

論文 簡易なプレストレス導入方法により接合されたスラブ版の耐荷性能

上山裕太*1・高見澤拓哉*1・井口重信*1

要旨：トルクによる簡易なプレストレス導入方法を用いて、プレキャスト部材と既存部材の接合状況を模したスラブ版の耐荷性能について実験的検討を行った。接合したスラブ版試験体と、比較対象として一体打設したスラブ版試験体に対して疲労載荷試験と曲げ載荷試験を行った。その結果、疲労載荷試験ではコンクリートの発生ひずみ、変位量に差は見られなかった。曲げ載荷試験では、降伏曲げ耐力と終局曲げ耐力はほぼ同等の値であった。また、部材のひび割れ本数は接合された試験体の方が少なく、接合部に開口が集中した。以上の結果から、両試験体は同等の耐荷性能を有することが分かった。

キーワード：ねじふし鉄筋、トルク、プレストレス、プレテンション、スラブ

1. はじめに

プレキャスト工法の確立以降、柱や梁、スラブ床版などといった様々な構造物にプレキャスト（以下、PCa）部材が利用されている。PCa 部材は専用工場で作成されるため、従来の現場打ち工法に比べて、より高い品質のコンクリート製品を得ることが可能である。また、PCa 部材と既設部材や、PCa 部材同士を接続する方法としては、機械式継手やループ式継手による方法が一般的である。一方で、ラーメン高架橋の張出しスラブを PCa 部材で製作し、現地で接合する場合は、従来の接合方法では支保工等が必要となるため、工期の長期化やコスト面で割高になる場合があった。

そこで、図-1 に示すような張出しスラブから高欄まで一体化したプレキャスト部材をクレーン等により架設し、架設時の支保工を不要とする連結構造を提案した。本構造は、既設部内から突出させたねじふし鉄筋に、シーブ管を配置したプレキャスト部材を挿入し、その端部にナットを取り付け、トルクにより簡易なプレストレスを導入し、接合するものである。ねじふし鉄筋のトルクと緊張力については図-2 のようになることが知られているため（参考文献3）、架設時の死荷重を安定して支持することが可能である。今後、この簡易なプレストレス導入方法を用いれば、張出しスラブだけでなく、中間スラブ等、他の部位でも適用が可能となると考えられる。本稿では、この方法により接合したスラブ版の耐荷性能について実験的検討を行ったので、その概要を述べる。

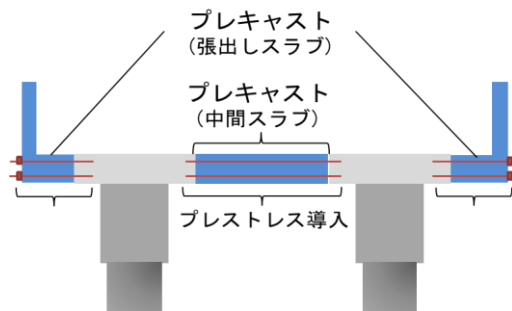


図-1 ラーメン高架橋での PCa 部材の適用イメージ

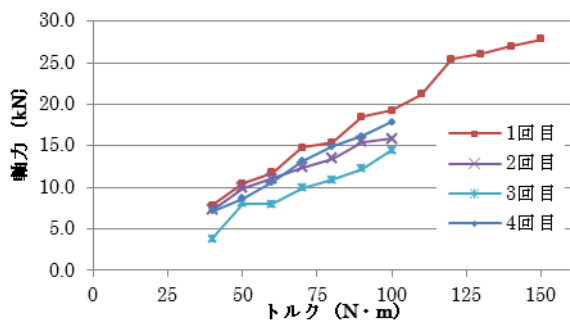


図-2 ねじふし鉄筋のトルクと軸力の関係

2. 試験概要

2.1 試験体

CASE1 の試験体の概要図を図-3 に示す。CASE1 の試験体は、高架橋の張出しスラブを模したもので、新たに架設するプレキャスト部とそれを接合する既存部とに分けて製作した。プレキャスト部材、既設部材それぞれの寸法は長さ 1200mm、幅 900mm、高さ 300mm とし、それらをトルクによるプレストレス導入法により接合することで全体長さ 2400mm、全体幅 900mm、全体高さ 300mm の試験体とした。主鉄筋として、ねじふし鉄筋 (SD390, D13) を 125mm ピッチで上下 2 段に配筋した。配力鉄筋には異形鉄筋 (SD345, D16) を 125mm ピッチで上下 2 段に配筋した。また、プレキャスト部材には既設側の主鉄筋を通すために、φ35 のポリエチレンシーブ管を主鉄筋と同様のピッチで設置した。トルクを導入するナットには S45C (降伏応力の規格値 345N/mm² 以上) の長さ 15mm のロックナットを用い、架設準備として鉄筋を継

