

図-4 付着モデルの定式化

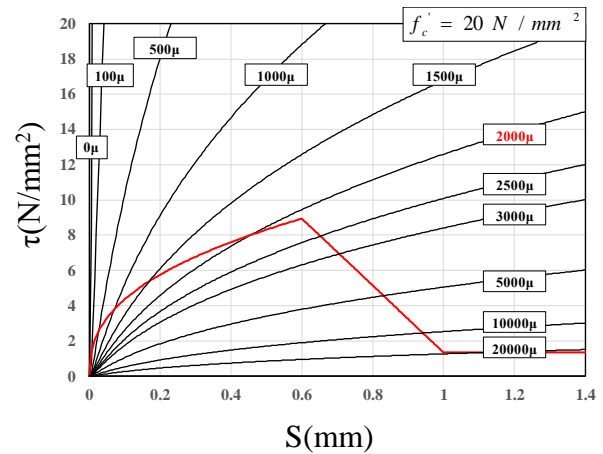


図-5 付着応力-すべり-ひずみ関係

試験体を実験 1, 実験 5, グラウトなしの試験体を実験 2, 実験 6 とする。

## 2.2 解析概要

図-3 に試験体の要素分割図を示す。図の試験体の断面図について、シーす管の面積とグラウト要素部分の面積がほぼ等しくなるように、メッシュ分割をしている。

ポストテンション PC はりの解析的性能評価手法の検討にあたり、LECOM<sup>2)</sup>に野中の付着モデル<sup>3)</sup>を導入した解析ツールを使用した。PC 鋼材とグラウト間の付着には、図-4 に示すモデルを使用した。グラウト要素内の任意位置に配置された PC 鋼材節点位置にグラウト要素の仮想節点を想定し、仮想節点の変位を形状関数マトリクス  $[N]$  により評価し、座標変換マトリクス  $[T]$  を用いるとともに、PC 鋼材軸に沿った積分点のすべり量を  $[M]$  および  $[G]$  により評価している。マトリクス  $[Q]$  が、一般的に変位からひずみを評価する  $[B]$  マトリクスに相当する。付着応力-すべり関係  $[D]$  には、図-5 に示す島ら<sup>4)</sup>が提案する異形鉄筋用の付着応力  $\tau$ -すべり  $S$ -ひずみ  $\epsilon$  関係を準用した。本モデルでは、図に示すように、鋼材のひずみが大きくなるにつれて付着強度が低減する。図中の赤線は、CEB モデル<sup>5)</sup>である。本研究では、丸鋼である PC 鋼材の付着は異形鉄筋と比較して小さいことから、次式に示すように、島らの提案式に付着強度を低減させるパラメータ  $\alpha$  を導入した。

$$\tau = \alpha \times 0.73 f'_c (\ln(1 + 5s))^3 / (1 + \epsilon \times 10^5), \quad s = 1000 S / D$$

ここで、 $D$  は鋼材径であり、本研究では、 $S$  を鋼材節点とグラウト仮想節点の相対変位とし、パラメータ  $\alpha$  をほぼ 0, 0.1, 0.3, 0.6 と設定し、それぞれの名称を Case0, Case1, Case2, Case3 とした。本研究は、PC 鋼材の付着が PC はり部材の挙動にどのように影響するかを検討した。

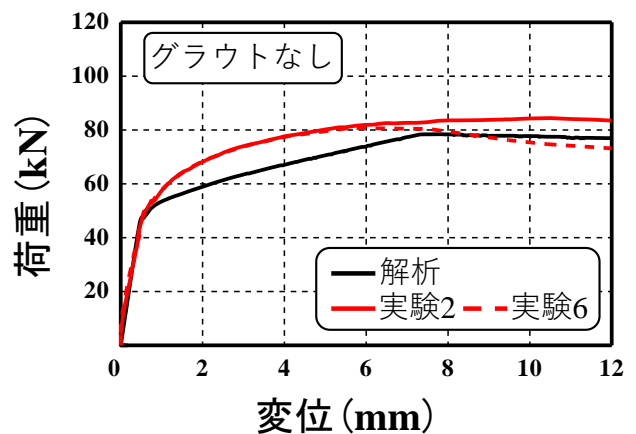
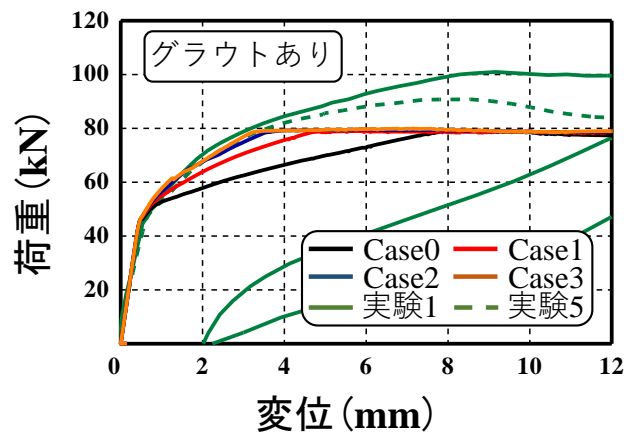


図-6 荷重-変位関係

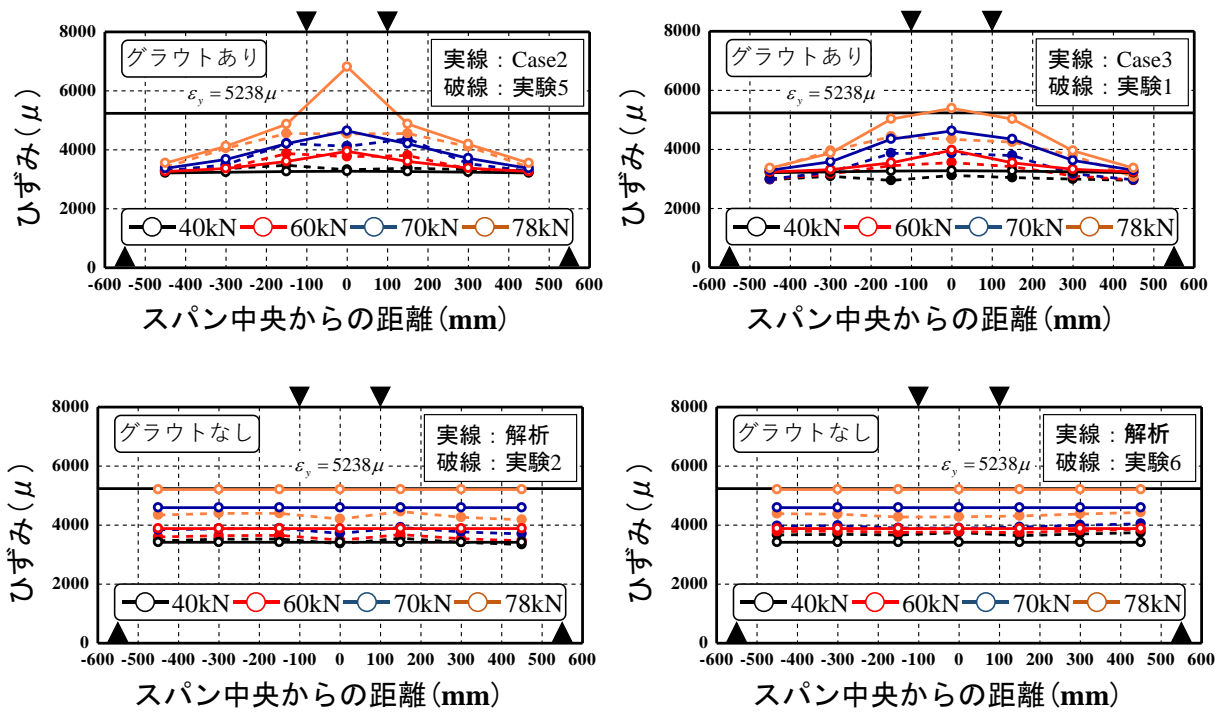


図-7 ひずみ分布

### 3. 解析結果

図-6 に荷重－変位関係を示す。グラウトされている場合、パラメータを増加させると最大荷重に達する変位が短い

解析だと鋼材の降伏で耐力が決るが、実験では共に解析より最大荷重が高い値を示した。なお、RC断面同様に、平面保持の仮定に基づき、コンクリートの引張抵抗を無視、コンクリートの圧縮合力算出に等価応力ブロックを使用して算出される終局曲げモーメントから求められる終局荷重は、71.5kNである。要因として、グラウトあり時のシーす管が試験体の実験で耐力増加に寄与したのではないかと考えられる。

グラウトされていない場合は、グラウトされている場合の荷重－変位関係ほど最大荷重の変化はなく良いと言える。しかし、解析だと変位が1mmより前からほぼ直線的に緩やかに最大荷重に達するのに対し、実験だと、ほぼ直線とはならず弧を描くように最大荷重と達した。これは、ある荷重に達した時シーす管と鋼材が触れ、その摩擦によりこのような剛性増加になったのではないかと考える。

図-7にひずみ分布を示す。図には、グラウトされている場合、両図、解析、実験共にスパン中央のひずみが高く、スパン中央から離れるほどひずみは低くなり、グラフの形は正しいといえる。

グラウトされていない場合は、解析だと、試験体にどの値の荷重が掛かっている場合でも、スパン全体のひずみは同じ値である。しかし実験だと、スパン中央だけどちらのグラフも低くなっているのが分かる。一般に、等曲げ区間で曲げモーメントが最大になるので、ひずみも大きくなると考えられるはずだ。だがこちらも、グ

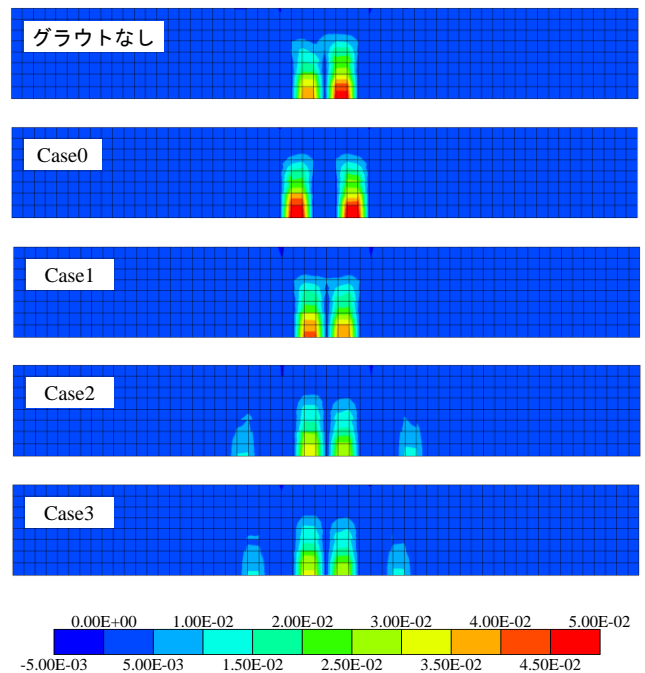


図-8 解析による最大荷重のひび割れ図

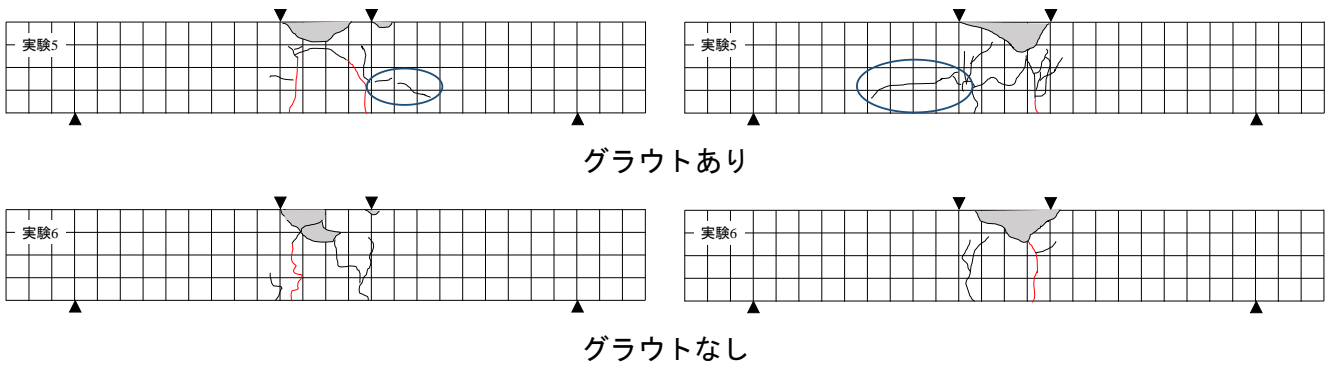


図-9 実験によるひび割れ図

ラウトされていない場合の荷重-変位関係の時と同様に、シース管と鋼材の摩擦により、ひずみの値が低くなったと考えられる。

また、どの図も共に解析より実験の方がひずみの値が低いことが分かる。恐らく、鋼材に緊張を与えた際に、鋼材がコンクリートの試験体ごと縮もうとし、初期ひずみがさらに小さくなった可能性がある。

図-8に解析によるひび割れ図を示す。グラウトなし、Case0、Case1は2箇所でひび割れが起き、Case2、Case3は4箇所でひび割れが起きている。これは、付着強度を低くしたらひび割れは減るので松村が行った実験は付着強度が高かったと考えられる。また、 $\alpha$ の値を上げるにつれ、ひび割れが小さくなっていることが分かる。

図-9に実験によるひび割れ図の一部を示す。図中の赤で描いた線は、ひび割れが大きかった箇所である。グラウトされていない実験6では荷重をかけた点のどちらかに大きいひび割れが生じた。図-8のグラウトなしのひび割れ図でも同じように、ひび割れが生じている片側だけひび割れが大きいことがはっきりと分かる。グラウトされている実験5は荷重をかけた箇所から大きいひび割れが起きた。図-8で表したように、グラウトされている4つのCaseすべて、ひび割れが起きている箇所の大きさは概ね左右対象であり、正しい解析結果といえる。

また、実験5では、図-8の解析で表したひび割れとは明らかに違う箇所を青の○で囲った。これは、このひび割れの位置にシース管が通っているためできたものだと考えられる。実験6でこのひび割れが現れず、グラウトによる影響の差だと考えられる。

#### 4. 結論

本研究では、付着モデルを応用してグラウトの有無、グラウト後付着挙動を考慮できるポストテンションPC部材の解析技術を構築した。グラウトなしの耐荷力、グラウトの有無に関わらずひずみ分布性状をおおよそ予測することが出来、付着パラメータの違いが解に与える影響を剛性増加、ひび割れ性状から解析的に評価することも確認した。付着パラメータは10%~30%が妥当だと考える。また、解析精度向上には、シース管とPC鋼棒の摩擦や、グラウトとの付着挙動の適切なモデル化が必要である。

#### 参考文献

- 1) 松村：PC鋼材の付着がPCはり部材の挙動に及ぼす影響の実験的評価，2020年度中部大学卒業論文，2021
- 2) 石川靖晃・伊藤睦・荒畑智志・河合真樹・原健悟：コンクリート構造物建設シミュレータの開発－各種初期応力影響下の保有耐荷力解析プラットフォーム－，J-STAGE 53巻2号，pp172-180，2015
- 3) 野中萌生：鉄筋とコンクリート間の付着モデルの開発，2019年度中部大学卒業論文
- 4) 島 弘・周 礼良・岡村 甫：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力-すべり-ひずみ関係，土木学会論文集，第378号V6，pp. 165-174，1987
- 5) RC Elements under Cyclic Loading, CEB State of the Art Report,1996

## 付着が RC はり部材の挙動に及ぼす影響の数値解析的検討

EC17034 田中 悠斗

### 1. 序論

近年の日本における設備投資の傾向は、新しく構造物を作る施設建設よりもこれまでに造った構造物をより長く安全かつ適切に使用する施設保全への割合が増加している。そのため、既設のコンクリート構造物はより合理的に維持管理をしていかなければならない。いわば、構造物の長寿命化を進めている。この構造物の長寿命化を目指す上で、鉄筋腐食の問題は大きな課題となると考えられる。鉄筋腐食による構造物の劣化はとても進行が早く、構造物に対して著しい損傷を与え、損傷状況に応じては耐荷性能が激減する<sup>1)</sup>。

鉄筋腐食が RC 部材の曲げやせん断耐荷性能に及ぼす影響は定性的に評価されつつあるが、現状においても定量的評価には至っていない。その理由は、鉄筋腐食が RC 部材の耐力に影響する主たる劣化・損傷要因が、鉄筋の断面減少、鉄筋とコンクリート間の付着劣化、腐食膨張に伴うコンクリートのひび割れの3種であり、これら個々の要因が互いに影響を及ぼしているためであると考えられる。加えて、鉄筋腐食状況が一樣ではないこともその要因と考えられる。そのため、まずは個々の要因が RC 部材の耐荷性能にどの程度影響を及ぼすのかを把握する必要があると考えられる。そこで本研究では、宮崎の RC はり部材の載荷実験<sup>2)</sup>を解析対象として、鉄筋とコンクリート間の付着が RC はり部材の挙動に及ぼす影響と付着喪失部位が RC はり部材の挙動に及ぼす影響を数値解析的に評価することを目的とする。

### 2. 解析対象とした実験概要および解析概要

#### 2.1 実験概要

解析の対象とした同年度の宮崎の卒業研究で用いた RC はりの諸元を図-1に示す。宮崎の実験では鉄筋にコーキング材を塗ることで、コンクリートと鉄筋間の付着を切り、鉄筋の腐食を模擬的に再現したものである。幅 120mm、高さ 200mm の断面に有効高さ 162mm の位置に D16 鉄筋を 2 本配置している。図-2 に解析モデルと宮崎の実験で設定された付着喪失部位を示す。健全な状態で S1~S4 はせん断破壊するように、M1 と M2 は曲げ破壊するように設計されている。S1 と M1 は付着喪失部位のない健全試験体、S2 と M2 は支点間の鉄筋に付着喪失を模擬した試験体、S3 と S4 はそれぞれせん断スパン内の付着喪失および等曲げ区間内の付着喪失を模擬した試験体である。

