

# 論文 打継目地を有するスラブの破壊性状に関する基礎研究

山下 洋平<sup>\*1</sup>・小林 薫<sup>\*2</sup>・小林 寿子<sup>\*3</sup>・佐々木 尚美<sup>\*4</sup>

**要旨：**鉄道構造物における新設工事は、施工スペースや用地などによる制約を大きく受けるため、1つの構造物を分割して施工（施工時期をずらして施工）する場合がある。その際、列車荷重の影響を受けるスラブにおいて、コンクリートの打継目が生じる。コンクリートの打継目の処理方法の違いによる疲労耐久性に与える影響については明らかではない。そこで、打継目の処理方法の違いによる耐久試験を行い、各打継目処理方法の違いによるコンクリートの打継目構造の性能評価と耐久性の高い継目構造について検討を行った。その結果、打継目の側方に円形の樹脂を設けることで、打継目における疲労耐久性が向上する結果となった。

**キーワード：**高架橋スラブ、打継目、打継目処理方法、耐疲労性

## 1. はじめに

鉄道構造物における新設工事は、施工スペースや用地などの制約を大きく受けるため、1つの構造物を分割して施工（施工時期をずらして施工）する場合がある。（図-1）例えば、鉄道の高架化工事を行う場合、一期施工として高架橋を構築し、営業線の一部を高架橋上に移設したのち、二期施工として残りの部分を高架化する。その場合、列車荷重の影響を受けるスラブにおいて、コンクリートの打継目が生じる。既往の研究<sup>1)2)</sup>からも、コンクリートの打継目の目荒らし処理の深さが不十分である場合、静的載荷試験における耐力が大きく低下するとされている。また、コンクリートの打継目の処理方法についても、疲労耐久性に与える影響については明らかではない。

そこで、コンクリートの打継目処理方法の違いを確認するため、コンクリートの打継目のない試験体と3種類の異なるコンクリートの打継目処理をした試験体において静的載荷試験および、動的載荷試験として1,500万回繰返し載荷後の性能評価を目的とした静的載荷試験と疲労耐久試験を行った。これら試験結果からコンクリートの打継目処理方法の違いによるコンクリートの打継目構造の性能評価と耐久性の高いコンクリートの打継目構造について検討を行った。

## 2. 試験概要

### 2.1 試験体

一般的なラーメン高架橋のスラブは、スラブ高さ250mm程度、主筋D19～D25を150mm～250mm程度の間隔で配置している。これを踏まえ、試験体断面は幅を500mm、高さを250mmとした。また、縦梁間のモーメントからモーメントが0になる位置と試験装置の制限を考慮し、スパン長を1,500mmとした。コンクリートの打

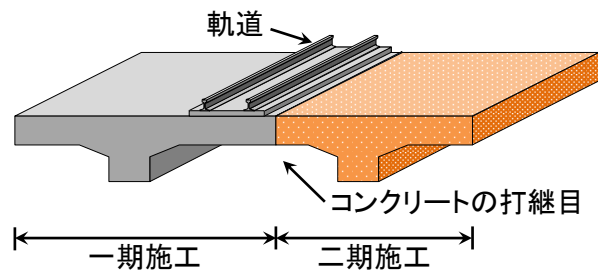


図-1 分割施工したスラブ形状

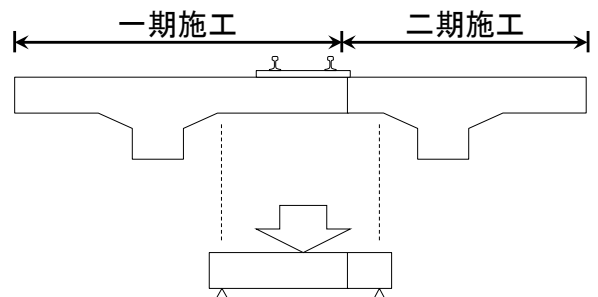


図-2 試験体着目イメージ図

継目は近年施工された鉄道高架橋の分割施工事例を参考にせん断スパンの中央に配置した。イメージ図を図-2に示す。

図-3に試験体の形状模式図を示す。コンクリートの打継目は、可動支点側のせん断スパン中央に設け、固定支点側には設けなかった。試験体のコンクリートには、普通セメントを使用した。また、鉄筋はスラブ下面の引張鉄筋をSD345のD19とし、上面の圧縮鉄筋とせん断補強筋はSD345のD13とした。引張鉄筋と圧縮鉄筋は試験体の打継目を貫通していることから、打継目の滑りに対するダウエル効果を有するものと考えられる。既設の鉄道高架橋スラブの設計では、せん断補強筋を配置していないため、せん断補強筋のない高架橋スラブ試験体