*1 東日本旅客鉄道株式会社 上信越工事事務所 (正会員)

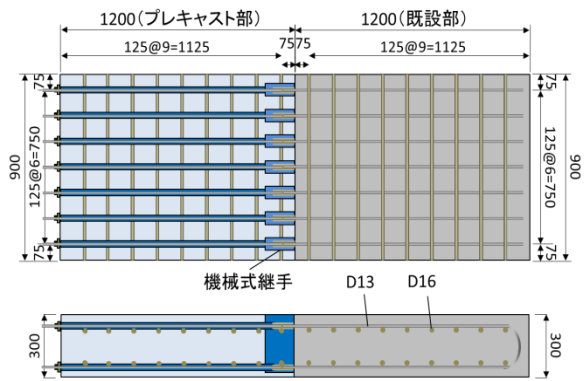


図-3 試験体概要 (CASE1)

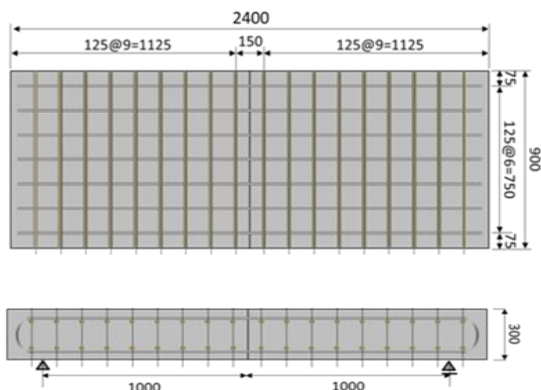


図-4 試験体概要 (CASE2)

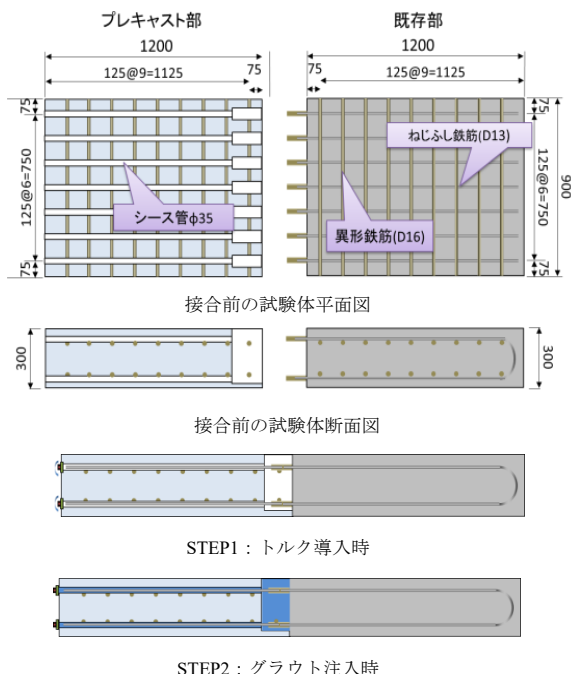


図-5 CASE1 試験体製作手順

ぎ足す際に用いる継手には機械式継手を用いた。CASE2は、CASE1との比較用として、CASE1と同寸法で一体打設して製作した。CASE2の試験体の概要図を図-4に示す。

図-5に試験体製作手順を記す。

STEP1: 既存部材から予め突き出させた主鉄筋に機械式継手を用いて、ねじふし鉄筋の継足しを行う。その後、継足した鉄筋をプレキャスト部に設けたシース管内に通し、端部にナットとワッシャーを通す。その後、ナットをトルクレンチにより締め付けることでトルクを導入し、ねじふし鉄筋に軸力を導入する。トルクの導入は、端部のナットを仮止めした後に、トルクレンチで10N・mずつ締め付け、鉄筋一本当たり20N・mを導入し、総導入軸力77.7kNとした。