実験では、図-2 に示す位置に載荷点・支点が設けられ、せん断スパン比は約 2.5 である。計測項目は荷重、変位および図中に示す位置の引張鉄筋ひずみであり、支点外位置の鉄筋ひずみも計測されている。コンクリートの圧縮強度は 28.2N/mm<sup>2</sup>、鉄筋の降伏強度は S シリーズが 426.7N/mm<sup>2</sup>、M シリーズが 373.3 N/mm<sup>2</sup> である。マクロ式による健全な状態でのせん断および曲げ耐力は、S シリーズがそれぞれ 62.4kN および 112.3kN、M シリーズがそれぞれ

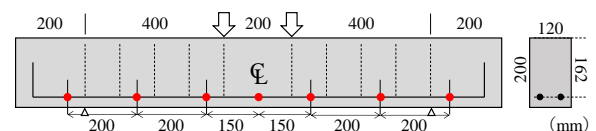


図-1 解析対象としたはり部材の諸元

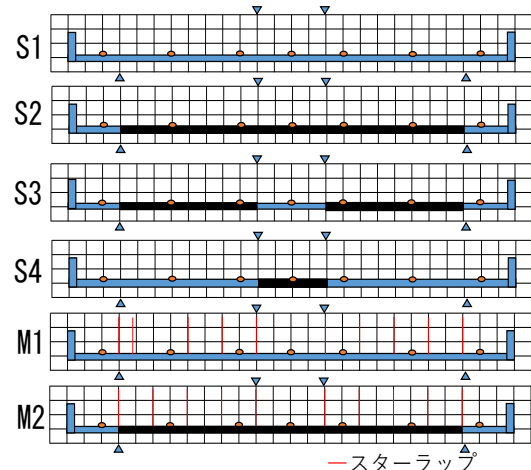


図-2 付着喪失部位

れ 62.4kN および 101kN である。

## 2.2 解析概要

解析には、3次元格子等価連続体モデル (LECOM)<sup>3)</sup> に野中の付着モデル<sup>4)</sup> を使用した。図-2 解析モデルと付着喪失部位を示した。M1 と M2 にはスターラップを巻き、曲げ破壊させるように設計した。

本研究の解析概要は、鉄筋腐食による付着劣化が RC はり部材の挙動にどのように影響するかを検討する。付着特性の変化や付着劣化の分布状況によってせん断耐力に変化があるか否かを明らかにするために、付着応力  $\alpha$  や付着劣化の分布を変化させた数値解析を行う。なお  $\alpha$  を 0.6、0.8 とした。

## 3. 解析結果

### 3.1 荷重-変位関係の比較

図-3 に解析結果と実験結果の荷重-変位関係の比較を示す。なお、実験結果については、中央変位について支点沈下量を補正したものと補正していないものをそれぞれ実線と破線で示している。図より、S1 と S4 を比較してみた。等曲げ区間のみ付着を切った S4 だったが S1 と似たような図となったことから付着の切ってもあまり意味がないことがわかる。次に S2 と S3 を比較してみた。互いに荷重は 100kN だが中央変位の値に差がでた。S2 のほうが、エネルギー吸収が強いとわかる。最後に M1 と M2 について比較した。付着を全て切った M2 のほうが、耐力が強いことがわかる。また曲げ破壊するはずだった M1 がこのような図になってしまったのは、D6 鉄筋が強い荷重に耐えきれず降伏してしまったと考える。

図にあるように解析値と実験値の値は M2 を除き似たような数値となっている。実験中に試験体が壊れたことにより実験値の荷重が急激に下がることがあったが傾きはほぼ等しいことがわかる。

曲げ全スパン付着切れの試験体では図-3 の M2 のように、解析値よりも実験値の方が、傾きが大きいため、少し高い値で定着部での付着割裂破壊に至った。M シリーズは 101kN で降伏される事がマクロ式から表されており解析値は等しいため、実験最中に何らかのアクシデントがあったと考えられる。また図の点線で示している支点沈下量補正なしと実験値も似たような形を示した。緑の X で示したのは、荷重をかけている際に試験体が破壊されたことを示している。壊れてしまった原因は、支点間外の定着が完璧に出来ていなかったために中に埋め込まれている鉄筋が切れてしまったと予測される。この定着部での破壊を本解析ツール上で表現すべく付着応力を変化させることや、定着部の鉄筋方向を微小に変化させたがすべて定着部での破壊には至ら

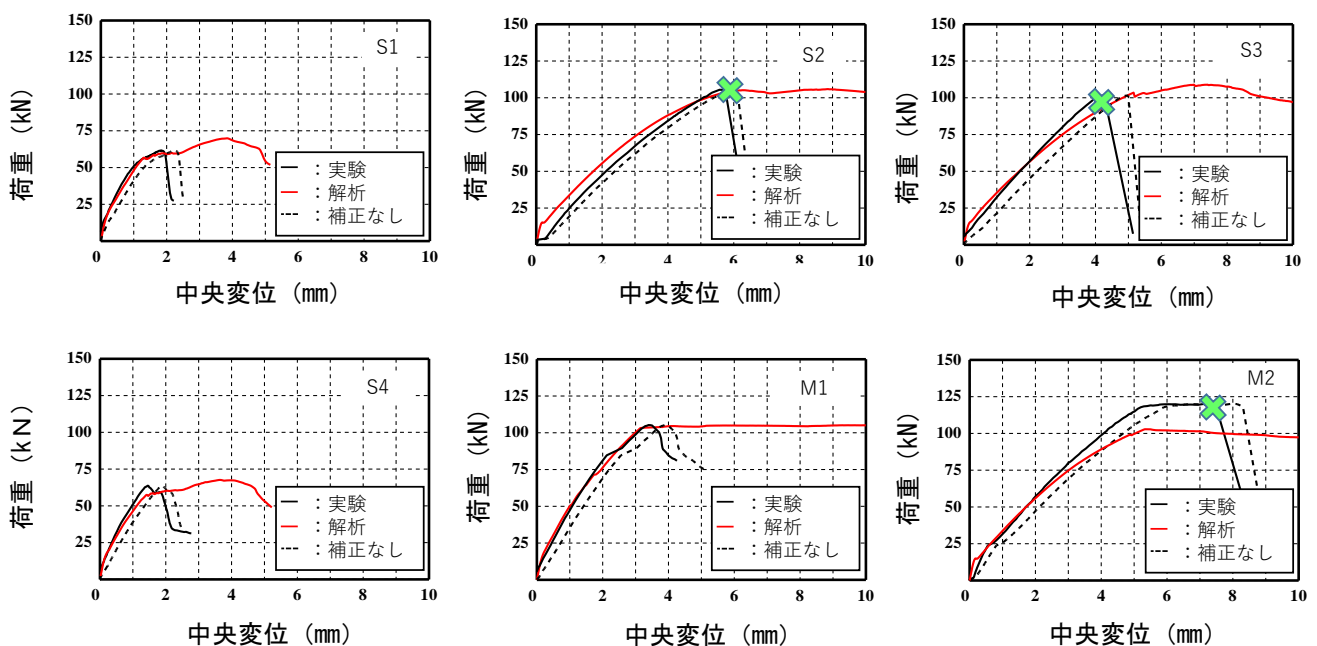


図-3 各試験体の荷重-変位関係の比較

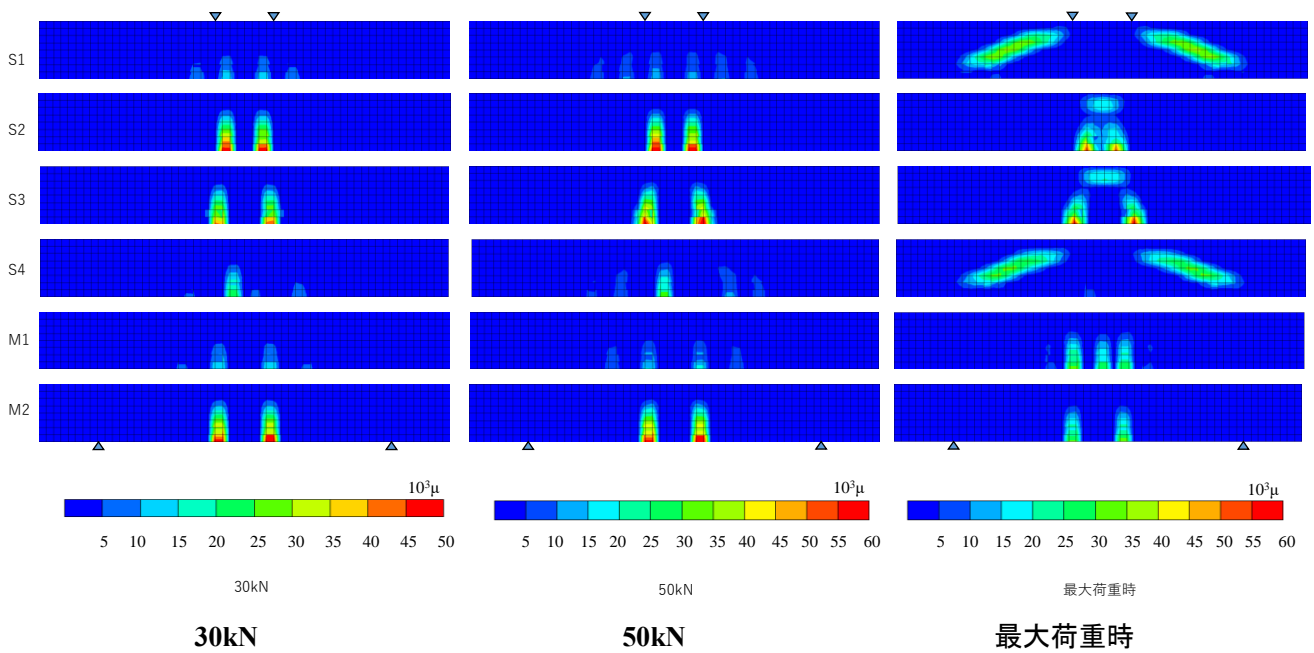


図-4 解析によるひび割れ図

なかった。これは、この解析モデルでは異形鉄筋の節などを表現することが難しくそれに対応する応力などが考慮されないためだと考えられる。

### 3.2 ひび割れ性状の比較

図-4に解析によるひび割れ図を示す。ひび割れ図を見ると S1 と S4 の最大荷重時の図が似ていることがわかる。このことから、コーキング材を塗る場所によってひび割れが変化してくることがわかった。塗る量と塗る場所によって斜めひび割れが発生してくることが示された。また、図より S2、S3、S4 と付着の分布が広がれば広がるほど、ひび割れの本数が減少している。かつ、スパン中央付近のひび割れが現れる傾向が示された。これは、付着喪失部が無筋コンクリート状態となることから生じた現象だと考えられる。

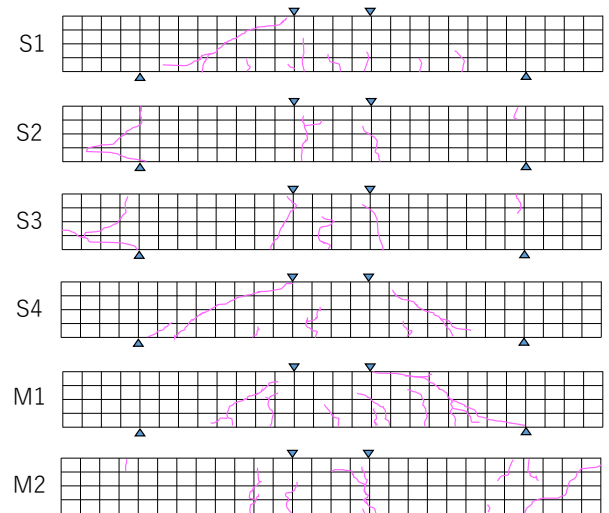


図-5 実験終了後のひび割れ性状

図-5には試験体のひび割れを示す。解析によるひび割れ図と概ね同じ位置で同程度の数のひび割れが発生したことが分かる。しかし、S3の試験体のひび割れが解析結果よりも多く発生した。理由はおそらく実験では付着を切った部分でも機械的な摩擦が発生したことが原因だと考えられる。S1、S2とM1、M2のように付着があり、なしでひび割れの本数が大きく変わってきた。付着を全てきることで斜めひび割れが発生を防げる1つの要因だと気づくことができた。だがひびは分散して発生することが好ましい。付着を切って曲げ破壊にさせるのではなく、健全なうえで曲げ破壊されるはりを作るのが最も良い。

### 3.3 付着喪失部位の鉄筋ひずみの評価

付着喪失部位の鉄筋ひずみは引張鉄筋の定着により、一様の引張力が作用しているため一定であることが得られる。図-6に解析より得られた鉄筋ひずみとその発生位置の関係を示す。S1、S2、S3、S4を比較してみると、付着の切れた場所によって図の形が異なっていることがわかる。S3の場合、実験中に鉄筋が破壊されたため実験データと解析データに違いが生じてしまった。これは、付着を切った場所のひずみの値が、付着を切らなかったひずみの値よりも大きくなってしまったため異なってしまったと考える。またせん断スパンの

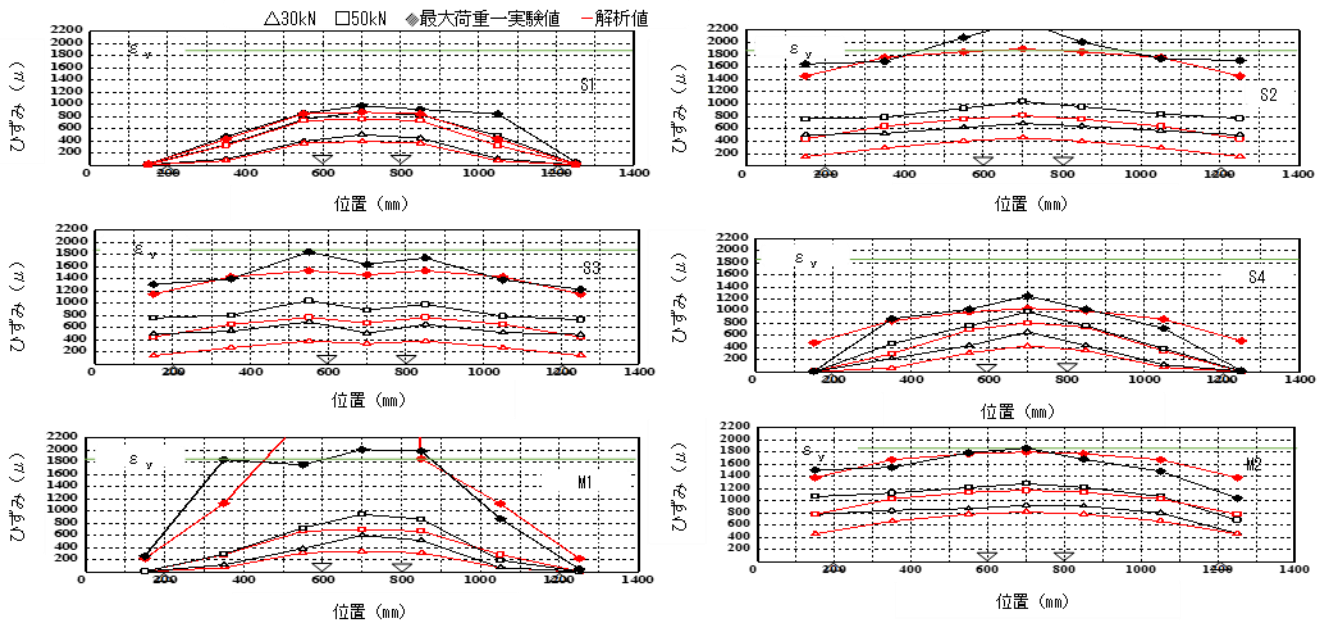


図-6 実験と解析結果のひずみ分布の比較

付着を切ったので、載荷点間のひずみの値が左右のひずみの値よりも低いことが確認される。S4にもこの原理が成り立っているため載荷点間のひずみの値が左右のひずみの値よりも高くなった。このことから、付着を切ったRCはりには定着が十分に確保されているRCはりよりも耐力が増加していることが図を見て確認される。実験の際に、せん断破壊したS1、S4は図を見て分かるように降伏する値に到底及んでないことが確認できる。曲げ破壊したS2、S3、M1、M2は降伏する値を超えたため曲げ破壊したことが証明された。S4の解析値の最大荷重のひずみの終始が本来ならば、0にならなければならないのだが500 $\mu$ となった。その原因は、壊れる時に、鉄筋が滑ったためと考えられる。

#### 4. まとめ

本研究では、付着劣化の度合いや分布状況によってRCはり部材の挙動にどのような影響を及ぼすのかを数値解析的に検討した。その結果得られた知見を以下に示す。

- (1) せん断破壊するはりに付着を切ることで曲げ破壊になることが解析データから得ることができた。
- (2) 荷重-ひずみ関係の実験値と解析値に違いが生じてしまった原因は、曲げ破壊させる予定だったRCはり部材の両端にひびが発生したからだと考えられる。
- (3) 付着劣化が生じたRCはり部材は、健全なRCはり部材よりも耐力が増加する傾向がある。
- (4) 付着劣化の範囲が広がれば広がるほどひび割れ数が減少しスパン中央付近にひび割れが発生する傾向にあった。これは付着喪失部位が無筋コンクリート状態となることから生じた現象だと考えられる。

#### 【参考文献】

- 1) 大屋戸理明・金久保利之・山本泰彦・佐藤勉：鉄筋の腐食性状が鉄筋コンクリート部材の曲げ性状に与える影響，土木工学論文集，Vol.62 No.3，pp.542-554，2006.8
- 2) 宮崎奨平：付着喪失を模擬したRCはり部材の耐荷挙動の実験的評価、2020年度中部大学卒業論文
- 3) 石川靖晃・伊藤睦・荒畑智志・河合真樹・原健悟：コンクリート構造物建設シミュレータの開発—各種初期応力影響下の保有耐荷力解析プラットフォーム—，J-STAGE53 巻2号.，pp172-180，2015
- 4) 野中萌生：鉄筋とコンクリート間の付着モデルの開発、2019年度中部大学卒業論文