\*1 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 研究員 (正会員)

\*2 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 上席研究員 博(工) (正会員)

\*3 東日本旅客鉄道(株) JR 東日本研究開発センター フロンティアサービス研究所 主幹研究員 (正会員)

\*4 東日本旅客鉄道(株) 東京工事事務所 工事管理室 副課長 博(工) (正会員)

を設定した。そのため、打継目のある可動支点側には、支点と載荷点の間にせん断補強筋を設けていない。一方で、固定支点側は、載荷試験上せん断破壊させないため、SD345 の D13 を 100mm 間隔でせん断補強筋を配置し、補強した。

## 2.2 試験体パラメータ

試験体のパラメータを表-1 に示す。枝番は、載荷方法の違いを示しており、2.2 節で詳述する。

試験体 1 は、コンクリートの打継目のないものを想定し、一体打ちとした。試験体 2 はコンクリートの打継目処理をせず、打継いだものとした。また、コンクリート標準示方書施工編<sup>3)</sup>の 9.4 鉛直打継目の施工に「既に打ち込まれ硬化したコンクリートの打継面は、ワイヤブラシで表面を削るか、チッピング等により粗にして、十分吸水させた後、コンクリートを打ち継がなければならない。」と記載されている。そこで、試験体 3 は遅延剤を塗布し、硬化後水で洗い出した試験体、試験体 4 はチッピングにより深さ 5～10mm 程度の目荒らしをした試験体とした。試験体 5 は、試験体 3 と同様に遅延剤を用いたコンクリートの打継目処理をするとともに、打継目の両端と下面に直径 15mm の半円形溝を設け樹脂を充填したものとした。概要図を図-4、写真-1 に示す。

試験体 2, 3, 4, 5 のコンクリートの打継目は、5 日間養生し、スラブ表面に吸水させたのち、後打ちコンクリートを打設とした。

## 2.3 試験方法

今回想定したような分割施工では、一期施工後、スラブは 3 辺を梁に囲まれた 3 辺固定、二期施工後は 4 辺固定スラブの扱いではあるが、打継目を有することになる。試験体の支持条件は、スラブに発生する曲げモーメントの正側分布に近似するために単純支持とした。載荷は、二点載荷としスパン中央から、250mm ずつ離れた位置に載荷した。

試験は、静的載荷試験と動的載荷試験を実施した。静的載荷試験は、試験体 1-1, 2-1, 3-1, 4-1, 5-1 について実施した。動的載荷試験は、試験体 1-2, 3-2, 4-2, 5-2 について実施した。

試験体 1-2, 3-2 は輸送量の多い重要線区(一級線区)を対象とし、1,500 万回の載荷後、性能確認のため静的載荷を実施した。4-2, 5-2 においては、試験体が破壊されるまで繰返し載荷を行った。

計測箇所は、鉛直変位を試験体中央と両支点部、主筋ひずみを試験体中央から 0mm, 500mm, 750mm の位置で計測した。コンクリートのひずみは、試験体中央断面の上面と下面で計測した。さらに、コンクリートの打継目断面では上面、下面、側面について  $\pi$  型変位計を用いて、打継目箇所の開きについて計測した。