STEP2: トルクによりプレキャスト部と既存部を接合した後に、接合部及びシース管内にグラウトを充填し、完成体とした。試験体には、図-6に示すように、コンクリートひずみゲージ、鉄筋ひずみゲージを主鉄筋軸方向に貼り付けた。また、 π ゲージはプレキャスト部と既存部の境界を跨ぐように設置した。

写真-1にトルク導入時の様子を示す。トルクを締め付けるロックナットについてはトルク導入中に鉄筋がナットと一緒に回転してしまうことを防止するためにダブルナットとし、ワッシャーと支圧板を間に設置した。また、表-1、表-2に鉄筋及びコンクリートとグラウトの材料試験の結果を示す。

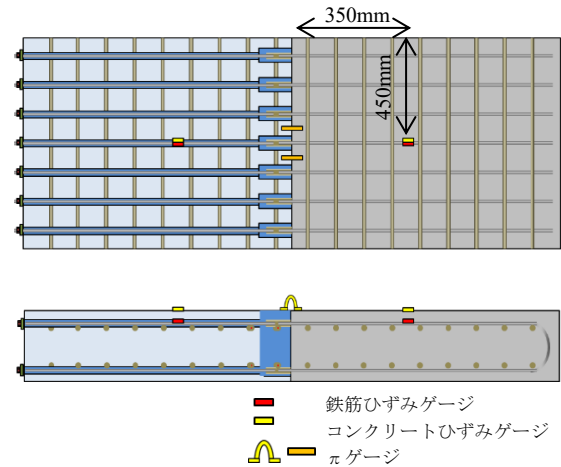


図-6 ひずみゲージの位置図



写真-1 トルク導入の様子

表-1 主鉄筋の材料試験結果

鉄筋種類	降伏応力度 N/mm ²	降伏ひずみ μ
SD390,D13	445.9	2680

表-2 コンクリートの材料試験結果

	圧縮強度 N/mm ²	割裂強度 N/mm ²
コンクリート	39.5	3.4
グラウト	72.9	6.6

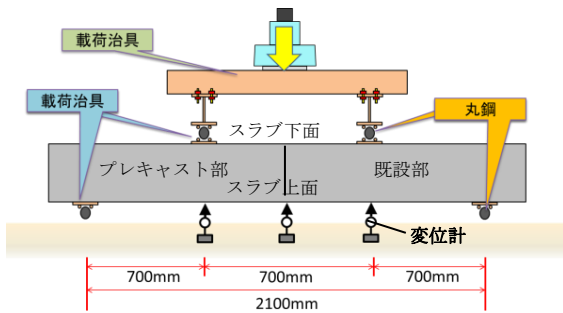


図-7 疲労荷重試験の概要図

2.2 試験方法

(1) 疲労荷重試験

疲労荷重試験にて、疲労耐久性の検証を行った。図-7に疲労荷重試験の概要図を示す。張出しスラブにおいては、スラブの上面对して死荷重などによる引張力が発生する。そのため、疲労荷重試験とその後の曲げ荷重試験においてはグラウト充填後の完成試験体の上面と下面を入れ替えて設置した。試験は、プレキャスト部と既設部の境界から両側に350mmの地点において、2点荷重により行った。また、試験体中央部とそれぞれの荷重点の直下に変位計を設置した。荷重条件として、最小荷重55kN、最大荷重80kN、荷重周期5Hzで200万回の繰り返し荷重を行った。最大荷重は鉄筋の降伏荷重の80%、最小荷重は試験機の制限値を基準として定めた。

(2) 曲げ荷重試験

(1)の疲労荷重試験後の試験体に対して、静的曲げ荷重試験を行い、残存耐力の確認を行った。曲げ荷重試験は、疲労荷重試験と同様の荷重治具を用いて、2点荷重にて最大荷重となるまでを目標に荷重を行った。