## 破断した PC 鋼材を有する PC はりの解析的性能評価手法の検討

EC17037 ダダボエブ アフロル

### 1. 序論

高度経済成長期から建設された多くのコンクリート構造物が老朽化し、これらを適切に維持管理することでその長寿命化が求められている。また老朽化したコンクリート構造物の合理的な維持管理計画の策定には、経年などで劣化・損傷した構造物が保有する残存構造成能を適切に評価する技術が必要と考えられる。ポストテンション方式のプレストレストコンクリート橋に着目すると、グラウト充填不足や、飛来塩分や凍結防止剤などを原因とした PC 鋼材の腐食や破断が確認されている。しかしながら、これら PC 橋に対する構造成能評価技術は十分に確立されていないのが現状である。そこで本研究では、埼玉大学の横田らの PC 鋼材を人為的に切断した PC はりの荷重実験<sup>1)</sup>を解析対象として、PC 鋼材の破断を有するポストテンション方式 PC はり部材の構造成能が評価可能な数値解析技術の開発を目的とする。

### 2. 解析概要との試験概要

#### 2.1 解析対象とした実験の概要

解析の対象とした PC はりの諸元<sup>1)</sup>を図-1 に示す。実験では PC 鋼材に単線で付着性能を有するインデント PC 鋼線 SWPD1L7mm が使われている。PC はりは PC 鋼材の緊張後にグラウトを充填したポストテンション方式である。はり下縁には 3 本の SD345 (D6) 引張鉄筋、上縁には 2 本の SD345 圧縮鉄筋が配置されている。PC 鋼材と鉄筋の降伏強度はそれぞれ 1435 N/mm<sup>2</sup> および 475 N/mm<sup>2</sup> であり、コンクリートの圧縮強度は平均値で 56.6 N/mm<sup>2</sup> になっている。グラウトの圧縮強度は平均値で 88.7 N/mm<sup>2</sup> である。また、図-2 に PC 鋼材の切断位置と荷重方法を示す。図中の X 印が PC 鋼材を切断した箇所である。はり側面から φ15mm のコアボーリングを用いて PC 鋼材の完全切断が行われている。供試体 No.1-0 は健全なはりとし、他の供試体は図中の位置で PC 鋼材が切断されている。実験で確認された破壊形態については、全ての供試体において引張鉄筋および切断しなかった PC 鋼材の降伏が先行し、PC 鋼材の破断前に支間中央または荷重点付近の上縁コンクリート圧壊に至る結果になっている<sup>1)</sup>。

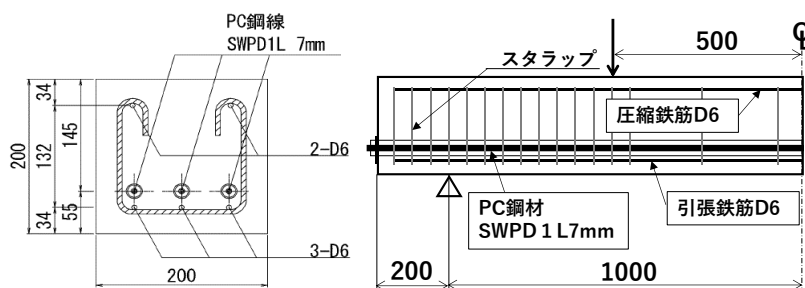


図-1 PC はりの諸元

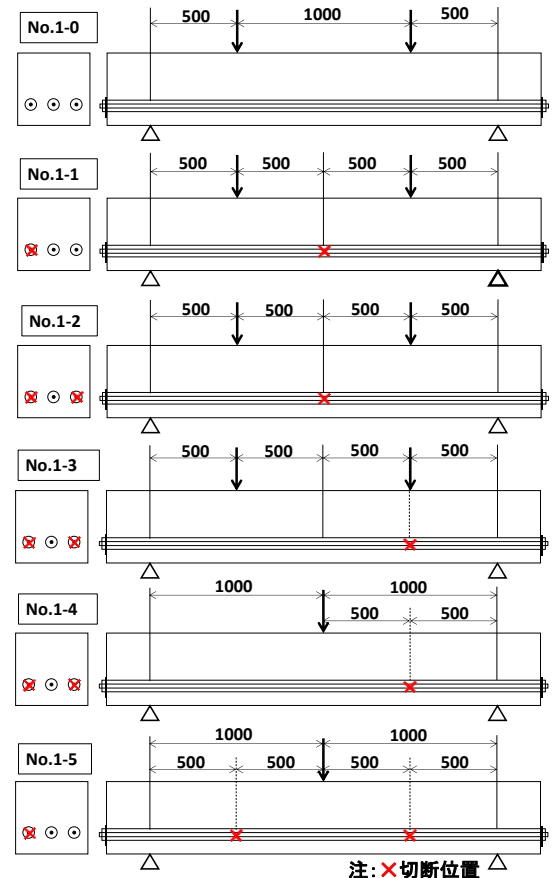


図-2 PC 鋼材の切断位置と荷重方法

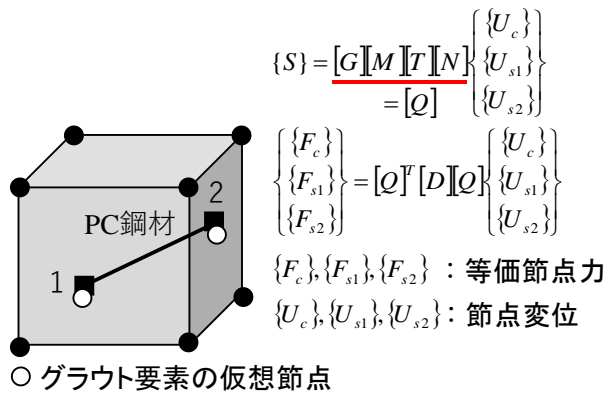


図-3 付着モデルの定式化

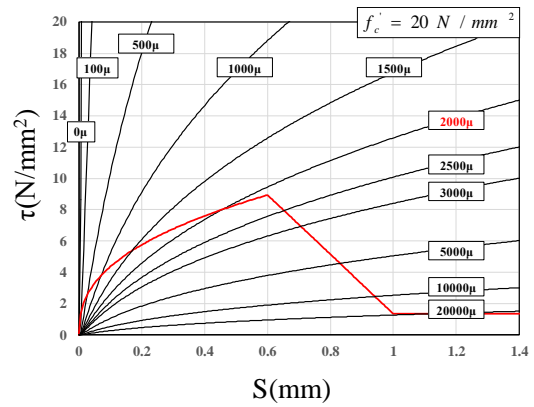


図-4 付着応力-すべり-ひずみ関係

## 2.2 解析概要

ポストテンション PC はりの解析的性能評価手法の検討にあたり、LECOM<sup>2)</sup>に野中の付着モデル<sup>3)</sup>を導入した解析ツールを使用した。PC 鋼材とグラウト間の付着には、図-3 に示すモデルを使用した。グラウト要素内の任意位置に配置された PC 鋼材節点位置にグラウト要素の仮想節点を想定し、仮想節点の変位を形状関数マトリクス  $[N]$  により評価し、座標変換マトリクス  $[T]$  を用いるとともに、PC 鋼材軸に沿った積分点のすべり量を  $[M]$  および  $[G]$  により評価している。マトリクス  $[Q]$  が、一般的に変位からひずみを評価する  $[B]$  マトリクスに相当する。付着応力-すべり関係  $[D]$  には、図-4 に示す島ら<sup>4)</sup>が提案する異形鉄筋用の付着応力  $\tau$  - すべり  $S$  - ひずみ  $\varepsilon$  関係を準用した。本モデルでは、図に示すように、鋼材のひずみが大きくなるにつれて付着強度が低減する。図中の赤線は、CEB モデル<sup>5)</sup>である。本研究では、丸鋼である PC 鋼材の付着は異形鉄筋と比較して小さいことから、次式に示すように、島らの提案式に付着強度を低減させるパラメータ  $\alpha$  を導入した。ここで、 $D$  は鋼材径であり、本研究では、 $S$  を鋼材節点とグラウト仮想節点の相対変位とした。

$$\tau = \alpha \times 0.73 f'_c (\ln(1 + 5s))^3 / (1 + \varepsilon \times 10^5), \quad s = 1000 S / D \quad (1)$$

本研究では、この付着モデルを利用して、実験と同様にアンボンド状態で緊張力を導入し、グラウト後に PC 鋼材を切断した。また、グラウトと PC 鋼材間の付着が挙動に及ぼす影響を評価するために、付着強度パラメータを  $\alpha=0.6$  および  $\alpha=0.1$  に変化させた数値シミュレーションを実施した。

## 3. 解析結果

図-5 に No.1-0~No.1-5 の荷重から換算された支間中央の曲げモーメント-中央変位関係を示す。解析結果は実験結果と比較してわずかな差異が認められるが、比較的精度よく実験結果を予測している。実験結果では支間中央の最大モーメントに着目すると、No.1-1 は鋼材を 1 本切断した影響で No.1-0 の約 70%、No.1-2 および No.1-3 は鋼材を 2 本切断した影響で No.1-0 の 50%程度に低下していると述べている。No.1-0 の実験値と解析値には差異があるため、No.1-0 の実験値に対して解析の曲げ耐力比を計算すると、実験と同様に支間中央の最大モーメントが No.1-1 は No.1-0 の約 70%、No.1-2 および No.1-3 は No.1-0 の約 50%に低下してことが確認できる。なお、健全な供試体である No.1-0 における実験と解析の最大モーメントの差異には、実験では PC はりのたわみにより載荷点のずれが生じることや鋼製シースの剛性などが影響していると考えられる。

付着強度パラメータを  $\alpha=0.6$  と  $\alpha=0.1$  にした解析結果を比較すると、健全な供試体 No.1-0 の場合には付着強度パラメータの変化はモーメント-変位関係にほとんど影響していない。しかし、PC 鋼材の切断箇所が増えている No.1-4 および No.1-5 では、 $\alpha=0.6$  の方がひび割れ発生から鋼材降伏までの勾配が高く、PC 鋼材とグラウト間の付着が部材のエネルギー吸収に影響していることが確認できる。実験値と解析値との比較では、 $\alpha=0.1$  の方が良い一致を示すことから、 $\alpha=0.1$  の解析結果を使用して以降の検討を行うことにする。

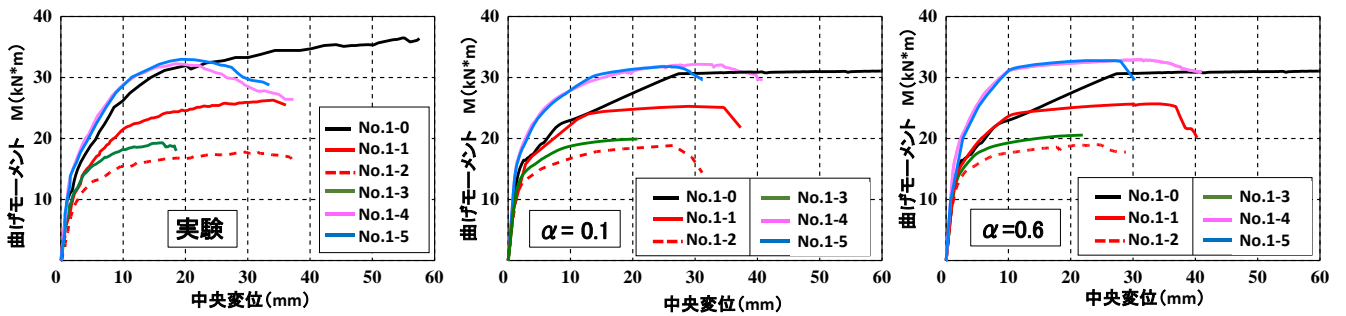


図-5 曲げモーメント-変位関係 (左: 実験, 中: 解析 ( $\alpha=0.1$ ) 右: 解析 ( $\alpha=0.6$ ))

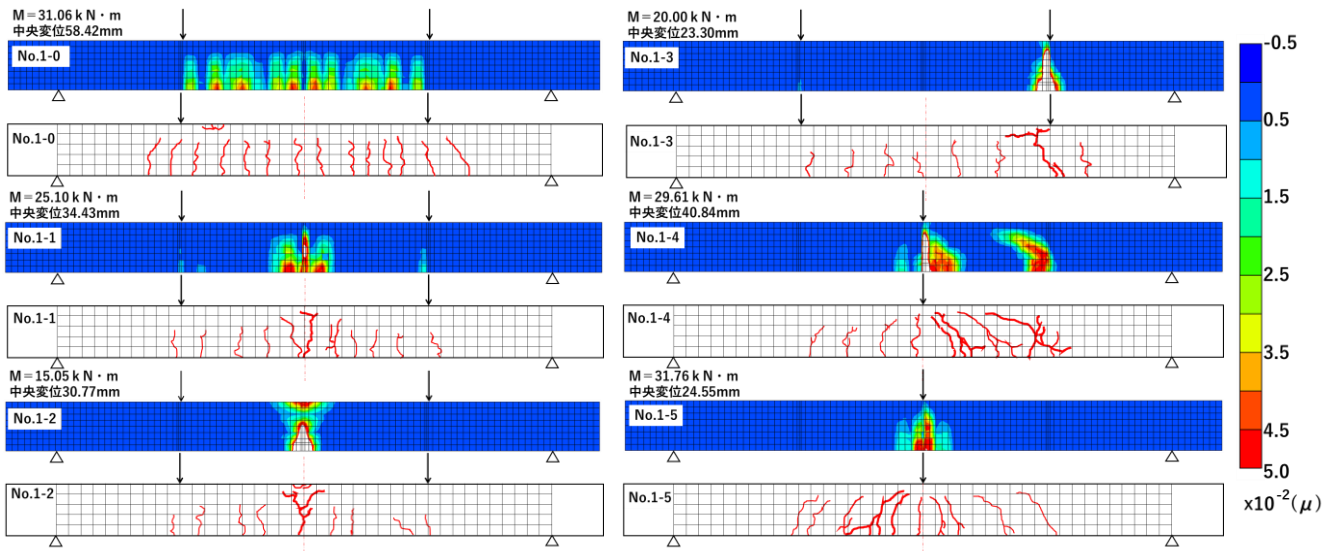


図-6 実験と解析のひび割れ性状の比較

図-6 に荷重実験後の供試体のひび割れ図および解析のひび割れ図を示す。実験供試体の写真を確認し、ひび割れ幅が大きい箇所を太線で示している。解析のひび割れ図では最大主ひずみ分布を示している。実験と解析のひび割れを比較すると試験体 No.1-5 以外のひび割れ図が解析ひび割れ図によく一致していることが分かる。供試体 No.1-5 に対して、解析では PC はりスパン中央が壊れているが、実験では中心より 20cm ほど離れた所から上縁中心に向けて斜めに大きいひび割れが発生している。それは、解析が左右対称のため、モーメント値が最大となるスパン中央にひび割れが発生して壊れたと考えられる。実験ではひび割れがスパン中央よりずれたのは実験の際に荷重増加につれて荷重点のずれなどが発生したからだと考える。

図-7 に  $M=0$  と  $M=15\text{kN}\cdot\text{m}$  時の PC ひずみ分布を示す。ここでは、供試体の荷重方法が同様であること、PC 鋼材の切断位置が異なることから No.1-0、No.1-2 と No.1-3 の PC および鉄筋のひずみ分布を比較することにした。No.1-0 では PC 鋼材が健全なため、ひずみ分布が一定になっている。No.1-2 では、PC 鋼材が破断した中央のひずみ分布が  $3500\mu$  から  $\alpha=0.1$  の場合  $443.9\mu$  まで、 $\alpha=0.6$  の場合  $785.9\mu$  までに減少した。No.1-3 でも PC 鋼材の切断箇所のひずみ分布が減少した。最大曲げモーメントが  $M=0$  の図では PC 鋼材切断箇所から約 600mm 離れた所で、切断の影響がなくなることが確認できる。荷重前とその後を比較すると  $M=15\text{kN}\cdot\text{m}$  では PC 鋼材切断箇所約 200mm 離れた所から PC ひずみが増加していることが分かる。

図-8 に  $M=0$  と  $M=15\text{kN}\cdot\text{m}$  時の鉄筋ひずみ分布を示す。 $M=0$  の時は PC 鋼材に緊張力が与えているため、鉄筋ひずみが負の方にある。図より  $M=0$  の時 PC 鋼材切断箇所鉄筋に負担がかかるため、ひずみが増加していることが確認できた。また、 $\alpha=0.6$  は  $\alpha=0.1$  より付着強度が大きいので、 $\alpha=0.6$  の鉄筋ひずみが  $\alpha=0.1$  より小さくなった。一方、最大モーメントが  $M=15\text{kN}\cdot\text{m}$  になると鉄筋ひずみが負の方から正に代わった。PC 鋼材切断箇所の鉄筋に負担がかかるため、切断箇所の鉄筋ひずみが急増した。この際に、付着強度が高い方の供試体のひずみは小さくなった。そして、PC 鋼材切断箇所の鉄筋は降伏しているが、それ以外の所の鉄筋ひず