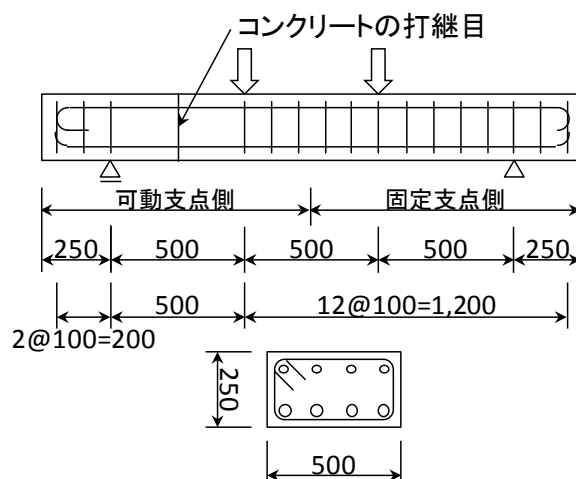


図-3 試験体概要

表-1 試験体パラメータ

| No.    | 打継ぎ目処理   | 載荷方法 | コンクリート強度               |                        |
|--------|----------|------|------------------------|------------------------|
|        |          |      | 先打ち                    | 後打ち                    |
| 試験体1-1 | 打継ぎ目なし   | 静的載荷 | 28.0 N/mm <sup>2</sup> | —                      |
| 試験体1-2 |          | 動的載荷 | 29.6 N/mm <sup>2</sup> | —                      |
| 試験体2-1 | 無処理      | 静的載荷 | 29.7 N/mm <sup>2</sup> | 37.7 N/mm <sup>2</sup> |
| 試験体3-1 |          | 静的載荷 | 36.5 N/mm <sup>2</sup> | 28.3 N/mm <sup>2</sup> |
| 試験体3-2 | 遅延剤      | 動的載荷 | 24.9 N/mm <sup>2</sup> | 29.6 N/mm <sup>2</sup> |
| 試験体4-1 |          | 静的載荷 | 31.9 N/mm <sup>2</sup> | 36.2 N/mm <sup>2</sup> |
| 試験体4-2 | チッピング    | 動的載荷 | 40.6 N/mm <sup>2</sup> | 42.3 N/mm <sup>2</sup> |
| 試験体5-1 |          | 静的載荷 | 33.9 N/mm <sup>2</sup> | 37.3 N/mm <sup>2</sup> |
| 試験体5-2 | 遅延剤+溝に樹脂 | 動的載荷 | 28.6 N/mm <sup>2</sup> | 40.0 N/mm <sup>2</sup> |

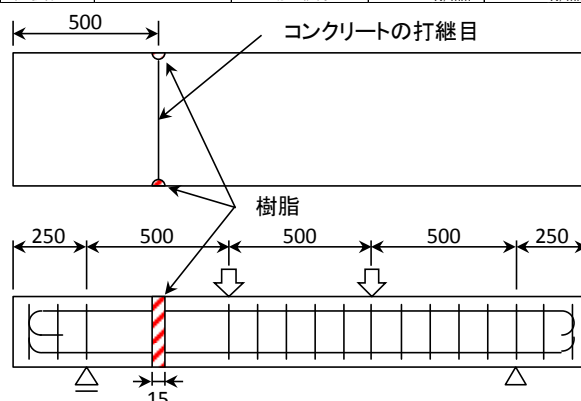


図-4 No. 5 試験体概要図

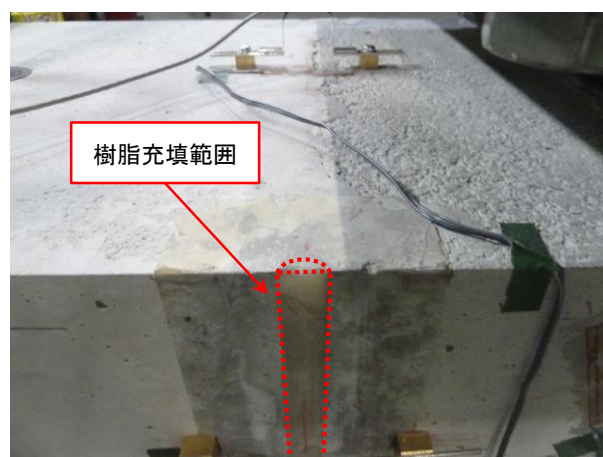


写真-1 樹脂充填状況

## 3. 静的載荷試験結果

### 3.1 最大耐力

各試験体の最大耐力を表-2 に示す。試験体のコンク

リート圧縮強度は若干のばらつきはあるが、各試験体の最大耐力は、471.5kN、263.8kN、405.6kN、408.3kN、399.2kN であった。コンクリートの打継目を設けない試験体 1-1 との最大耐力の比は、No.2 から 0.56, 0.86, 0.87, 0.85 となり、コンクリートの打継目処理をしない試験体 2-1 以外は、打継目を設けない試験体 1-1 に比べ 85% 程度の耐力を有している結果となった。

### 3.2 荷重－たわみ関係

本実験より得られた各試験体の荷重－たわみの関係を図－5 に示す。

最大荷重時のたわみ量は、試験体 1-1 から 112.6mm、6.4mm、22.8mm、25.2mm、42.6mm となり大きく異なる結果となった。一方、たわみ量 2.5mm 以下における剛性は、59.5kN/mm～67.8kN/mm 程度となり、剛性について大きな差はなかった。