3. 試験結果

3.1 疲労荷重試験

CASE1, CASE2の疲労荷重試験時の荷重回数と変位量の関係をそれぞれ図-8, 図-9に示す。なお、変位量はプレキャスト部側荷重点直下の変位計の値を示す。200万回荷重時はCASE1, CASE2ともに変位の中央値が約

0.07mmであった。振幅はCASE1が約0.04mm, CASE2が0.02mmを示し、ほぼ同等の値であった。CASE1とCASE2を比較すると、変位量や振幅において、どちらも同等の値であったが、荷重回数が80万回を超えたあたりでCASE2の変位量が戻る傾向が確認された。これは試験途中で一時的に荷重を除荷したため、荷重状態が緩和されたことが原因と考えられる。

次に、疲労荷重試験におけるコンクリートの発生ひずみと荷重回数のグラフを図-10と図-11に示す。なお、ひずみ値は接合部から既存部側に350mm地点(荷重点直下)のコンクリートひずみゲージの値である。

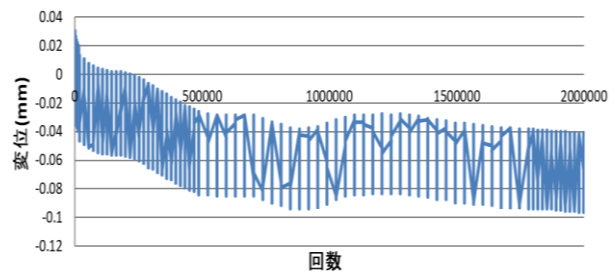


図-8 荷重回数と変位量 (CASE1)

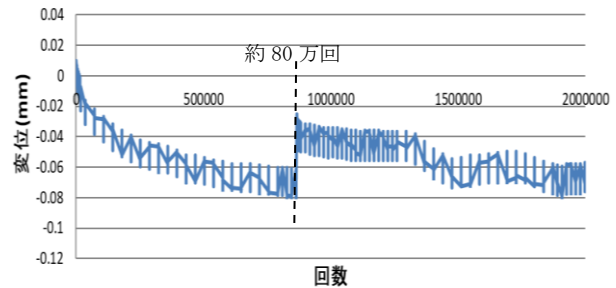


図-9 荷重回数と変位量 (CASE2)

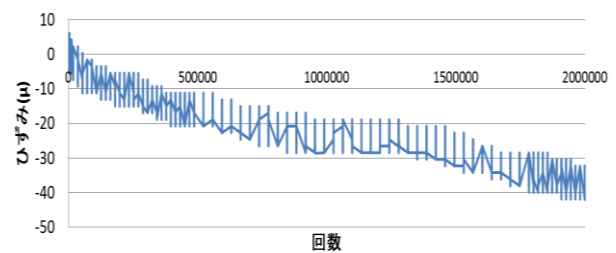


図-10 荷重回数とコンクリートのひずみ量 (CASE1)

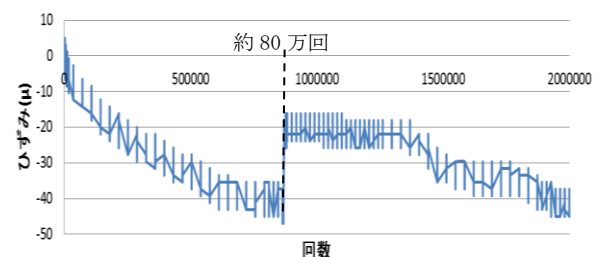


図-11 荷重回数とコンクリートのひずみ量 (CASE2)

コンクリートのひずみ量の振幅は CASE1, CASE2 とともにおよそ 10μ ほどであり、ほぼ同等の値を示した。疲労載荷試験後は両 CASE ともひずみ量が 40μ ほど引張側に増加した。また、載荷回数が 80 万回程を超えたあたりで CASE2 のひずみ量が少なくなる事象が確認された。この現象についても、試験途中で一時的に載荷を除荷したため、載荷状態が緩和されたことが原因と考えられる。

3.2 曲げ載荷試験

疲労載荷試験を行った試験体に対して静的載荷を行った結果を示す。図-12, 13 に曲げ載荷試験後の試験体 CASE1,2 のひび割れ図を示す。なお、CASE1 と CASE2 では最終的な載荷荷重が異なるため、350kN 載荷時のひび割れを赤線で示している。また、図-13 に関しては試験の都合上、試験体下面全体の写真を撮影できなかったため、試験体中央部のひび割れの様子のみを示す。