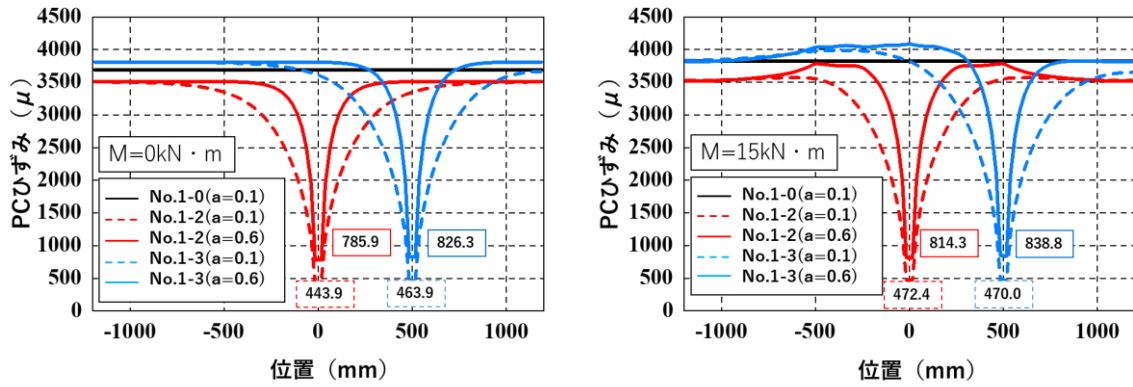


図-7 PC ひずみ分布 (左:  $M=0\text{kN}\cdot\text{m}$  時、右:  $M=15\text{kN}\cdot\text{m}$  時)

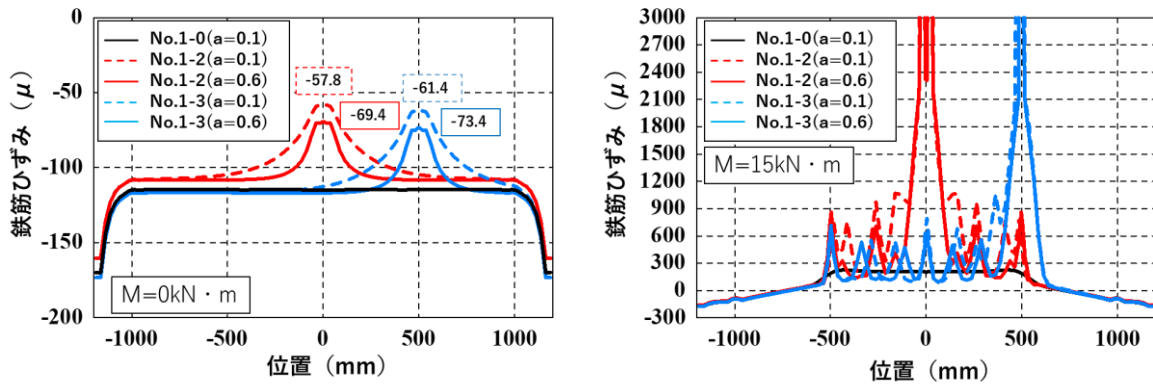


図-8 鉄筋ひずみ分布 (左:  $M=0\text{kN}\cdot\text{m}$  時、右:  $M=15\text{kN}\cdot\text{m}$  時)

みは  $2375\mu$  以内にとどまっているので、鉄筋が降伏していないことが分かる。

#### 4. 結論

本研究では、PC 鋼材の破断を有するポストテンション方式 PC はり部材の構造性能が評価可能な数値解析技術を構築した。本解析手法を、PC 鋼材を人為的に切断した PC はりの荷重実験に適用した結果、以下の結論を得た。本解析手法は、グラウトと PC 鋼材間の付着に、付着強度パラメータ  $\alpha=0.1$  を使用することで、鋼材破断を有する PC はり部材の耐荷挙動、ひび割れ性状を妥当な精度で予測可能である。また、付着が PC はり部材のエネルギー吸収量に及ぼす影響および PC 鋼材切断箇所から約 600mm 離れた箇所では切断の影響がなくなることを数値解析的に評価した。荷重時では PC 鋼材切断箇所から約 200mm 離れた所からひずみが増加することも数値解析的に評価した。最後に解析精度向上には、PC 鋼棒の摩擦や、グラウトとの付着挙動の適切なモデル化が必要である。

#### 参考文献

- 1) 横田敏広・Isuru WIJAYAWARDANE・睦好宏史：腐食した PC 鋼材を有する PC 梁の耐荷力特性と解析的性能評価手法の検討、土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol.74, No.4, 218-233, 2018.
- 2) 石川靖晃・伊藤睦・荒畑智志・河合真樹・原健悟：コンクリート構造物建設シミュレータの開発－各種初期応力影響下の保有耐荷力解析プラットフォーム－, J-STAGE 53 巻 2 号, pp172-180, 2015.
- 3) 野中萌生：鉄筋とコンクリート間の付着モデルの開発, 2019 年度中部大学卒業論文
- 4) 島 弘, 周 礼良, 岡村 甫：マッシュなコンクリートに埋め込まれた異形鉄筋の付着応力－すべり－ひずみ関係, 土木学会論文集 Vol.378/V-6, pp.165-174, 1987.
- 5) RC Elements under Cyclic Loading, CEB State of the Art Report, 1996.

## PC 鋼材の付着が PC はり部材の挙動に及ぼす影響の実験的評価

EC17051 松村 亜輝良

### 1. 研究の背景と目的

ポストテンション方式の場合には施工時のグラウト充填不良や桁端部からのシーす内への雨水侵入による PC 鋼材の腐食や破断といった事例が報告されている。また、海外では 1985 年にイギリスにおいて、セグメント方式のポストテンション単純 PC 中空床版橋がグラウト充填不良に伴う PC 鋼材破断により崩落した事例があり、イギリスの運輸省は 1992 年～1996 年までグラウトを行うポストテンション橋の建設を止めて対応処置を行ったことがある。以上の背景から、これらの PC 鋼材の腐食や破断を伴う劣化した PC 橋に対する体系的で精度の高い性能評価手法の構築は、国内の PC 橋を合理的に維持管理更新していく上で必要不可欠であると考えられる<sup>1)</sup>。そのため既往の研究では、数多の PC 構造の載荷実験が実施されているが、PC 鋼材のひずみが計測されている実験は非常に数が少ない。そこで、本研究ではグラウト充填不良もしくは PC 鋼材腐食による付着損失・劣化を模擬した PC はりの曲げ載荷試験を通じて、PC 鋼材とグラウト間の付着の有無がポストテンション式はりに与える影響について実験的に明らかとすることを目的とする。特に、数値解析手法の妥当性評価に資するため、緊張時ならびに載荷時の PC 鋼材のひずみ挙動を取得することを目的とする。

### 2. 試験概要

#### 2.1 試験体概要と実験要因

図-1 に、本研究で使用した試験体概要を示す。幅 120mm、高さ 200mm の長方形断面に、緊張後に断面圧縮円のひずみがゼロとなるように、有効高さ 133mm の位置に PC 鋼材を 2 本配置した。PC 鋼材のひずみを計測するために、PC 鋼材には  $\Phi 9.2\text{mm}$  の B 種 1 号の SBPR 930/1080 (実測降伏強度  $1100\text{N/mm}^2$ ) を使用した。また、ひずみゲージのリード線を通すために、シーす管には PC 鋼材に対して太径の外径 25.5mm の鋼製シーすを使用した。シーす管を型枠内に固定するために、型枠両脇には厚さ 12mm のコンパネ板を配置するとともに、ひずみゲージのリード線を通すために、コンパネ板のシーす間配置位置脇にシーす管径の発砲スチロールを取り付けた。このため、試験体全長は、1376mm である。実験要因は、PC 鋼材とグラウト間の付着とし、図-1 に示すように、シーす管内をグラウトした健全試験体 2 体 (No1・No6)、グラウトしない試験体 2 体 (No2・No5) と、等曲げ区間内の付着をなくした試験体 (No3) およびせん断スパン内の付着をなくした試験体 (No4) の 6 体の試験体を作製した。なお、鋼材の付着をなくす部分では、鋼材表面をウレタン製の布で覆い、その上

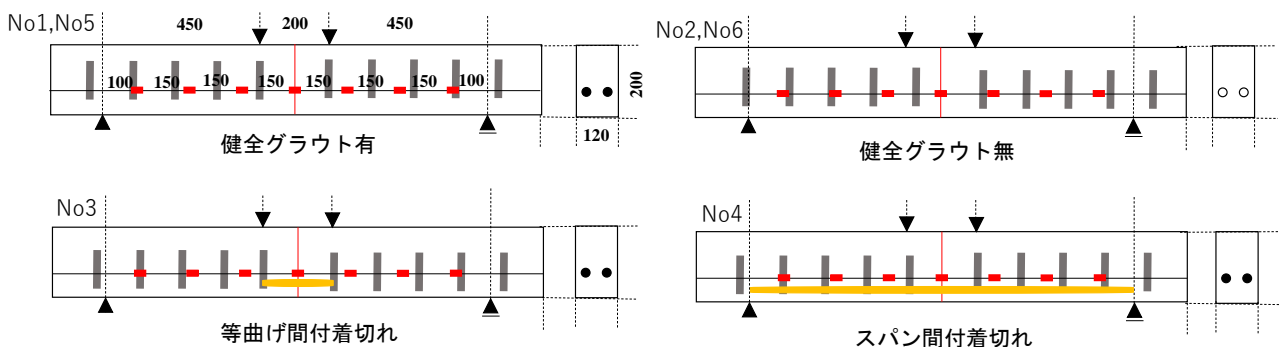


図-1 PC はり部材の寸法と付着喪失領域およびひずみゲージ貼付位置

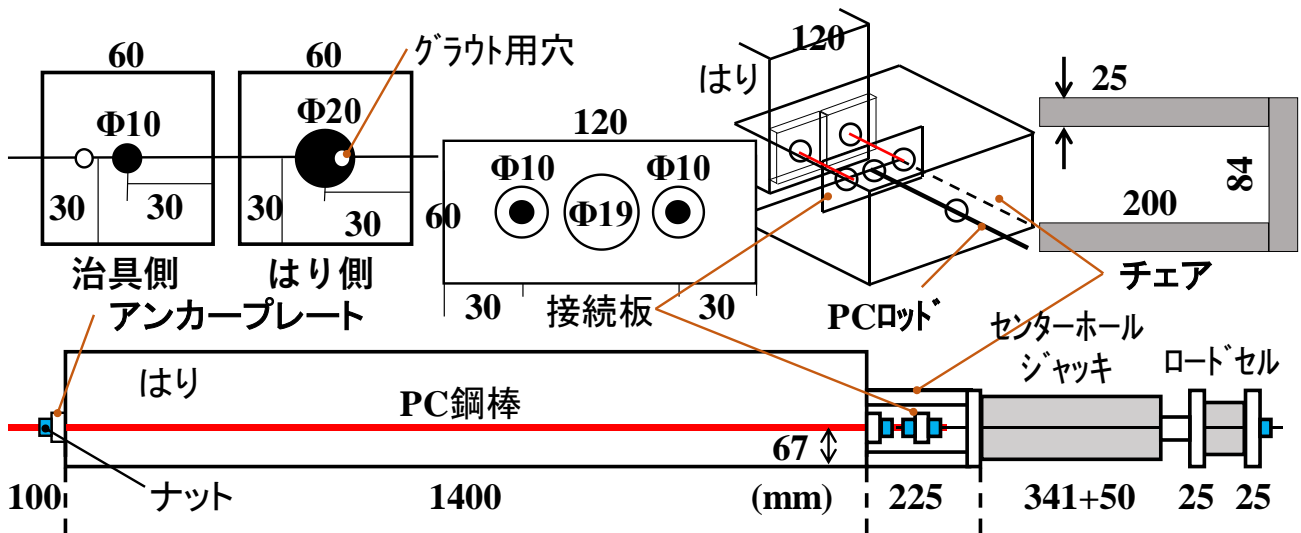


図-2 緊張力導入方法と主な治具寸法

表-1 コンクリート配合

| W/C (%)                | s/a (%) | 空気量 (%) | 単位量(kg/m <sup>3</sup> ) |      |     |      |
|------------------------|---------|---------|-------------------------|------|-----|------|
|                        |         |         | W                       | C    | S   | G    |
| 47                     | 46      | 4       | 170                     | 356  | 810 | 969  |
| 密度(g/cm <sup>3</sup> ) |         |         | 1                       | 3.15 | 2.6 | 2.65 |

からビニールテープを巻くことによって、グラウトが鋼材と直接付着しないようにし、これを擬似的な空隙とした。PC 鋼材のひずみを計測するために、図に示す位置に 1 本の PC 鋼材に対して 7 枚のひずみゲージを貼り付けた。なお、せん断破壊を防ぐために、No1 から No4 の試験体には相当量のせん断補強筋を載荷点から 150mm 間隔で配置した。使用したコンクリートの配合を表-1 に示す。

### 2.2 緊張力導入と緊張時の緊張力と鋼材ひずみ関係

図-2に、本研究で設計した緊張力導入方法を示す。試験体内の2本の鋼棒を同時に緊張するために、厚さ32mmの接続板を介して、2本の鋼棒をΦ19mmのPCロッドと接続した。センターホールジャッキでPCロッドを緊張することで、2本の鋼棒に緊張力を導入するとともに、ロードセルで緊張力の計測を行った。

図-3に No1 試験体の緊張時の緊張力-鋼材ひずみ関係を示す。なお、図には黒実線で理論値を示している。図より、理論値と鋼材ひずみ挙動は良い一致を示すことから、正確に緊張力を与えることができたと考えられる。緊張後の鋼材ひずみは、No1 から No6 に対して、それぞれ、2937 $\mu$ 、3400 $\mu$ 、3408 $\mu$ 、3600 $\mu$ 、3320 $\mu$ 、3655 $\mu$ である。グラウト作業では、試験体を柱のように立てて行うことでグラウトの充填不良を防いだ。

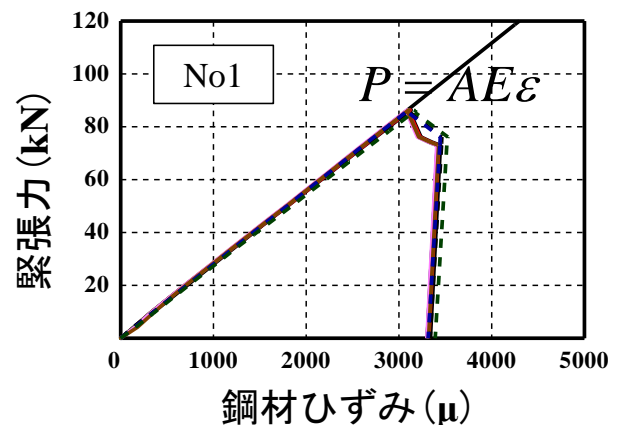


図-3 緊張時の緊張力-鋼材ひずみ関係

## 3. 実験結果

### 3.1 コンクリートとグラウトの圧縮強度

はり試験体と同一のコンクリートで作製したテストピースの圧縮試験から得られた圧縮強度は 36.9N/mm<sup>2</sup>であり、Φ50×100mm のテストピースから得られたグラウト材の圧縮強度は 64.8N/mm<sup>2</sup>であった。

### 3.2 荷重-変位関係

図-4に荷重-変位の関係を示す。最大荷重は、グラウトした健全試験体 No1 と No5 で、それぞれ 101.7kN,

91.5 kN, グラウトのない健全試験体 No2 と No6 でそれぞれ 84.9kN, 81.4 kN であり, 等曲げ区間付着の付着を切った No3 で 101.4kN, スパン間の付着を切った No4 で 99.5kN であり, いずれもコンクリートの圧壊で耐力が低下した。健全試験体ではグラウトの有無で約 20kN の耐力差が生じ, 等曲げ区間内のみの付着喪失は耐力に影響せず, 全スパン内の付着が喪失すると, 約 10kN の耐力低下となった。マクロ式による耐力計算値は 71.5kN であり, グラウトした試験体の耐力には, グラウトが充填された太径のシース管の抵抗が寄与しているものと考えられる。また, グラウトと付着喪失領域の違いが, ひび割れ発生後の剛性に影響していることも確認できる。

### 3.3 ひび割れ発生状況

図-5 に載荷試験後試験体後のひび割れ発生状況を黒線およびひび割れ幅の大きいひび割れを赤線で, 圧壊したところを灰色で示す。ひび割れ発生荷重は, No1~No6 で, それぞれ 46kN, 50kN, 50kN, 56kN, 48kN, 50kN であり, いずれも当曲げ区間内にひび割れが集中した。No1, No3 および No5 では, 耐力付近でシース管に沿ったひび割れの進展が確認された。これは, グラウト充填されたシース管がコンクリートとの付着で抵抗したためと考えられ, このこ