### 3.3 たわみ－ひび割れ幅関係

試験体中央のたわみ量とコンクリートの打継目断面側面中央の打継目開き量の関係を図－6 に示す。コンクリートの打継目処理をしていない試験体 2-1 は、たわみ量が 3.0mm 以降、たわみ量 0.1mm につき約 0.1mm コンクリートの打継目幅が広がっていく結果となった。同様に、試験体 3-1、4-1 においても、たわみ量が約 1.5mm のときから、たわみ量 0.1mm につき約 0.001mm コンクリートの打継目幅が広がっていく結果となった。一方で、試験体 5-1 では、たわみ量が約 40mm になるまでコンクリートの打継目幅の広がりはほとんど見られなかった。

チッピングや遅延剤を用いてコンクリートの打継目処理を行うことで、コンクリートの打継目における開きは抑えられ、側面と下面に樹脂を充填することでさらにコンクリートの打継目幅の開きを抑制する結果となった。

### 3.4 破壊性状

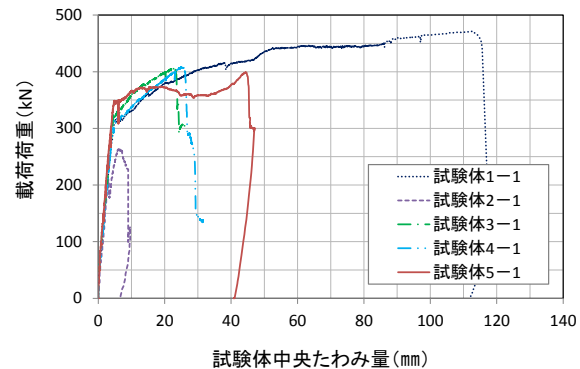
試験体 1-1 の破壊形状を写真－2 に示す。試験体載荷点付近の圧壊と、打継目の載荷点側から支点にかけて斜めひび割れが卓越し、荷重低下となった。

試験体 2-1 の鉛直変位 3.0mm のときのひび割れ発生状況を写真－3 に示す。コンクリートの打継目部上端から 50mm 下がった位置を起点として、載荷点側に向かってひび割れが生じ、ひび割れの長さは約 248mm となっていた。コンクリートの打継目部下端から 50mm 上がった位置を起点として、支点側に向かって 245mm ひび割れが生じた。その後、ひび割れ幅が広がっていき主筋の降伏により最大荷重となり、その後急激に載荷荷重低下を生じた。試験体断面上下に配置した軸方向鉄筋位置は、かぶり 53mm であり、打継目位置におけるひび割れの起点が一致している。よって、軸方向鉄筋によるかぶりコンクリートの押し抜きが生じたと考えられる。

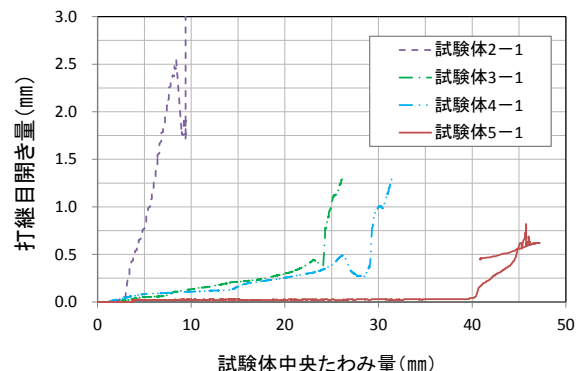
試験体 3-1 の載荷荷重低下後の破壊形状を写真－4 に

表－2 各試験体の最大耐力

|         | 実験値      |            |              |
|---------|----------|------------|--------------|
|         | 最大荷重     | 耐力比        | 最大たわみ        |
|         | Pmax     | Pmax/Pmax1 | $\delta$ max |
| 試験体 1-1 | 471.5 kN | 1.00       | 112.6 mm     |
| 試験体 2-1 | 263.8 kN | 0.56       | 6.4 mm       |
| 試験体 3-1 | 405.6 kN | 0.86       | 22.8 mm      |
| 試験体 4-1 | 408.3 kN | 0.87       | 25.2 mm      |
| 試験体 5-1 | 399.2 kN | 0.85       | 42.6 mm      |



