺の補強方法（配筋や隅角部の切欠き加工など），および実用化に向けた接続部の着脱手順の詳細を検討する必要がある。

謝辞： 合同製鉄株式会社より機械式鉄筋継手を提供して頂きました。ここに記して謝意を表します。

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.28, No.S1, pp.295-314, Mar. 2013

- 2) Chock, G.Y.K.: Design for tsunami loads and effects in the ASCE 7-16 Standard. *ASCE Journal of Structural Engineering*, Vol.142, No.11, pp.04016093-1-12, Nov. 2016
- 3) 土木学会地震工学委員会：東日本大震災による橋梁等の被害分析小委員会報告書，2015.8
- 4) 中央防災会議：東北地方太平洋沖地震を教訓とした地震・津波対策に関する専門調査会 中間とりまとめ～今後の津波防災対策の基本的考え方について～，2011.6
- 5) Mukunoki, T., Suetsugu, D., Sako, K., Murakami, S., Fukubayashi, Y., Ishikura, R., Hino, T., Sugimoto, S., Wakinaka, K., Ito, S., and Koyama, A.: Reconnaissance report on geotechnical damage caused by a localized torrential downpour with emergency warning level in Kyushu, Japan. *Soils and Foundations*, Vol.61, No.2, pp.600-620, Apr. 2021
- 6) Orcesi, A., Connor, A.O., Diamantidis, D., Sykora, M., Wu, T., Akiyama, M., Alhamid, A.K., Schmidt, F., Pregnolato, M., Li, Y., Salarieh, B., Salman, A.M., Bastidas-Arteaga, E., Markogiannaki, O. and Schoefs, F.: Investigating the Effects of Climate Change on Structural Actions, *Structural Engineering International*, Vol.32, No.4, pp.563-576, Aug. 2022
- 7) Akiyama, M., Frangopol, D.M., and Ishibashi, H.: Toward life-cycle reliability-, risk- and resilience-based design and assessment of bridges and bridge networks under independent and interacting hazards: emphasis on earthquake, tsunami and corrosion, *Structure and Infrastructure Engineering*, Vol.16, No.1, pp.26-50, May. 2020
- 8) 小野秀一：急速架設を実現するための構造を有する緊急仮設橋（招待論文），*構造工学論文集*, Vol.62A, pp.1272-1281, 2016.3
- 9) 藤原昌紀，弘光太郎，宇野洋志城，秋山充良：災害後の緊急仮設橋を想定したプレキャストRCブロック連結桁と曲げ・せん断実験による継手部の性能検証，*コンクリート工学年次論文集*, Vol.42, No.2, pp.469-474, 2020.7
- 10) Ishibashi, H., Akiyama, M., Fujiwara, M., Uno, Y., Hiromitsu, T.: Precast RC blocks with connections composed of steel shear keys and CFRP sheets for the superstructure of temporary bridges in a postdisaster situation, *ASCE Journal of Bridge Engineering*, Vol.27, No.8, pp.87-95, pp.04022061-1-14, Aug. 2022