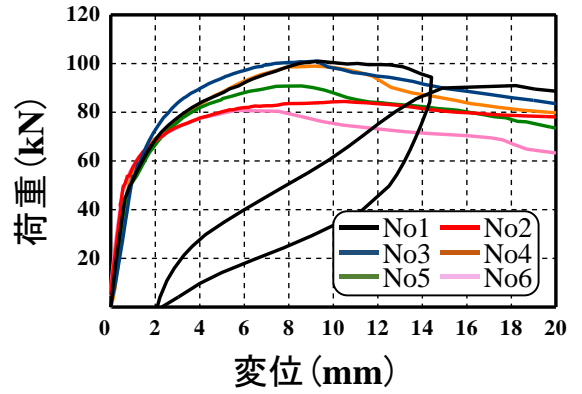


図-4 荷重-変位関係

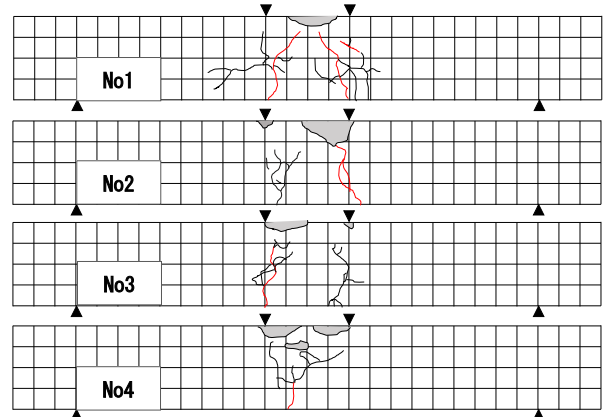


図-5 載荷試験後のひび割れ性状

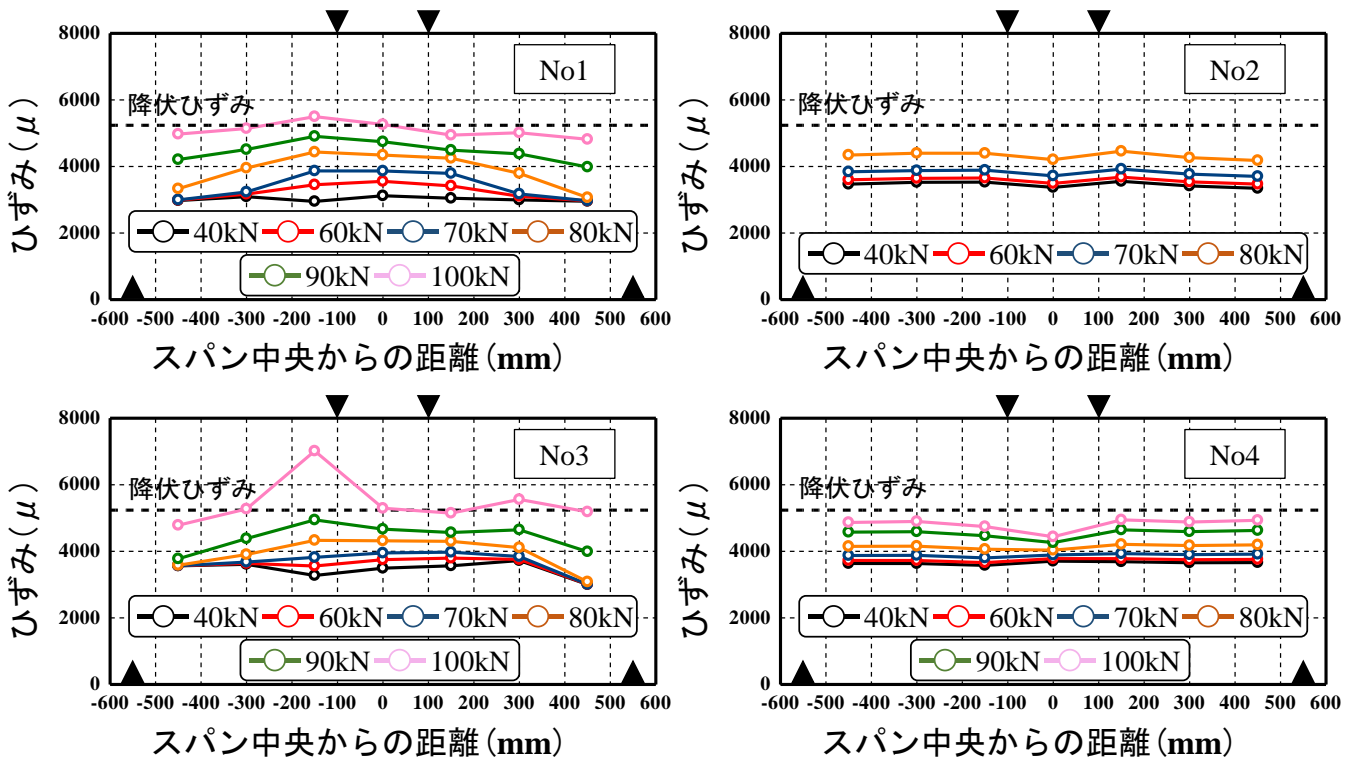


図-6 荷重載荷時のひずみ分布の変化

とからもこの要因がこれら試験体の耐力増加に影響したものと考えられる。

### 3.4 荷重試験時の鋼材ひずみ分布

図-6 に各荷重レベルのひずみ分布を示す。なお、ひずみ値は、荷重載荷時のひずみ値に、推定した載荷前の鋼材ひずみ値を加算している。載荷前の鋼材ひずみは、No1 試験体で緊張後のひずみ変化を1週間計測した結果、クリープにより平均値で  $196\mu$  低下したことから、すべての試験体に対して、緊張直後のひずみから  $196\mu$  を差し引くことで推定した。図より、グラウトのない No2 と全スパンで付着喪失を模擬した No4 では、定荷重時から PC 鋼材のひずみ分布が様に分布していることが確認できる。なお、No2 でスパン中央のひずみが他と比べてわずかに小さい理由は、はりの変形に伴う PC 鋼材とシース管の摩擦の影響と考えられる。No1 と No3 では、低荷重レベルから等曲げ区間付近のひずみが一様であり、荷重が増加すると、支点近傍まで付着力が低下し、スパン内で鋼材のひずみが様に分布するようになることが確認できる。

### 3.5 荷重-鋼材ひずみ関係

図-7 に最大荷重時までの荷重-鋼材ひずみの関係を示す。グラウトのない No2 とグラウトとの付着喪失を模擬した No4 の挙動は、ひび割れ発生後に PC 鋼材ひずみが様に増加する傾向は同じであるが、No4 の方がひび割れ発生後の荷重増加に対するひずみ増加割合が低い。これには、グラウトの抵抗が影響を及ぼしているものと考えられる。グラウトした健全試験体の No1 では、ひび割れが発生する  $50\text{kN}$  で等曲げ区間付近のひずみが様に増加し、次いで  $70\text{kN}$ 、 $80\text{kN}$  付近で、より支点側の鋼材ひずみが増加し始める挙動が確認できる。これらの荷重から、ひずみゲージ位置断面の曲げモーメントを算出すると、それぞれ、 $11.25\text{kN}\cdot\text{m}$  ( $50\text{kN}$ )、 $8.75\text{kN}\cdot\text{m}$  ( $70\text{kN}$ )、 $4\text{kN}\cdot\text{m}$  ( $80\text{kN}$ ) であることから、付着低下は、断面に作用する曲げモーメントで開始するのではなく、近傍の鋼材のひずみに影響されることが明らかとなった。

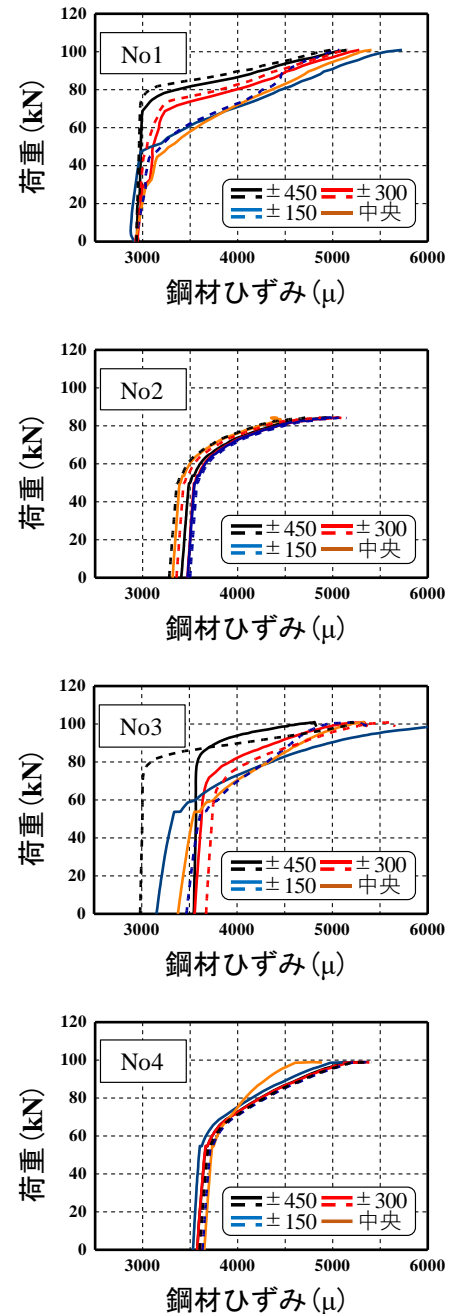


図-7 荷重-鋼材ひずみ関係

## 4 結論

本研究は PC 鋼材の付着の有無がポストテンション式はりに与える影響について実験的に明らかにする事を目的として荷重試験を行いひずみ計測を行なった。本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) 付着喪失領域の違いはなく、グラウトがひび割れ発生後の剛性に影響していることが確認できた。
- (2) グラウト充填した試験体は耐力付近でシース管に沿ったひび割れの進展が確認でき、グラウト充填されたシース管がコンクリートとの付着で抵抗したと考えられ、耐力増加に影響したものと考えられる。
- (3) 荷重-鋼材ひずみの関係から付着低下は、断面に作用する曲げモーメントで開始するのではなく、近傍の鋼材のひずみに影響されることが明らかとなった。

## 参考文献

- 1) 梅原 秀哲：PC はりの曲げ挙動に与える鋼材の付着状態の影響に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集 1991



## 吹付コンクリート板の損傷が打音特性に与える影響

EC17052 溝田 淳之介

### 1. 研究背景と目的

道路付帯構造物として切土法面などに利用されるコンクリート吹付工は、昭和30年代後半から施工され、施工性の良さなどから全国的に広く施工実績もある法面保護工である。一般的にコンクリート構造物は、施工後十数年を経て材料的劣化が進むことで強度劣化を生じる。コンクリート吹付工の性能検査として、全国的に実施されている打音検査については、専門技術者や熟練技術者によって検査が行われているが<sup>1)</sup>、明確な判定基準がなく打音の音質等で判定しているのが現状である。また、近年土木技術者不足が叫ばれて久しいが、コンクリート吹付工の検査技術者の高齢化、人手不足も著しい状況である。よって、打音検査における音波分析・判定条件の研究を進め、若年技術者においても道路施設の維持管理を行えるようにすることが求められている。そこで本研究では、特別な技術や経験が無い若年技術者でも吹付コンクリート工のあらゆる状況下で判定できる打音検査技術の確立を目指して、ひび割れを有する吹付けコンクリート板の打音特性に関する基礎的知見を得ることを目的とした

### 2. 打音試験方法

#### 2.1 試験体概要

試験体は、写真1に示すひび割れを貫通させた試験体1枚（試験体1）、写真2に示すひび割れを貫通させていない試験体1枚（試験体2）、写真3に示す、表面を削り所定の厚さに成型した無損傷の試験体1枚（試験体3）の合計3枚を用いた。試験体寸法はすべて10cm厚に設定した。

#### 2.2 試験方法概要

打音試験には、写真4に示すテストハンマーとマイクと録音機を使用した。これらは、一般に市販されているものである。打音試験を屋外で実施し、試験体背面状況がすべての試験で同一となり、かつ試験体背面に空間が生じないように、写真5に示すように試験体背面にシルトを敷いた。その際、シルトを高温で乾燥させたもので試験体底面部周囲も覆った。

打撃点は、試験体中央部を5回打撃して録音機で音データを取得した。5回の打撃を計10回行い、前半の5回は間隔をあけて打撃し、後半の5回は間隔をあけず打撃した。

打音解析には、扱いが容易なAudacity<sup>2)</sup>を活用した。写真6のように打音データの高周波変換を行うことで、打撃音の音圧と周波

貫通している



写真 1. 試験体 1

貫通していない



写真 2. 試験体 2



写真 3. 試験体 3



写真 4. 打音検査器具



写真 5. 背面状況(シルト)

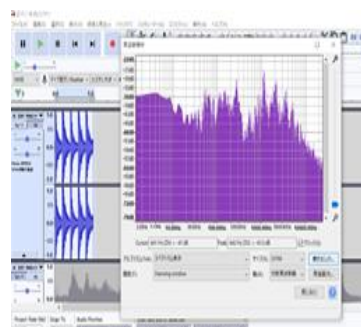


写真 6. Audacity

数関係を得た。

### 3. 試験結果

これより、試験体 1 から得られた打音データを貫通ひび割れ打音データ、試験体 2 から得られた打音データを無貫通ひび割れ打音データ、試験体 3 から得られた打音データを無損傷打音データとする。

打音データを Audacity にて高速フーリエ変換することで音圧-周波数関係を得た。その一例が図 1 である。しかし、この音圧-周波数関係を見比べただけで無損傷の試験体や貫通ひびの試験体、無貫通ひびの試験体各々の打音特性の違いを見つけ出すのは困難であった。そこで、個々の打音データを除算することで音圧割合-周波数関係と音圧割合の平均値-周波数関係をもとめた。打音試験により、全部で無損傷打音データ 10 個、貫通ひび割れ打音データ 50 個、無貫通ひび割れ打音データ 50 個を採取した。打音データの組み合わせを変えることによって得られた、膨大な量の音圧割合-周波数関係と音圧割合の平均値-周波数関係から分かった打音特性の傾向を以下に示す。

#### 3.1 音圧割合-周波数関係

図 2 に無損傷打音データ 10 個を、無損傷打音データ 1 個で除算して評価した音圧割合-周波数関係を示す。図より、音圧の割合は 1 に集まっていることが分かる。なお、この傾向は、無貫通ひび割れ打音データ同士や貫通ひび割れ打音データ同士でも確認できる。

その一方で、図 3 と図 4 に示すように、貫通ひび割れ打音データ 10 個と無損傷の打音データ 1 個の音圧割合-周波数関係と、無貫通ひび割れ打音データ 10 個と無損傷の打音データ 1 個の音圧割合-周波数関係には大きな波形の乱れが確認できる。さらに、他の貫通ひび割れ打音データや無貫通ひび割れ打音データ、無損傷打音データと比較しても同じような傾向が確認できた。また、図 3 と図 4 より、無貫通ひび割れと貫通ひび割れの音圧割合-周波数関係に明確な違いは確認できない。以上のことから、これらの音圧割合-周波数関係の大きな波形の乱れは、ひび割れが試験体に

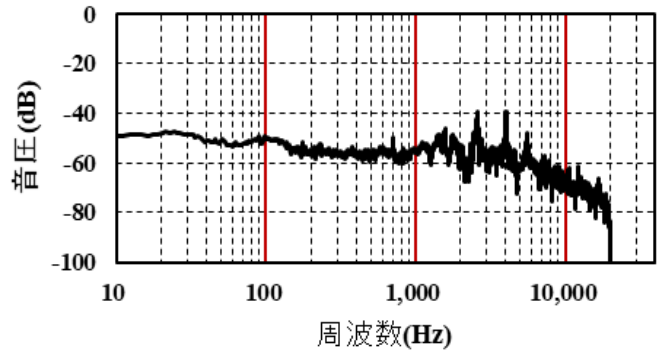


図 1. 音圧-周波数関係

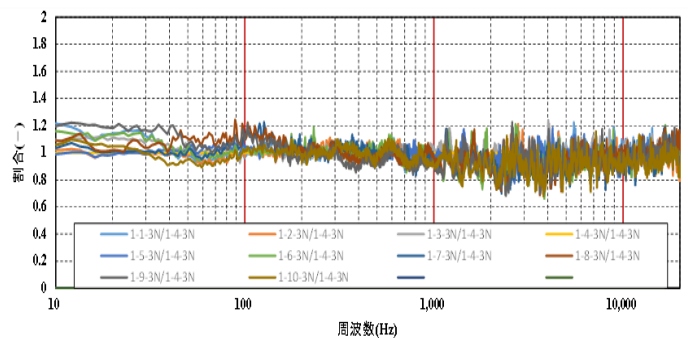


図 2. 無損傷打音データと無損傷打音データの音圧割合-周波数関係

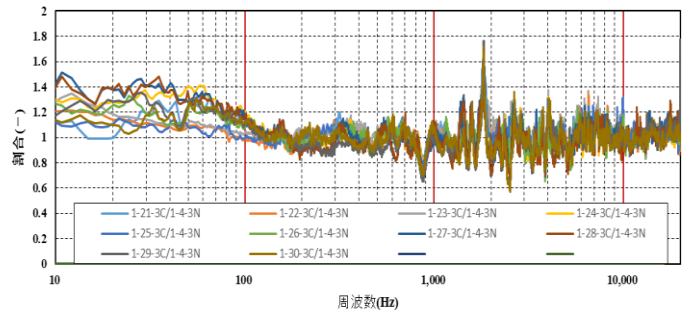


図 3. 無貫通ひび割れ打音データと無損傷打音データの音圧割合-周波数関係

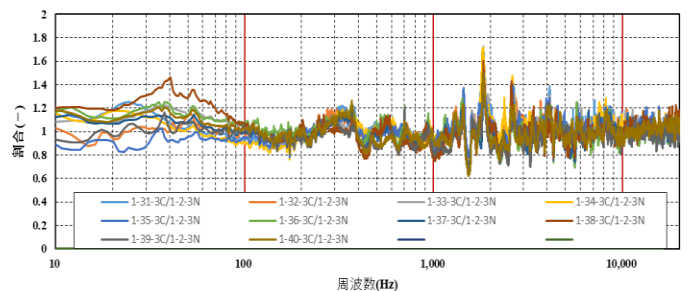


図 4. 貫通ひび割れ打音データと無損傷打音データの音圧割合-周波数関係

及ぼす打音特性と考えられる。

### 3.2 音圧割合の平均値-周波数関係

図2から図4に示した個々の音圧割合-周波数関係には、データのバラツキも確認できる。そこで、音圧割合-周波数関係の結果を定性的な傾向を確認するために、音圧割合の平均値-周波数関係を評価した。図5に無損傷打音データ10個を、無損傷打音データ10個でそれぞれ除算したデータの平均を求めて評価した音圧割合の平均値-周波数関係を示す。なお、除算する際、同じ打音データ同士の除算を省いている。図6は無貫通ひび割れ打音データ50個を無損傷打音データ10個で、それぞれ除算したデータの平均から評価した音圧割合の平均値-周波数関係であり、図7は無貫通ひび割れ打音データ50個を無損傷打音データ10個でそれぞれ除算したデータの平均から評価した音圧割合の平均値-周波数関係である。図5より、無損傷打音データ同士の平均の場合、各周波数における音圧の違いはあまり見られないことが分かる。なお、この傾向は、無貫通ひび割れ打音データ同士と貫通ひび割れ打音データ同士でも確認できる。