図－5 静的載荷 荷重－たわみ曲線



図－6 たわみ－打継目開き量曲線



写真－2 試験体 1-1 破壊状況

示す。コンクリートの打継目処理を行った試験体 3-1、4-1、5-1 では、曲げひび割れが入った後、支点部からのひび割れがコンクリートの打継目で一度ひび割れの進展が止まり、少し上にシフトしてから載荷点まで伸びているようなひび割れが生じた。その後、最大荷重時は、打継目を貫通し、載荷点と支点をつなぐような斜めひび割れが卓越した。このようなひび割れ発生状況は、打継目処理の違いによる大きな違いはなかった。試験体 3-1、4-1、5-1 では、試験体 2-1 にみられるようなコンクリートの打継目近傍で上下のかぶりコンクリートが押し出さ



れるような破壊性状による荷重低下は見られなかった。

#### 4. 動的載荷試験結果

##### 4.1 載荷概要

繰返し載荷荷重は、列車荷重を想定した高架橋の実スラブの設計値となる鉄筋応力度を参考に、コンクリートの打継目のない試験体 1-1 の静的載荷試験結果から最大荷重を 170kN とした。最小荷重を 10kN とし、5Hz の正弦波による繰返し載荷を実施した。

繰返し載荷試験は、繰返し載荷後の性能評価試験と繰返し疲労載荷試験の 2 つのパターンで行った。繰返し載荷後の性能評価試験は、1500 万回繰返し載荷後、静的に載荷し、耐荷性能の確認を目的とし実施した。繰返し載荷回数を 1500 万回とした理由は、輸送量が多い鉄道線区として 1 級線を想定し、決定した。繰返し疲労載荷試験は、繰返し載荷を行い、疲労破壊させることで疲労性能を確認する目的で実施した。繰返し載荷後の性能評価試験では、コンクリートの打継目のない試験体 1-2 と遅延剤を用いた打継目処理をした試験体 3-2 を用いた。繰返し疲労載荷試験では、チッピングを用いた打継目処理をした試験体 4-2 と遅延剤を用いたコンクリートの打継目処理をするとともに、コンクリートの打継目の両端に直径 15mm 半円形の溝を設け樹脂を充填した試験体 5-2 を用いた。

##### 4.2 繰返し載荷後の性能評価

###### (1) 荷重－たわみ関係

静的載荷試験を行った試験体 1-1、3-1 と 1,500 万回載荷した後の試験体 1-2、3-2 の荷重変位曲線を図-7 に示す。試験体 3-2 は 340kN 載荷後、再度静的載荷を実施したところ荷重が上がらなかったため、静的載荷荷重 340kN 時を示す。

コンクリートの打継目を設けない試験体 1-1、1-2 を比較すると、最大荷重が 471.5kN から 400.0kN に低下し、載荷荷重 0kN～300kN の範囲での剛性が 68.4kN/mm から 47.1 kN/mm となった。また、コンクリートの打継目に遅延剤を用いて打継目処理を行った試験体 3-1、3-2 を比較すると、載荷荷重 0kN～300kN の範囲の剛性は 59.5 kN/mm から 59.4kN/mm となり、ほとんど変わらないことが分かった。

###### (2) 破壊性状

試験体 1-2 の最大荷重時の状況を写真-5 に示す。1,500 万回載荷時点では、載荷点から支点を結ぶような斜めひび割れが生じた。静的載荷により試験体中央下面の曲げひび割れが卓越し、等曲げ区間上縁部のコンクリートが圧壊し、荷重が低下した。静的試験終了後、試験体下面のかぶりコンクリートをはつとり主筋を確認したところ、破断していたことを確認した。