まず、両試験体の側面図を比較すると、プレキャスト構造となっている CASE1 の方が全体的なひび割れ本数が少なくなることが分かった。また、下面からのひび割れを比較しても CASE1 の方がひび割れ本数は少なかった。次に、CASE1 のプレキャスト部と既設部を比較すると、プレキャスト部と既設部ではプレキャスト部の方がひび割れ本数は少ないことが分かる。これはトルクによりプレストレスを導入しているため、その圧縮力が引張応力を相殺したためと考えられる。また、CASE1 に載荷した際に、上面のコンクリートに水平方向のひび割れが発生していることが確認された。

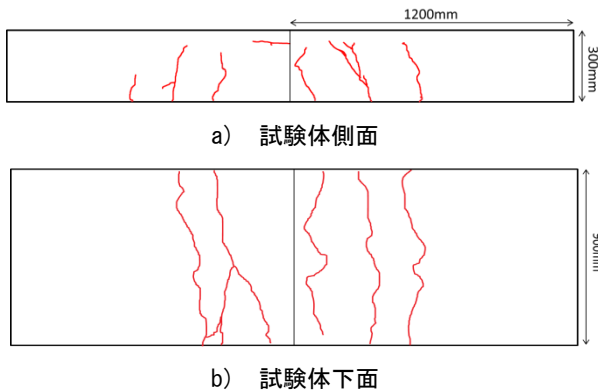


図-12 曲げ載荷試験後のひび割れ図 (CASE1)

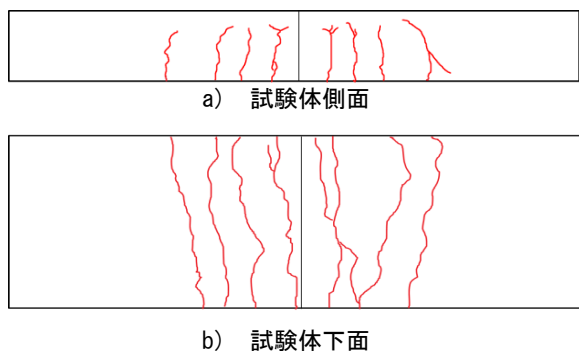


図-13 曲げ載荷試験後のひび割れ図 (CASE2)

次に、CASE1, CASE2 の曲げ載荷試験の載荷荷重と変位の関係をそれぞれ図-14 に示す。なお、図-14 は試験体中央の境界部の変位計の値を示す。

図-14 より、CASE1 と CASE2 はほぼ同様の挙動を示しており、降伏曲げ耐力は CASE1 で 257.8kN, CASE2 で 263.6kN であった。試験体の降伏曲げ荷重を計算すると 269.7kN であるので、概ね一致していることが分かる。また、終局曲げ耐力も同様に読み取ると、CASE1 で 359.7kN, CASE2 で 368.7kN であった。試験体の終局曲げ耐力を計算すると 364.8kN であるので、これについても概ね一致していることが分かる。以下の表-3 にそれぞれの降伏曲げ耐力と終局曲げ耐力を示す。

次に、載荷荷重と鉄筋のひずみ量の関係を図-15, 16 に示す。図-15, 16 は試験体中央を貫通する主鉄筋において、引張側の鉄筋(試験体下面)に貼り付けたひずみゲージの値を示している。図-15 は既存部側を、図-16 はプレキャスト部側の載荷点直下における鉄筋ひずみ量を示す。

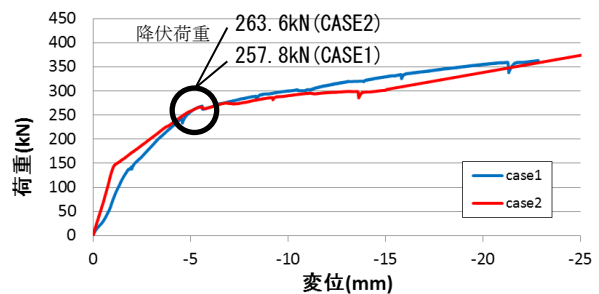


図-14 載荷荷重と変位量(試験体中央)