その一方で、図6と図7より無損傷打音データ10個と無貫通ひび割れ打音データ50個、無損傷打音データ10個と貫通ひび割れ打音データ50個の平均をとると周波数100Hzから音圧割合が低くなっている。よって、音圧割合平均値が周波数100Hzから低くなる傾向は、ひび割れが試験体に及ぼす打音特性と考えられる。

### 3.3 音圧割合の最大、最小分布

図6と図7より、試験体にひび割れが生じている場合、周波数が1000Hzから10000Hzの間で音圧割合の平均値-周波数関係に大きな波形の乱れが生じることが分かる。両図は、複数のデータの平均値であることから、個々のデータでも同様な傾向が得られるのかを確認するために、図8に個々の無貫通ひび割れ打音データと無損傷打音データの音圧割合の最大割合、最小割合を周波数20000Hzまでまとめた。また、図9は貫通ひび割れ打音データと無損傷打音データの音圧割合の最大割合、最小割合を周波数20000Hzまでまとめた図である。図8と図9より、どちらとも最小

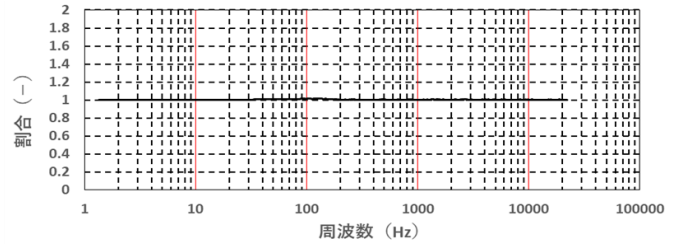


図5. 無損傷打音データと無損傷打音データの音圧割合平均値-周波数関係

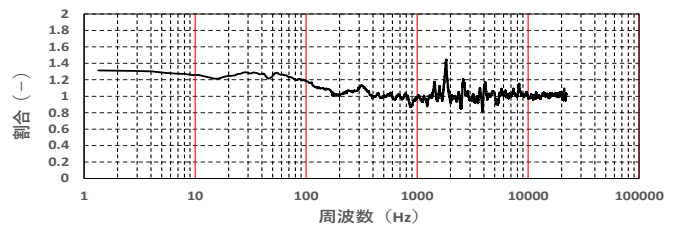


図6. 無貫通ひび割れ打音データと無損傷打音データの音圧割合平均値-周波数関係

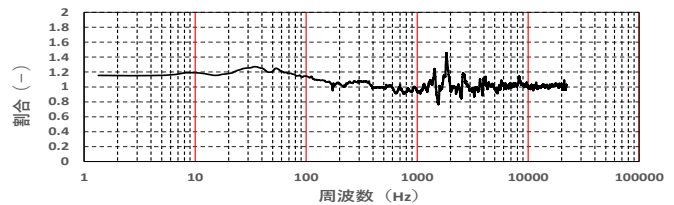


図7. 貫通ひび割れ打音データと無損傷打音データの音圧割合平均値-周波数関係

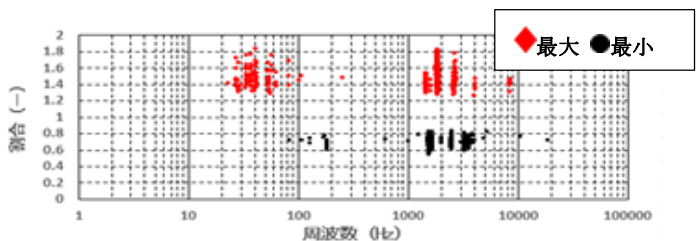


図8. 無貫通ひび割れ打音データと無損傷打音データの音圧割合平均値の最大、最小分布

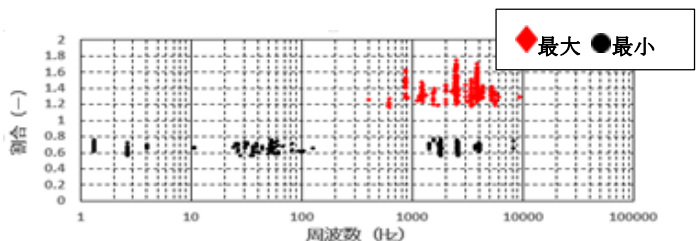


図9. 貫通ひび割れ打音データと無損傷打音データの音圧割合平均値の最大、最小分布

割合は周波数が 1000Hz～10000Hz，最大割合も 1000Hz～10000 Hz にまとまっている傾向がある。よって，音圧割合の最大、最小分布から試験体にひび割れが生じている場合、周波数が 1000Hz から 10000Hz の間で音圧割合平均値-周波数関係に大きな波形の乱れが発生することが明らかとなった。

#### 4. 結論

本研究では、特別な技術や経験が無い若年技術者でも吹付コンクリート工のあらゆる状況下でも判定できる打音検査技術の確立を目指し、吹付コンクリート板のひび割れ損傷が打音特性に及ぼす影響を検討した。試験結果から分かった傾向を以下に示す。

##### 4.1 音圧割合-周波数関係による損傷判定

ひび割れ損傷がない試験体で打音検査を行った場合、音圧割合-周波数関係の波形に乱れはないが、ひび割れ損傷がある試験体で打音検査を行った場合、音圧割合-周波数関係の一部に大きな波形の乱れが発生する傾向があることが分かった。ひび割れ損傷が貫通しているか貫通していないかの判定は、音圧割合-周波数関係に大きな違いが表れなかったため困難だと考えられる。よって、採取した打音データをもとに音圧割合-周波数関係を評価することで試験体の損傷の有無が判別可能と考えられる。

##### 4.2 損傷のある試験体の音圧割合平均値-周波数関係における特性

損傷のある試験体の音圧割合平均値-周波数関係は、周波数 100Hz からの音圧が低くなる傾向がある。無貫通ひび割れ打音データと無損傷打音データの音圧割合平均値-周波数関係と、貫通ひび割れ打音データと無損傷打音データの音圧割合平均値-周波数関係どちらも、周波数 100Hz からの音圧が低くなっている。よって、損傷のある試験体の音圧割合平均値-周波数関係は 100Hz からの音圧が低くなる傾向があると考えられる。

##### 4.3 損傷のある試験体の音圧割合の最大、最小分布における特性

損傷のある試験体の音圧割合平均値-周波数関係は、周波数が 1000Hz から 10000Hz の間で音圧割合に大きな波形の乱れが発生する傾向がある。その理由が、音圧割合の最大、最小分布にある。損傷のある試験体の音圧割合の最大、最小分布は、最小割合は周波数が 1000Hz～10000Hz，最大割合も同様 1000Hz～10000 Hz にまとまっている特性がある。よって、損傷のある試験体の音圧割合平均値-周波数関係は、音圧割合の最大、最小分布の特性から、周波数が 1000Hz から 10000Hz の間に大きな波形の乱れが発生すると考えられる。

本研究で行った打音試験では、正常な打音データがあれば、特別な技術や器具を必要とせずに打音検査によって、吹付コンクリート板の一字ひび割れの有無が判別できることが分かった。

#### 参考文献

- 1) 愛知県吹付法面定期点検要領（案），  
<https://www.pref.aichi.jp/douroiiji/image/fukitsukenorimen.pdf> （2020.8 確認）
- 2) 音声編集フリーソフト Audacity, <https://audacity.softonic.jp> (2021.1 確認)

## 付着喪失を模擬した RC はり部材の耐荷挙動の実験的評価

EC17053 宮崎 奨平

### 1. 序論

構造物を新設する時代から構造物を適切に維持し長期的に使用する時代へと移り変わっている。特に、四方を海で囲まれたわが国では、塩害による鉄筋腐食劣化が大きな問題となっており、体系的な取り組みがなされている<sup>1)</sup>。せん断耐荷性能に着目した研究では、鉄筋腐食に起因して主鉄筋の付着劣化が生じることによりアーチ耐荷機構が形成され、非腐食時よりも耐力が増加する報告が多い<sup>2),3)</sup>。このように既往の研究により、鉄筋腐食がRC部材のせん断耐荷性能等に及ぼす影響は定性的に評価されつつあるが、現状においても定量的評価には至っていない。その理由は、鉄筋腐食がRC部材の耐力に影響する主たる劣化・損傷要因が、鉄筋の断面減少、鉄筋とコンクリート間の付着劣化、腐食膨張に伴うコンクリートのひび割れの3種であり、これら個々の要因が互いに影響を及ぼしているためであると考えられる。加えて、鉄筋腐食状況が一樣ではないこともその要因と考えられる。そのため、まずは個々の要因がRC部材の耐荷性能にどの程度影響を及ぼすのかを把握する必要があると考えられる。そこで本研究では、鉄筋腐食を生じたRCはり部材の耐荷挙動について、主鉄筋の定着性能という観点から実験的に評価することを目的とする。具体的には、鉄筋腐食による部分的な付着喪失がRCはり部材の耐荷挙動や鉄筋のひずみ分布に及ぼす影響を実験的に評価した。

### 2. 試験概要

#### 2.1 検討内容

鉄筋腐食による付着劣化状況は、健全な状態と付着が全く存在しないアンボンド型の間には存在するはずである。そこで本研究では、はり全体で付着が健全な状態と全く付着が存在しない状態の試験体の載荷実験を通じて、付着の有無がRCはり部材の耐荷挙動、特に鉄筋のひずみ分布に及ぼす影響を評価することとした。

#### 2.2 試験体概要

図-1 に、RC はり試験体諸元を示す。断面は 120mm×200mm で、有効高さ 162mm の位置に D16 鉄筋を 2 本配置している。支間長は 1100mm である。

表-1 コンクリート配合

|         | C (kg/m <sup>3</sup> ) | W (kg/m <sup>3</sup> ) | S (kg/m <sup>3</sup> ) | G (kg/m <sup>3</sup> ) |
|---------|------------------------|------------------------|------------------------|------------------------|
| 1000L 分 | 312                    | 175                    | 798                    | 957                    |
| 密度      | 3.16                   | 1                      | 2.62                   | 2.55                   |

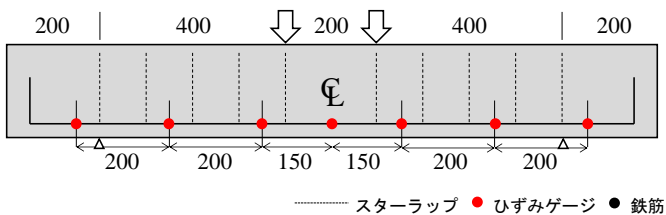


図-1 試験体諸元とひずみゲージの位置

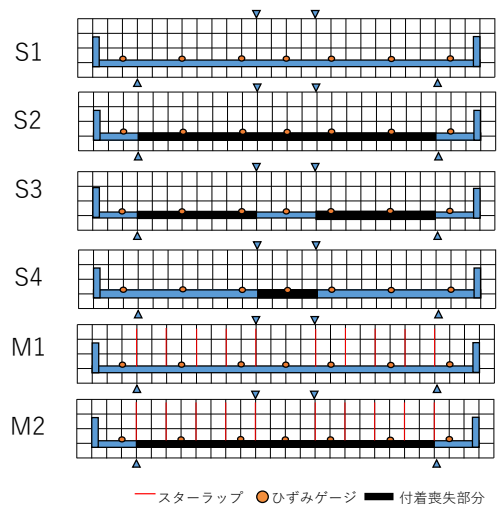


図-2 付着喪失部分の位置

表-1に示すコンクリートの配合を用いて、同一のコンクリートで6体の試体を作製した。本研究では、図-2に示す部分に鉄筋腐食による付着喪失を、鉄筋にコーキング材をつけることで模擬した。付着喪失が鉄筋ひずみの応答に与える影響を評価するために、スパン中央部、スパン中央から左右150mm、350mm、支点の外側550mmの位置にひずみゲージを貼った。

健全な状態で曲げ破壊するようにスターラップを配置した試験体(M1、M2)を2体と、せん断破壊するように設計した試験体(S1、S2、S3、S4)を4体作製した。鉄筋はM1、M2にはSD345(降伏強度 373.3N/mm<sup>2</sup>)を使用し、S1、S2、S3、S4にはSD390(降伏強度 426.7N/mm<sup>2</sup>)を使用した。また、図-2に示すようにS2はスパン内の全ての付着切り、S3は支点間以外のスパン内の付着を切り、S4は支点間のみ付着を切った。M2はスターラップを配置し、スパン内の全ての付着切れさせた。6体の試験体の載荷位置はすべて同じである。

### 3. 実験結果

#### 3.1 圧縮強度

コンクリートの圧縮強度は、試験体と同時に作製したテストピースにより求めた。Φ10cm×20cmのテストピースを計10本作製し、それぞれ圧縮試験を求めた。テストピースの圧縮試験結果より10本の平均値は28.2N/mm<sup>2</sup>であった。

#### 3.2 荷重-変位関係、ひび割れ発生状況

図-3は荷重-変位関係を示し、スパン中央下部のたわみを変位とした。また、バツ印は載荷試験で荷重をかけている途中で、支点間外の定着部の鉄筋が切れてしまい、試験体が破壊したことを表している。図-4は載荷試験時におきた、ひび割れを表した図である。

##### (1) 試験体 S1

スターラップ無しの健全試験体であり、図-4に示すように、試験体は載荷点から支点にかけて斜めひび割れが起き、また図-3で示した荷重-変位関係からみても破壊モードが斜め引張破壊だとわかる。

##### (2) 試験体 S2

S2はスターラップ無しでスパンの全て内の付着を切った試験体であり、図-4でのひびの入り方から見ると斜めひび割れが発生せず、曲げ破壊の壊れ方をしている。また、図-3で示した結果では、途中で試験体が壊れてしまったが、曲げ破壊に近い数値を表している。そして、S1と比較すると、荷重が増加している。

##### (3) 試験体 S3

S3はせん断スパンでの付着を切った試験体であり、図-4でのひび割れを見るとほぼ曲げ破壊での壊れ方をしている。S2と比較すると中央の所に一本多くひび割れしている。これは等曲げ区間のみ付着を切っていないのが理由であるといえる。S1と比較すると、S3は斜めひび割れが起きないことがわかった。また、図-3で示した結果では、S2と同様、途中で壊れてしまったが曲げ破壊に近いせん断圧縮破壊をしたといえる。

##### (4) 試験体 S4

等曲げ区間のみ付着を切った試験体であり、図-4で示すように、試験体は載荷点から支点にかけて斜めひび割れが起き、また図-3で示した荷重-変位関係からみても破壊モードが斜め引張破壊だとわかる。

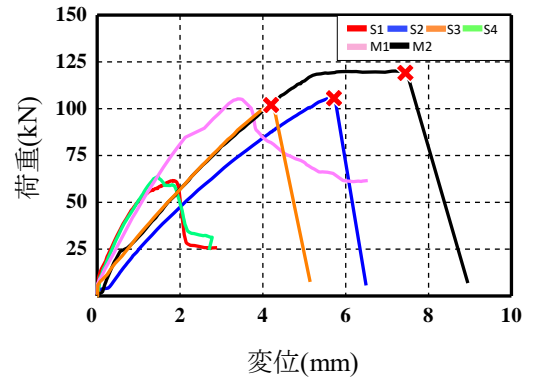


図-3 荷重と変位関係

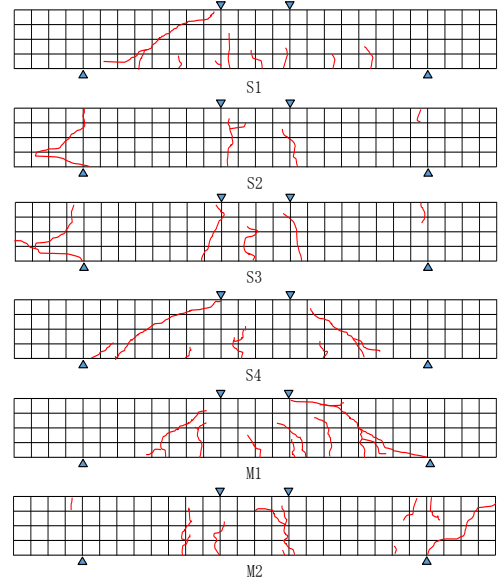


図-4 試験体のひび割れ図

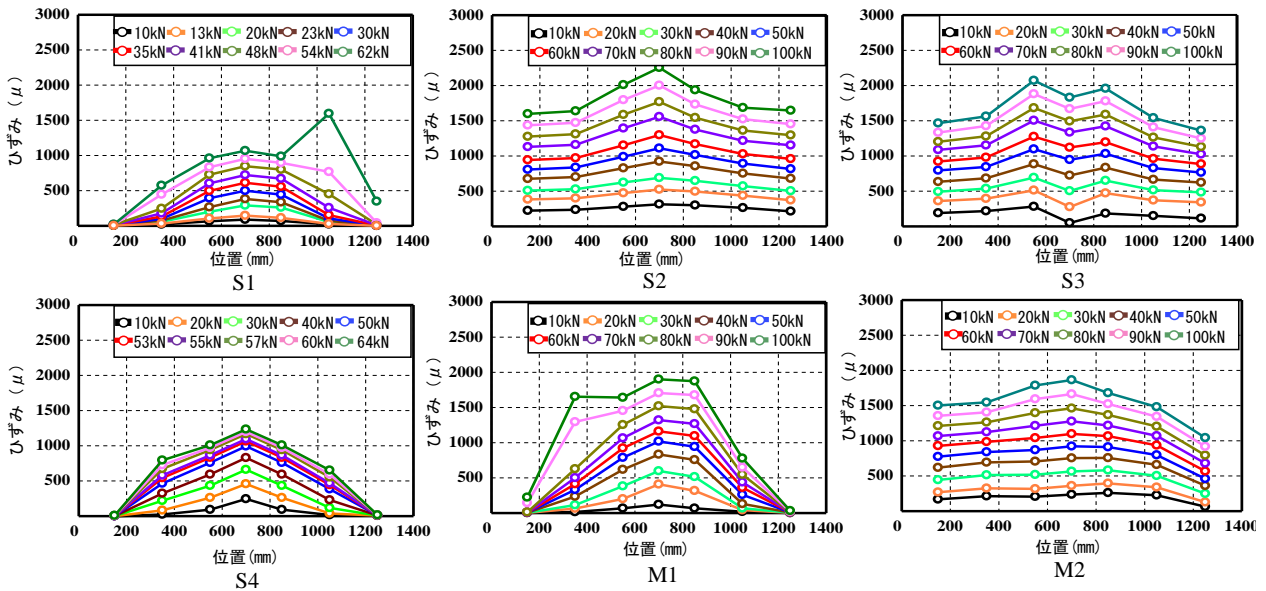


図-5 ひずみ分布図

S1 と比較的似た破壊形態であった。

(5) 試験体 M1

スターラップありの健全試験体であり、図-4 で示したひび割れと、載荷点から支点にかけて斜めひび割れが起きた。また、図-3 の結果からみても曲げ破壊に至っていない。本来、曲げ引張破壊にならないといけない試験体だが曲げ圧縮破壊した。原因としては、スターラップで使用した D6 鉄筋の一部が、強い荷重をかけている時に降伏してしまったからだと考える。