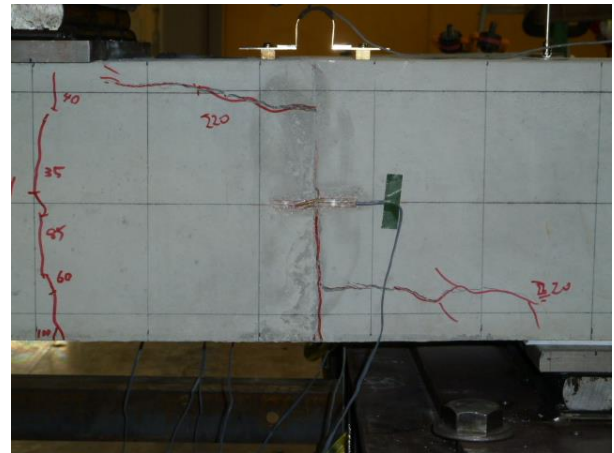


写真-3 試験体 2-1 鉛直変位 3.0 mm 時点破壊状況

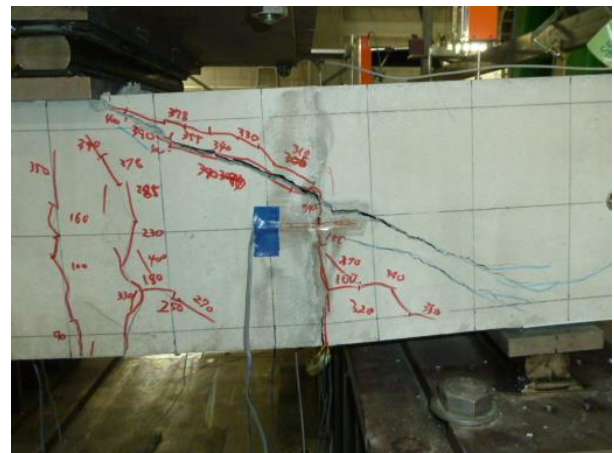


写真-4 試験体 3-1 破壊状況

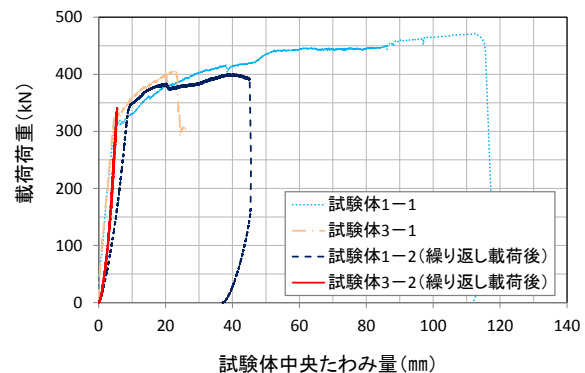


図-7 1500 万回繰返し載荷前後の荷重－たわみ曲線

また、試験体 3-2 の荷重低下後の状況を写真-6 に示す。1,500 万回載荷時点では、試験体 1-2 よりひび割れ数は少なかったが、曲げひび割れ、斜めひび割れはどちらも生じていた。1,500 万回載荷後の静的載荷試験結果は、静的載荷を行った試験体 3-1 同様、コンクリートの打継目を貫通するような斜めひび割れが卓越し、最大荷重となった。試験体 3-2 では、主筋の破断は見られなかった。

##### 4.3 繰返し載荷試験結果

###### (1) 繰返し載荷回数－たわみ関係

繰返し載荷回数とたわみの関係を図-8 に示す。

グラフ縦軸の上限はたわみ量 8.0mm までとした。同図

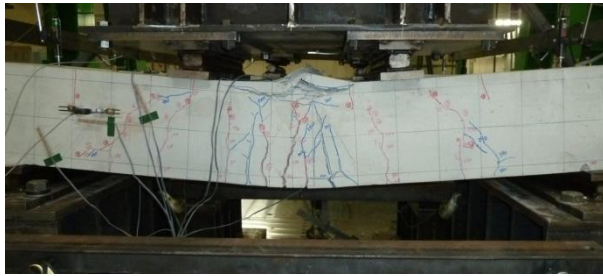


写真-5 試験体 1-2 破壊状況

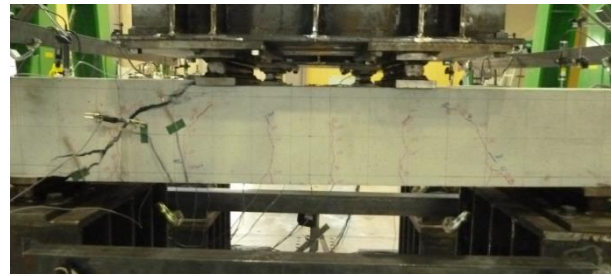


写真-6 試験体 3-2 破壊状況

より荷重回数 1 回目のたわみ量から緩やかな増加となっていることが分かった。1 回目のたわみは、試験体 1-2, 3-2, 4-2, 5-2 はそれぞれ、2.1mm, 2.2mm, 2.2mm, 2.3mm であり、1,500 万回荷重時は、6.3mm, 3.8mm, 5.0mm, 4.4mm であった。また、試験体 4-2 は、繰返し荷重回数 25,318,211 回、試験体 5-2 は、93,559,374 回るとき試験装置に設定した鉛直変位の制限値に達した。試験体 5-2 では、コンクリートの打継目のない固定支点側のひび割れが卓越し破壊した。図-8 の繰返し荷重回数 7,000 万回付近において破壊前にたわみ量が低下しているのは、試験装置の都合上、一時的に 5 か月間程度荷重が停止していた影響<sup>4)</sup>と考えられる。