表-3 曲げ耐力の総括

	降伏曲げ耐力 My (kN・m)	終局曲げ耐力 Mu (kN・m)
計算値	269.7	364.8
CASE1	257.8	359.7
CASE2	263.6	368.7

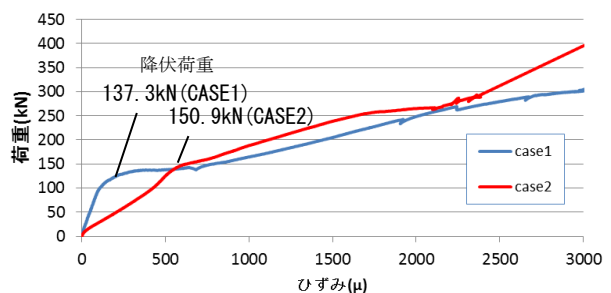


図-15 載荷荷重と鉄筋ひずみ(既存側載荷点)

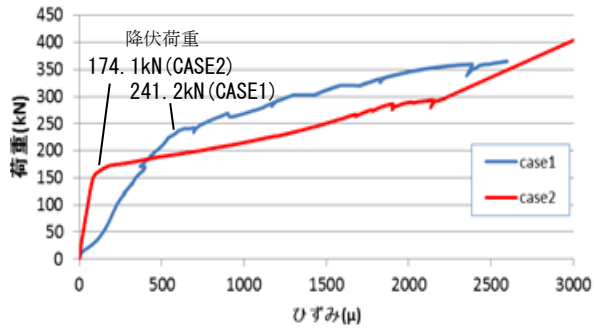


図-16 載荷荷重と鉄筋ひずみ(プレキャスト側載荷点)

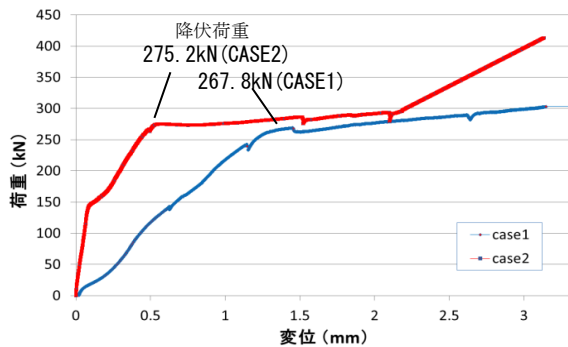


図-17 πゲージにおける載荷荷重と変位の関係

CASE1のひずみ量に着目すると、降伏した際の荷重は既存側で137.3kN、プレキャスト側で241.2kNとプレキャスト側の方が大きい値を示した。また、CASE2の降伏した際のひずみ量は図-15、16でそれぞれ150.9kN、174.1kNであり、平均値は162.5kNであった。次に、CASE1とCASE2を比較すると、図-15の既存側では降伏し始めはCASE1の方が少ないひずみ量であったが、その後はほぼ同様の挙動を示していることが分かる。図-16のプレキャスト側ではCASE1の方が降伏荷重、降伏ひずみにおいて大きな値を示した。

次に、プレキャスト部と既存部の境界に設置したπゲージの値を図-17に示す。CASE1とCASE2の降伏した際の荷重を比較すると、CASE1で267.8kN、CASE2で275.2kNとほぼ同等の結果であった。その際の変位量はCASE1で1.4mm、CASE2で0.6mmとCASE1の方が大きな値を示した。

4. 考察

4.1. 疲労載荷試験

上記の試験により、載荷回数に対して、変位量、コンクリートの発生ひずみはCASE1とCASE2でほぼ同様の値、挙動を示したことが分かった。また、試験後の外観はどちらも大きな変状は見られなかった。このことから、疲労耐久性能においてCASE1とCASE2は同等の性能であるということが考えられる。