(6) 試験体 M2

スターラップありで全付着を切った試験体であり、図-4 で示したひび割れから曲げ破壊だとわかる。また図-3 で示した結果では、途中で試験体が壊れてしまったが、曲げ破壊に近い数値を表している。

このことから、付着を切る場所、範囲によってひびの入り方が大きく変化し、付着を切る範囲が広ければ、より曲げ破壊に近づくことがわかった。

3.4 ひずみ分布図

図-5 に各試験体のひずみ分布を示す。横軸は試験体の長さを表し、図中の丸印はひずみゲージを貼った位置を表している。また、それぞれの荷重の大きさでのひずみの値を表している。

ひずみ分布図から支点は 200mm、1200mm の位置、載荷点は二点載荷で 600mm、800mm の位置である。試験体 6 体はすべて同じ位置である。図-6 は計算をして出たひずみの値からできた理想値のひずみ分布図であり、理論値のひずみの値は図-7 から求められる。また、理論値を出すときの仮定として、平面保持、完全付着であると仮定する。

図-5 と図-6 で示したように、健全の試験体 S1 と M1 のひずみ分布図と、理論値を見比べると、S1 の荷重が 62kN、M1 の荷重が 90kN、100kN の時にはね上がっている部分がある。これはコンクリートがひび割

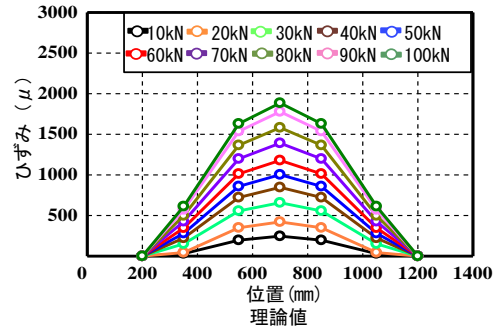


図-6 理論値でのひずみ図

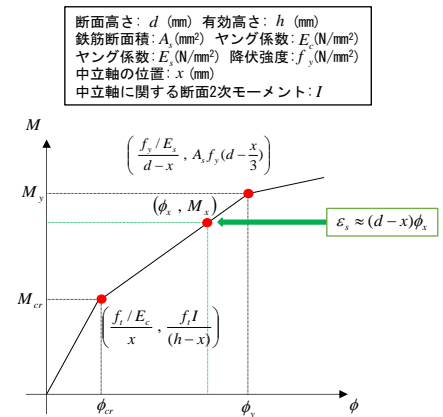


図-7 M-φ 曲線

れして壊れたと同時に、鉄筋もひび割れしていたからだといえる。また、分布図をみて全体的なバランスの形を見比べると、比較的同じ形であることが分かる。

次に S1、S3、S4 を比較すると、図-5 の 3 つの図より、それぞれ付着を切ったところによって形が異なることが分かった。S3 はせん断スパンの付着を切ったが、図を見ると載荷点間に貼ったひずみゲージの値がその位置の左右に貼ったひずみゲージの値より低いことが分かった。これは付着を切ったところのひずみの値のほうが、付着を切らなかったひずみの値よりも大きくなることが分かる。健全である S1 とも比較してみると、全体的にひずみの値が大きいことが、図から読み取れる。そして S3 の 100kN でのひずみの値が  $2000\mu$  を超えているものもあった。なので、S3 の試験体は曲げ破壊になったといえる。次に S4 の試験体は、支点間のみ付着を切ったものだが、S3 と同様、付着を切った中央のひずみゲージの値が上がっている。

次に、支点間より外に貼ったひずみの値が、理論値または付着を切っていない S1、S4、M1 は  $0\mu$  だったが、付着を支点間より外まで切った、S2、S3、M2 は  $0\mu$  ではなく、大きく挙動した。構造力学で考えれば、普通は支点間のみモーメントがかかり、ひずみもその中でのみ挙動が起きるが、今回の実験結果で付着を切った鉄筋が支点間外にあれば、そこでもひずみが挙動することが分かった。

#### 4. 結論

本研究では鉄筋腐食を生じた RC はり部材の耐荷挙動や鉄筋のひずみ分布に及ぼす影響を実験的に評価したものである、以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) スターラップなしでも、鉄筋腐食の範囲が広ければ、スターラップを配置しなくても曲げ破壊することがある。
- (2) 腐食生じた RC はり部材は、定着が十分に確保されている RC はり部材より耐力が増加する場合がある。  
また、鉄筋腐食した場所によって、荷重をかけた際に、ひび割れが発生する場所が異なり、腐食した範囲が広がるにつれて、斜めひび割れが起きにくくなる。
- (3) 腐食することにより、ひずみの挙動が大きくなり、ひずみ分布は変化する。また、支点間よりも外にまで鉄筋とコンクリートの腐食を防ぐと、支点間のひずみは挙動を起こす。

#### 参考文献

- 1) 村上祐貴・大下英吉・鈴木修一・堤知明：鉄筋腐食により定着不良を生じた RC はり部材の耐荷性状評価：土木学会論文集 E2, Vol. 67, No. 4, pp. 605-624, 2011
- 2) 松尾豊史・酒井理哉・松村卓郎・金津努：鉄筋腐食した RC はり部材のせん断耐荷機構に関する研究，コンクリート工学論文集，第 15 巻第 2 号，pp. 69-77, 2004. 5
- 3) 大屋戸理・金久保利之・山本康彦・佐藤勉：鉄筋の腐食性状が鉄筋コンクリート部材の曲げ性状に与える影響，土木学会論文集 E, Vol. 62, No. 3, pp. 542-554, 2006. 8
- 4) 梅原秀哲・中村 光・内田裕市・伊藤 睦・木全博聖：コンクリートを学ぶー構造編一，pp. 97-107, 2010. 9



## 吹付コンクリートの背面状況が打音特性に及ぼす影響

EC17060 吉戸 勇太

### 1. 研究の背景、目的

道路付帯構造物として切土法面などに利用される「コンクリート吹付工」は、昭和30年代後半から施行され、施工性の良さなどから全国的に広く施行実績のある法面保護工である。コンクリート吹付工の欠陥の検査方法の一つに「打音検査」がある。専門技術者や熟練技術者によって検査が行われているが、明確な判定基準がなく打音の音質等で判定しているのが現状である。それに加え、土木技術者、コンクリート吹付工の検査技術者の高齢化・人手不足が著しい状況である。そのため、打音検査結果から特別な技術を必要とせず、客観的に劣化や損傷部位を判別できる技術の確立が望まれている。

そこで本研究では、ひび割れを有する吹付コンクリート板を対象とし、背面に空隙がある状態での打音特性傾向を明らかとすることを目的としている。打音特性傾向が明らかとなれば、実構造物背面の空隙の発見に貢献できるとともに、ひび割れ発生要因の検討にも資することができると考えられる。特別な技術を必要とせず、実施可能な打音検査技術の確立を目指していることから、技術が確立されれば、道路施設の維持管理に大きく貢献することが期待される。

### 2. 実験概要

実構造物にはひび割れ、施工現場の地質など様々な条件が複合して存在している。可能な限り、実構造物の状態に近づけるため、表-1に示すように2種の試験体と、6種の背面状況を実験要因とした。表面にひび割れを導入していない試験体を無損傷試験体とし、裏面に1本のひび割れを導入した試験体を損傷試験体とし扱うこととする。試験体の写真を写真-1、写真2に示す。

表-1の試験体と、ステレオICレコーダ、コンデンサマイク、テストハンマーを用いて、打音データを取得する。打撃箇所は、中心の一箇所とした。テストハンマーを(約150mm)振り上げ、一定時間間隔を開け5回叩き、マイクとレコーダを使い、一つの打音データとし保存する。これを5セット繰り返したのち、間隔を開けずに5回叩いた。これを5セット繰り返すことによって、一度の打音検査につき10個の打音データを取得した。こうして6種の背面状況、2種の試験体の打音データを取得した。

表-1 試験体の種類と背面状況

| 実構造物を想定した試験体の種類                       | 背面状況  |
|---------------------------------------|---|
| 1.表面にひび割れを導入していない<br>2.裏面に1本の無貫通ひびを導入 | 1.砂地<br>2.シルト<br>3.砂地一部空洞を導入<br>4.シルトに一部空洞を導入<br>5.4辺を支えて12mm浮かせ、空隙を導入<br>6.4辺を支えて24mm浮かせ、空隙を導入 |
| 450mm角、厚さ100mm                        |   |

上記の方法で取得した打音データを音声編集フリーソフト Audacity<sup>2)</sup>を用いて高速フーリエ変換する。

まず初めに、採取した打音データ (.WAV) を Audacity 上で打音と関係のない部分を削除する。その後、データ処理を終えた打音データを選択し、周波数解析をする。以上の処理により音圧 (dB)、周波数 (Hz) のテキストデータ (.txt) を得る。これらのテキストデータをもとに、Excel などを用いて打音特性の傾向を検討した。

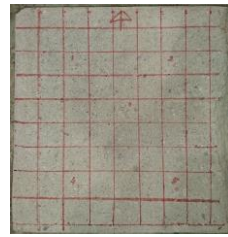


写真-1 ひび割れを導入していない試験



写真-2 ひび割れを導入した試験体

### 3. 試験結果

周波数解析を行った結果、**図-1** のような音圧-周波数関係を得た。得た音圧-周波数関係図を、異なる背面状況で比較し、それぞれの打音特性の傾向を検討した結果、背面状況による明確な打音特性の違いは見られなかった。そこで、各周波数における音圧割合をもとめた。その一例が**図-2** である。**図-2** では、空隙を導入した損傷試験体の打音データ (10 個) を無損傷試験体の打音データ (1 個) で除算した結果の音圧割合-周波数関係を示している。さらに膨大な量の音圧割合-周波数関係から平均値をとり、音圧割合の平均値-周波数関係をもとめた。音圧割合の平均値-周波数関係図から得た打音特性の傾向を以下に示す。

#### 3.1 試験体の背面地質が与える打音特性 (試験 1-1、1-2、1-3、1-4)

**図-3** に背面を砂地にした試験体の打音データ (50 個) を、砂地に一部空洞を導入した試験体の打音データ (50 個) を、それぞれ除算したデータ (2500 通り) の平均からもとめた音圧割合の平均値と周波数の関係を示す。**図-4** に背面をシルトにした試験体の打音データ (10 個) を、シルトに一部空洞を導入した打音データ (10 個) を、それぞれ除算したデータ (100 通り) の平均からもとめた音圧割合の平均値と周波数の関係を示す。**図-3** より、背面を砂地にした試験体と砂地に一部空洞を導入した試験体とは大きな違いは見られないことが分かる。**図-4** より、背面地質がシルトの場合、空隙を導入することによって打音特性に違いが現れることが分かる。この結果から背面が砂地である場合、砂の粒子間に空隙が発生し、健全と思われる背面状況としても、空隙がある判定になったと考えた。よって、背面地質をシルトに固定し実験を行うことにした。

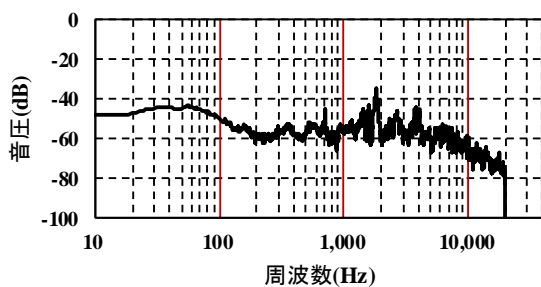


図-1 音圧-周波数関係

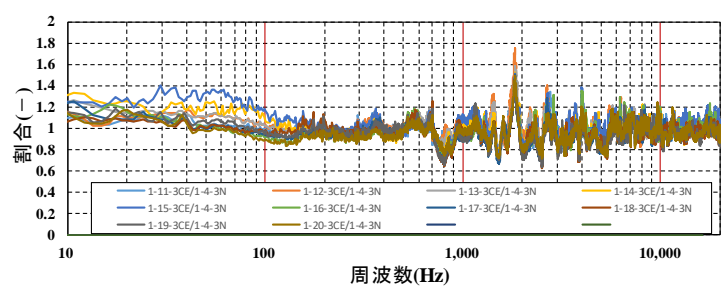


図-2 音圧割合-周波数関係

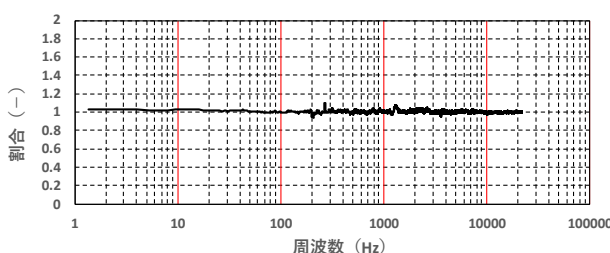


図-3 音圧割合 (一部空洞/無損傷 (砂地)) の平均値-周波数関係

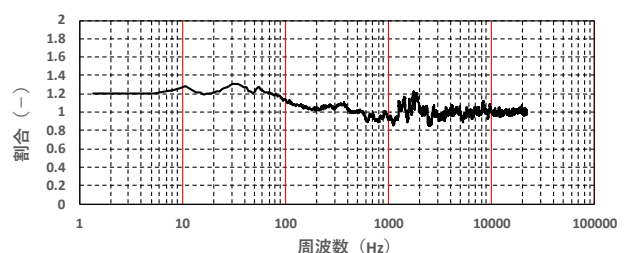


図-4 音圧割合 (一部空洞/無損傷 (シルト)) の平均値-周波数関係

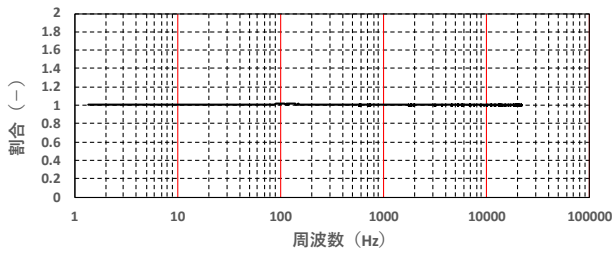


図-5 音圧割合（無損傷/無損傷）の平均値-周波数関係

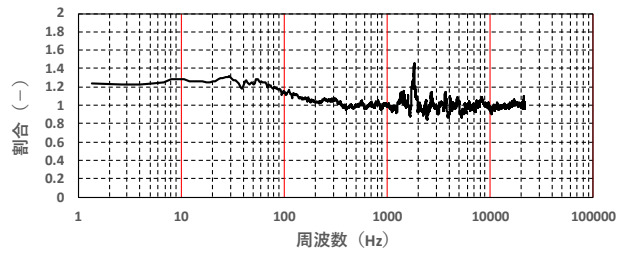


図-6 音圧割合（無損傷 12mm の空洞/無損傷）の平均値-周波数関係

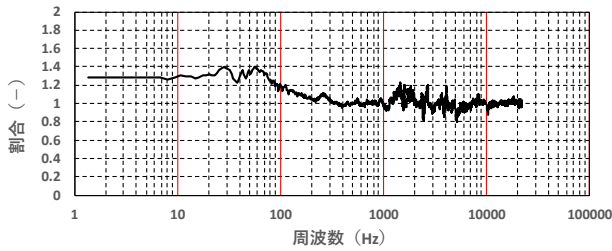


図-7 音圧割合（無損傷 24mm の空洞/無損傷）の平均値-周波数関係

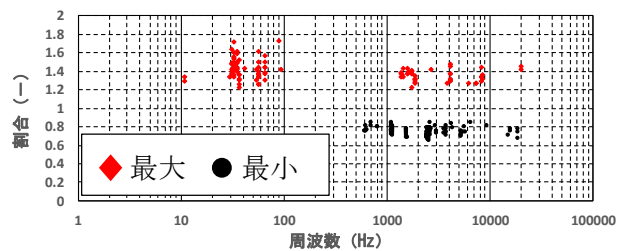


図-8 音圧割合（一部空洞/無損傷）の最大、最小分布

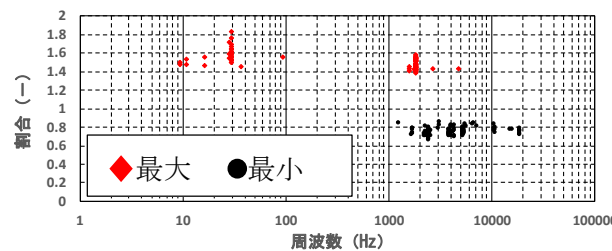


図-9 音圧割合（無損傷 12mm 空洞/無損傷）の最大、最小分布

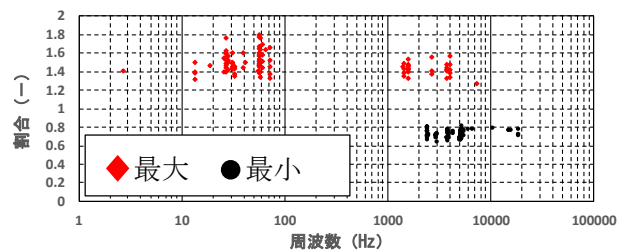


図-10 音圧割合（無損傷 24mm 空洞/無損傷）の最大、最小分布

### 3.2 試験体背面に空隙を導入した状態の打音特性（試験 1-2、1-4、1-5、1-6）

図-5 に、背面をシルトにした試験体の打音データ（10 個）を同データの除算を除き、それぞれ除算したデータ（90 通り）の平均からもとめた音圧割合の平均値と周波数の関係を示す。図-6 に背面をシルトにした試験体の打音データ（10 個）で、4 辺を支えて全体を 12mm 浮かせ空隙を導入した試験体の打音データ（10 個）を、それぞれ除算したデータ（100 通り）の平均からもとめた音圧割合の平均値と周波数の関係を示す。図-7 に背面をシルトにした試験体の打音データ（10 個）で、4 辺を支えて全体を 24mm 浮かせ空隙を導入した試験体の打音データ（10 個）を、それぞれ除算したデータ（100 通り）の平均からもとめた音圧割合の平均値と周波数の関係を示す。図-5 より、音圧割合の平均値が 1 付近にまとまっており、無損傷試験体から採取した打音データに大きなバラつきがなかったことが分かる。図-6、図-7 より、背面に空隙を導入した試験体は、背面に空隙を導入していない試験体に比べ 200 Hz 以下の音圧が高くなる傾向にあることが分かる。