## (2) 繰返し荷重回数-ひずみ関係

試験体 1-2, 3-2, 5-2 における繰返し荷重回数と、試験体中央とコンクリートの打継目位置の主筋ひずみの関係を図-9 に示す。

試験体 1-2 では、500 万回から 600 万回にかけて、コンクリートの打継目部の主鉄筋のひずみが 2,229  $\mu$  となり、主筋の降伏ひずみ 2,050  $\mu$  より大きくなった。また、試験体 3-2 でも 600 万回から 800 万回にかけてコンクリートの打継目部の主鉄筋が降伏した。

すべての試験体において、1 回目の荷重では試験体中央の主筋ひずみが、打継目位置の主筋ひずみより大きくなっている。また繰返し回数を追うごとに試験体中央の主筋ひずみ、打継目部の主筋ひずみどちらも増加する傾向であった。試験体 1-2 では 500 万回るとき、試験体中央とコンクリートの打継目位置の主筋のひずみが、1,393  $\mu$ , 1,249  $\mu$  であったことに対して、600 万回においては、1,151  $\mu$ , 2,229  $\mu$  となり降伏していた。同様に試験体 3-2 においても、500 万回るとき、試験体中央とコンクリートの打継目位置の主筋のひずみが、1,222  $\mu$ , 1,140  $\mu$  であったことに対して、600 万回においては、1,236  $\mu$ , 1,738  $\mu$  となっており、コンクリートの打継目の方が大きな値を示した。これは、静的荷重試験でも生じていたが、コンクリートの打継目が広がり、コンクリートの打継目にある主筋に応力が集中したためであると考えられる。また、試験体 5-2 においても、繰返し荷重回数を重ねるごとに試験体中央、コンクリートの打継目における主筋ひずみは増加したが、降伏には至らなかった。

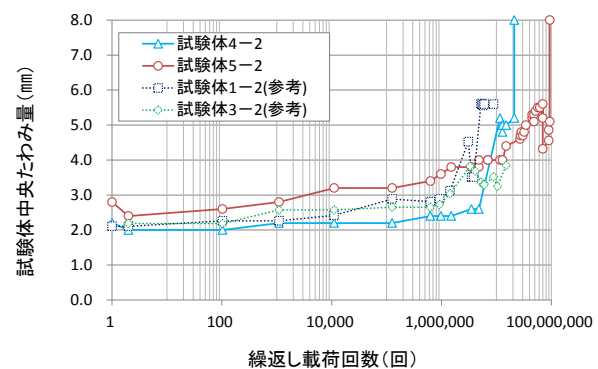


図-8 繰返し荷重回数 - たわみ曲線

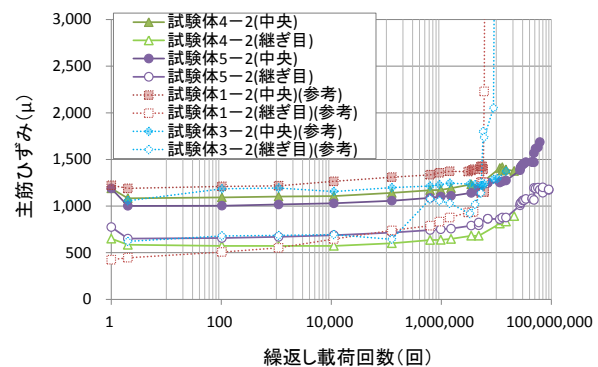


図-9 繰返し荷重回数 - ひずみ曲線

## (3) 破壊性状

試験体 4-2 の破壊状況を写真-7 に、試験体 5-2 を写真-8 にそれぞれ示す。試験体 4-2 では、コンクリートの打継目部上端から 50mm 程度下がった位置を起点として、荷重点側に向かってひび割れが生じた。コンクリートの打継目部下端から 80mm 程度上がった位置を起点として、支点側に向かってひび割れが生じた。その後、コンクリートの打継目を介してつながったひび割れが生じ、荷重が低下した。これは、打継目処理を行わなかった試験体 2-1 の静的荷重試験時と同様の破壊状況を示した。このことから、繰返し荷重により、打継目の一体性が低下したことが原因と考えられる。

試験体 5-2 では、試験体スパン中央の下面からひび割れが生じ、打継目側においてコンクリートの打継目中央より上方から荷重点に向かう斜めひび割れが生じた。打継目のない固定支点側では、斜めひび割れが生じた。その後、固定支点側の斜めひび割れが卓越し、荷重が低下することで固定支点側が破壊する結果となった。