4.2. 曲げ載荷試験

本試験により、載荷回数と変位量の関係において、計算値、CASE1、CASE2の降伏曲げ耐力と終局曲げ耐力はそれぞれほぼ同様の値を示し、変位の挙動も概ね一致した。このことから、CASE1はCASE2とほぼ同様の曲げ耐荷性能を持つと考えられる。図-17では約270kN載荷した際にCASE1の方が大きな変位量を示した。CASE1にはプレキャスト部と既存部の接合面において目開きが発生するため、同じ荷重ではCASE2よりも大きな変位を示したと考えられる。また、図-16のプレキャスト側の載荷点直下の鉄筋ひずみ量では、CASE1の方が降伏荷重、降伏ひずみともに大きな値を示した。これはCASE1のプレキャスト側では鉄筋軸方向に予めプレストレス力がかかっていることによる効果と考えられる。

次に試験体のひび割れ図を比較すると、プレキャスト構造となっているCASE1の方が全体的なひび割れ本数が少なく、ひび割れ幅も小さいことが分かった。これは、CASE1にはプレキャスト部と既存部の接合部に変位が集中し、目開きが生じるため、その分周囲のひび割れが少なくなったことが原因と考えられる。また、下面からのひび割れ状況を比較してもCASE1の方がひび割れは少なく、同様の原因が考えられる。また、CASE1に載荷した際に、上面のコンクリートに水平方向のひび割れが発生していることが確認された。プレキャスト部には載荷前からプレストレス力がかかっており、試験体上面は水平方向に載荷による圧縮力とプレストレスによる圧縮力がかかる。また、CASE1の試験体はプレキャスト部と既存部を接合するために箱抜き構造にしているため、試験体上面に局所的に応力が集中した。そのため、支圧により水平方向のひび割れが発生したと考えられる。

5. まとめ

簡易なプレストレス導入方法により接合されたスラブ版の耐荷性能を実験的に検討したところ、本検討の範囲において、以下のことが分かった。

(1) 55kN～80kNで200万回の疲労載荷試験を行った結果、外観等に目立った変化はなかった。また、200万回載荷後はCASE1、CASE2ともに変位量やコンクリートの発生ひずみにおいてどちらも同様の値、傾向を示していた。このことから、疲労耐久性においてCASE1とCASE2は同等の性能を持つと考えられる。

(2) 疲労載荷試験後の試験体に曲げ載荷試験を行った結果、外観的にはCASE1の方がCASE2に比べて、ひび割れの数が少なかった。これはプレキャスト部と既存部の接合面において、目開きが発生するため、その分周囲でひび割れが少なかったことが原因だと考えられる。また、プレキャスト部には予めプレストレス力をトルクにより

導入していることや箱抜き構造にしていたため、支圧により水平方向へのひび割れが発生した。

(3) 曲げ載荷試験における載荷荷重と変位量、鉄筋ひずみの関係は CASE1 と CASE2 を比較して、降伏曲げ耐力と終局曲げ耐力はほぼ同様の値を示し、挙動も同様な動きを示した。また、接合部に設置した π ゲージの値においても同様の挙動を示した。それぞれの値の差も実用範囲の中では問題ない程度であった。以上の結果から、曲げ耐荷性能においても CASE1 は CASE2 と同等の性能を持つと考えられる。

今後の課題としては、本実験においては暫定的に鉄筋一本あたり $20\text{kN}\cdot\text{m}$ 、総軸力 77.7kN のトルクを導入したが、曲げ載荷試験の際に、支圧により水平方向のひび割れが発生した。今回の試験でトルク $20\text{kN}\cdot\text{m}$ /本では十分な性能を有することが分かったので、今後は支圧によるひび割れが発生しない範囲でのトルク管理を検討し

ていく必要がある。また、本試験の構造では、スラブの端部にナットやワッシャーが露出することや接合部を設けることから、防水工の必要や鉄筋の錆びなどが懸念される。それに対して、構造上の工夫が必要と考えられるため、これに関しては今後検討していく予定である。

参考文献

- 1) 鈴木計夫, 常松 豪, 伊井敬二, 中村佳史: トルクによる簡易プレストレス導入工法の実証的研究, プレストレスコンクリート技術協会, 第 18 回シンポジウム論文集, pp.337-340, 2009.10
- 2) 日本工業規格 JIS B 1084 (2007)
- 3) 小島巧, 高見澤拓哉, 井口重信: ねじふし鉄筋を用いたトルクによる簡易なプレストレス導入に関する実験的検討, 2017.07