写真 - 7 試験体 4-2 壊状況

試験体 5-2 は、コンクリートの打継目両端に直径 15mm のエポキシ樹脂が半円状に充填されている。このエポキシ樹脂の存在により、せん断補強筋が配置されている打継目のない固定支点側よりも疲労耐久性が高くなった。この理由としては、エポキシ樹脂により打継目のずれが抑制され、繰返し回数が増加しても、打継目の一体化が保持されていたためと考えられる。

## 5. まとめ

各処理方法の違いによるコンクリートの打継目構造の性能評価と耐久性の高いコンクリートの打継目構造について検討を行った。検討結果を以下にまとめる。

- (1) 遅延剤やチッピングを用いたコンクリートの打継目処理した試験体と遅延剤を用いたコンクリートの打継目処理し、コンクリートの打継目の両端に樹脂を充填した試験体では静的載荷試験での耐力の違いはなかった。
- (2) 遅延剤やチッピングを用いたコンクリートの打継目処理をした試験体と遅延剤を用いたコンクリートの打継目処理し、コンクリートの打継目の両端に樹脂を充填した試験体は、コンクリートの打継目がない試験体に比べ、85%程度の耐力を有していた。また、コンクリートの打継目処理を行わず打ち継いだ試験体に比べ、55%程度の耐力となった。
- (3) チッピングや遅延剤を用いたコンクリートの打継目処理を行うことで、コンクリートの打継目における振幅は抑えられ、側面と下面に樹脂を充填することでさらにコンクリートの打継目幅の開きを抑制する結果となった。
- (4) コンクリートの打継目処理をしていない試験体では、軸方向鉄筋によるかぶりコンクリートの押し抜きが生じたと考えられる。
- (5) コンクリートの打継目の有無、処理方法にかかわらず、1,500 万回までの繰返し載荷時のたわみ量の増

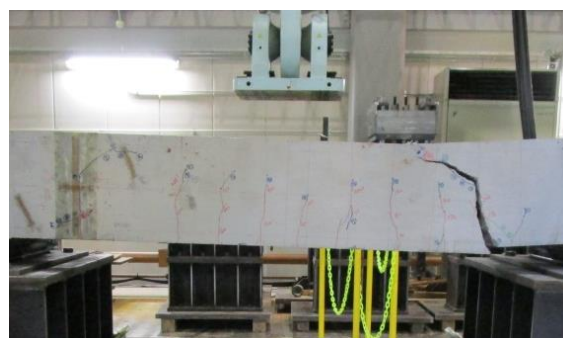


写真 - 8 試験体 5-2 破壊状況

加傾向は同じで、増加の割合も大きな差は見られなかった。

- (6) 1,500 万回繰返し載荷後の静的載荷では、最大荷重と剛性の大きな低下は見られなかった。
- (7) チッピングにより打継目処理した試験体において繰返し載荷を行った結果、打継目処理を行わなかった試験体の静的載荷試験時と同様の破壊状況を示した。このことから、繰返し載荷により、打継目の一体化が低下したことが原因と考えられる。
- (8) 遅延剤を用いたコンクリートの打継目処理をし、側面と下面に溝を設け樹脂を充填した試験体は、チッピングによるコンクリートの打継目処理した試験体より、3 倍以上の繰返し載荷回数に耐えることができた。
- (9) 遅延剤を用いたコンクリートの打継目処理をし、側面と下面に溝を設け樹脂を充填した試験体は、エポキシ樹脂の存在により、せん断補強筋が配置されている打継目のない固定支点側よりも疲労耐久性が高くなった。これは、エポキシ樹脂により打継目のずれが抑制され、繰返し回数が増加しても、打継目の一体化が保持されていたためと考えられる。

## 参考文献

- 1) 松田浩，牧野高平，山下務，中島朋史：コンクリート打継部の表面粗度の計測・定量化と曲げ・せん断付着特性に関する研究，構造工学論文集，Vol.51A，pp.1345-1352，2005.3
- 2) 舌間孝一郎，岡村雄樹，足立一郎：ウォータージェット処理条件がコンクリートの表面処理深さに及ぼす影響，土木学会第 57 回年次学術講演会
- 3) (社)土木学会：コンクリート標準示方書 施工編，2012
- 4) ACI215 委員会：繰返し荷重を受けるコンクリート構造物の設計に対する考察，コンクリート工学 Vol.13，1975