図-6、図-7 より、背面に空隙を導入した場合、1000Hz～5000Hz 間で音圧割合に乱れが発生する傾向が確認できる。図-8～図-10 は 1Hz～20000Hz までの音圧割合-周波数関係の各データの最大割合、最小割合をプロットした図である。図より最大割合は 20Hz～80Hz と 1000Hz～2000Hz、4000Hz あたりでまとまりがあることが分かる。最小割合も 1000Hz～5000Hz でまとまりがあることが分かる。この結果からも、試験体背面に空隙を導入し、無損傷試験体の打音データと音圧割合を比較した場合 1000Hz～5000Hz 間で音圧割合に乱れが発生する傾向にあることが分かる。また、12mm の空隙と 24mm の空隙では大きな違いは見られなかった。

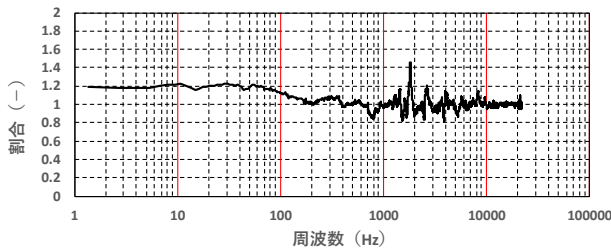


図-11 音圧割合（損傷試験体 12mm の空洞/無損傷）の平均値-周波数関係

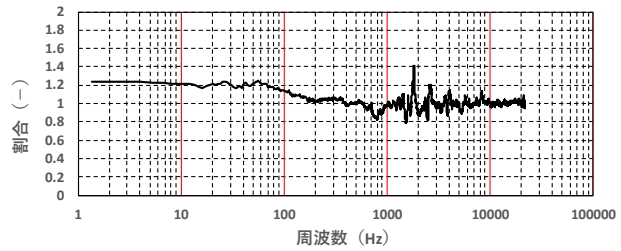


図-12 音圧割合（損傷試験体 24mm の空洞/無損傷）の平均値-周波数関係

### 3.3 背面状況が損傷試験体に与える打音特性（試験 2-5、2-6）

図-11 に背面をシルトにした無損傷試験体の打音データ（10 個）で、4 辺を支えて全体を 12mm 浮かせ空隙を導入した損傷試験体の打音データ（50 個）を、それぞれ除算したデータ（500 通り）の音圧割合の平均値と周波数の関係を示す。図-12 に背面をシルトにした無損傷試験体の打音データ（10 個）で、4 辺を支えて全体を 24mm 浮かせ空隙を導入した損傷試験体の打音データ（50 個）を、それぞれ除算したデータ（500 通り）の音圧割合の平均値と周波数の関係を示す。図-11、図-12 より、損傷がある試験体であっても、3.2 で述べたような特徴と同様な打音特性を確認できた。

## 4. まとめ

本研究では、特別な技術を必要とせず実施可能な打音検査技術の確立を目指し、吹付コンクリート板の背面状況が打音特性に与える傾向を検討した。まずは、背面地質による比較を行い地質が打音に及ぼす影響を把握した。続いて、背面に空隙を導入した場合の打音特性への影響について考察した。本研究で得られた成果を以下に示す。

- (1) 背面地質による比較を行った結果、砂地では背面に空隙を導入しても、打音特性に大きな違いは見られなかった。砂地のような粒子が大きい地質であると、粒子間に空隙が発生し、健全と思われる背面状況を作成しても、空隙がある判定になったと考えられる。
- (2) 背面に空隙を導入した場合、健全な状態の試験体と比べ、200Hz までの音圧が高くなる傾向にある。最大音圧比は、1.2～1.4 倍程度となることが分かった。背面の空隙が 12mm と、24mm では大きな違いはなかった。
- (3) 背面に空隙を導入し、健全な状態の試験体と音圧割合比較を行った場合、1000Hz～5000Hz の間で音圧割合に乱れが発生する傾向があることが分かった。
- (4) ひび割れのある試験体の背面に空隙を導入しても、(2) (3) と同様な特徴を得られた。

しかしながら、共同研究者の溝田の卒業論文<sup>3)</sup>によると、損傷試験体の打音特性においても背面に空隙を導入した場合と同様の打音特性が確認された。よって、本手法では吹付コンクリート板の異常の発見はできるが、背面に空隙があるのかの判定はできない。

## 参考文献

- 1) 田沢雄二郎：吹付コンクリート工法，粉体工学会誌，Vol.25，No.3，pp168-174，1988
- 2) 音声編集フリーソフト Audacity，<https://audacity.softonic.jp> (2021.1 確認)
- 3) 溝田淳之介：吹付コンクリート板のひび割れ損傷が打音特性に及ぼす影響，PP6-8，2021

## 砂防堰堤の性能評価に関する検討

EC17062 渡邊 知博

### 1. 序論

我が国では、土砂災害が年々増加し、防災上の観点から砂防堰堤の重要性が高まっている。また、生産性向上を目的として、打込み間隔を短縮する施工方法が検討されている。町らによる3次元温度応力解析によるひび割れ指数の検討において、解析では、堤体中心部でひび割れ指数が材齢250日程度で0.8程度となり、自己収縮と温度応力による初期ひび割れの発生の可能性が高いという結果が得られ、久米の卒業研究<sup>2)</sup>においても同様な結果が得られた。しかしながら、実構造物で計測された躯体内部のひずみ履歴や外観からは、ひび割れの発生が認められない結果となった。そこで本研究では、解析結果と実測結果の相違が生じる要因として、自重載荷材齢、地盤による躯体の外部拘束状況がひび割れ指数や躯体内部のひずみ挙動に及ぼす影響を検討することを目的とした。また、久米が実施した躯体の耐荷力解析では、躯体と地盤面間のすべりを考慮していないので、本研究では、新たに躯体と地盤面間のすべりモデルを構築し、すべりが躯体の耐荷特性に及ぼす影響を評価することを目的とする。

### 2. 解析概要

#### 2.1 解析モデル

図-1に解析対象としたウルシ谷砂防堰堤第一垂直壁のAブロックを示す。地盤も含めた解析モデルを図-2に示す。なお、A、Bブロックの境界には、目地材を介しているため、境界条件を「自由」とした。岩盤との境界条件は、「2016年制定 コンクリート標準示方書」<sup>3)</sup>の地盤条件を参考に、軟岩相当の剛性を $2000\text{N/mm}^2$ とした。なお、町と久米の検討により、躯体内部の温度履歴は解析と実測で一致している。また、コンクリートの材料物性値には、試験値を使用している。

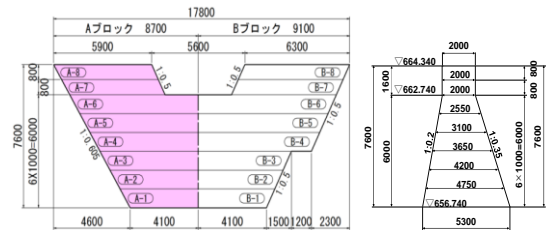


図-1 解析対象とした砂防堰堤の形状寸法

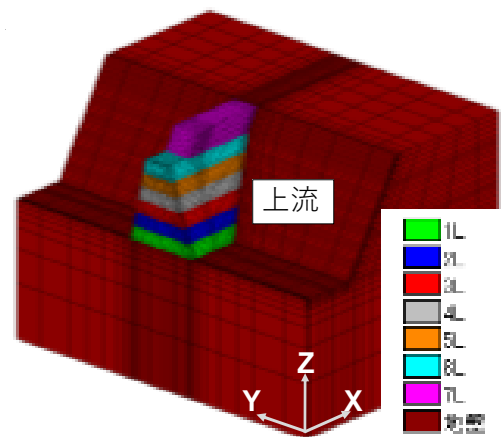


図-2 リフト割

#### 2.2 温度応力解析の解析条件

温度応力解析結果に影響を及ぼす要因には、躯体の外部・内部温度履歴、外部拘束の状況、材料物性値の材齢変化および外力として自重載荷材齢が考えられる。温度履歴と材料物性値の材齢変化は、計測結果と解析で一致していることから、本研究では、自重載荷材齢と外部拘束状況が温度応力解析結果に及ぼす影響を確認することにした。

久米の研究では、自重を打設後各リフト7日(168h)に作用させていた。そこで本研究の解析では7日以前の解析を行うことで結果が変化すると考え、打設後(12h, 24h, 48h, 72h, 120h, 168h)で作用させることとした。地盤拘束では、示方書に基づいて地盤の剛性を $2000\text{N/mm}^2$ としているが、本研究では、剛性を10分の1とした解析を実施することとした。

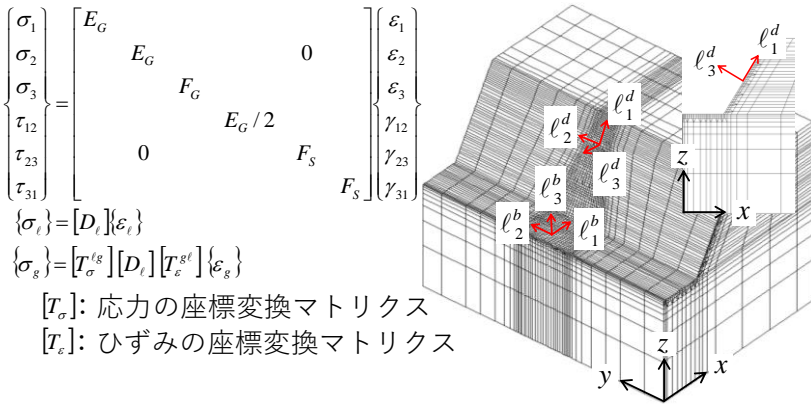


図-3 摩擦要素の応力-ひずみ関係

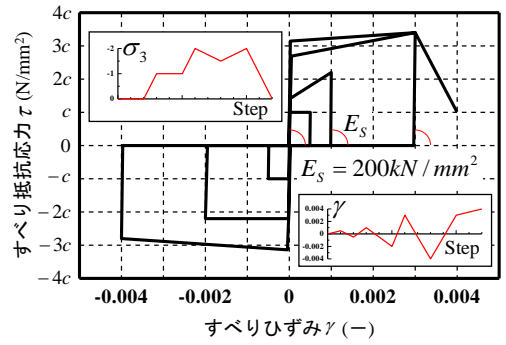


図-4 すべり方向の応力-ひずみ関係

### 2.3 砂防堰堤と地盤間の摩擦挙動のモデル化

本研究では、堰堤と地盤間の摩擦を、堰堤と接する地盤要素に図-3に示す応力-ひずみ関係を仮定することで考慮した。図に示すように、地盤底面および斜面に垂直方向を局所座標系  $\ell_3$  軸とした直交異方性モデルである。ここで、 $E_G$  は地盤の弾性剛性であり、 $\ell_3$  軸方向には、圧縮応力を伝達するが、引張応力を伝達しない応力-ひずみ関係  $F_G$  を仮定した。すべり方向には、図-4に示す応力-ひずみ関係  $F_S$  を仮定した。外力作用などで  $\ell_3$  軸方向の応力が変動することにより摩擦抵抗が増減することを考慮するために、すべり開始応力を図-5に示すモールクーロン型の降伏基準を使用した。これにより、図-4に示すように、 $\ell_3$  軸方向の直応力変動に伴うすべり抵抗応力の変化を考慮することが可能となる。なお、図-5中の粘着力と内部摩擦角には、設計要領<sup>4)</sup>に示されている軟岩用の値を使用した。

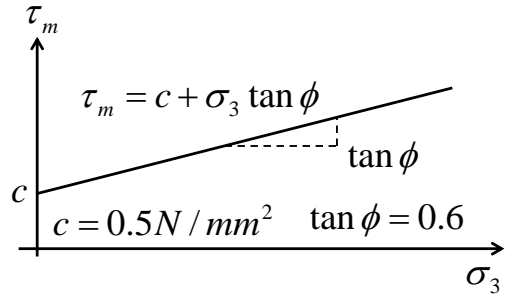


図-5 すべり開始基準

## 3. 解析結果と考察

### 3.1 温度応力解析結果の相違と考察

自重载荷材齢と地盤剛性が解に及ぼす影響を確認するために、ひび割れ指数が小さくなる図-6に示す表面および中央部2ヶ所のひずみとひび割れ指数の比較を行った。図-7、図-8、図-9に打設後12h, 24h, 48h, 72h, 120h, 168hに自重を作用させた場合のX方向, Y方向およびZ方向のひずみ履歴を示す。図-10に自重载荷材齢を変化させたひび割れ指数の比較を示す。これら解析結果は、久米の結果と同じであり、自重载荷材齢によりわずかな数値変化は確認されたが、いずれも一致する結果となった。

図-11, 図-12に12時間と168時間(7日)経過後の最大経験コンター図を示す。他に6パターンを解析

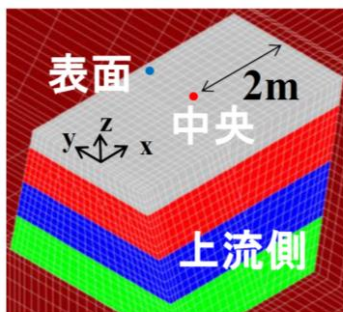


図-6 ひずみ計埋め込み場所

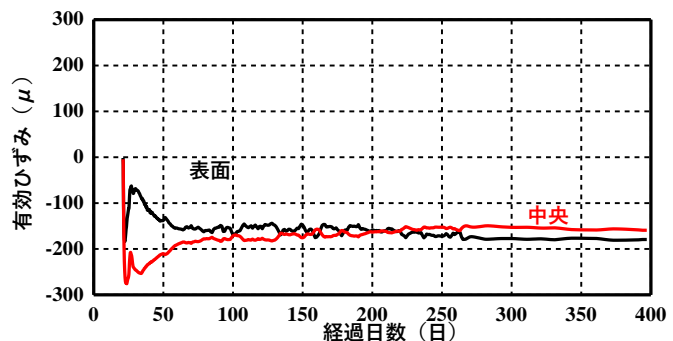


図-7 X方向のひずみ変化

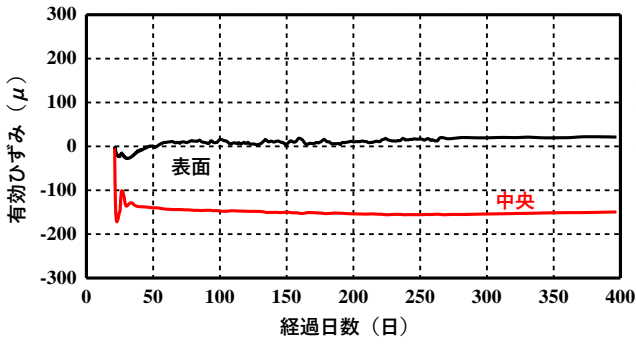


図-8 Y方向のひずみ関係

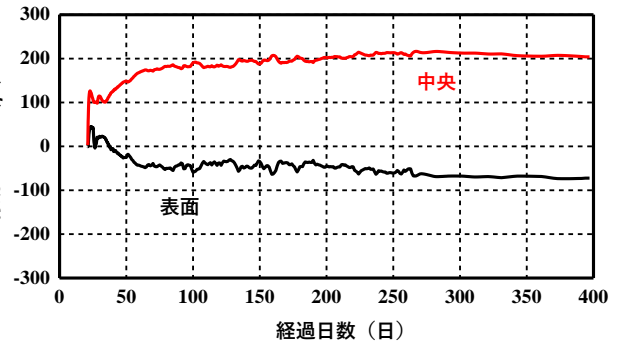


図-9 Z方向のひずみ関係

したがどの時間も変化が見られなかった。地盤剛性を低減させた温度応力解析についても、ひずみやひび割れ指数に顕著な変化は確認されなかった。自重による応力が  $0.5\text{N/mm}^2$  程度であること、外部拘束は本解析対象では堰堤内部まで影響を及ぼさないことがその要因と考えられる。

### 3.2 耐荷力解析（初期応力なし）の相違と考察

図-13 に、堰堤と地盤間の摩擦考慮の有無を変数とした荷重-変位関係の比較を示す。摩擦を考慮していない結果には、久米の結果を用いた。図に示すように、袖部底部の3点の変位で比較を行った。なお、荷重最大点は、解の収束が取れた最終点とした。図より、地盤面の摩擦を考慮した結果、久米の結果と比較して剛性が低下する結果となった。地盤側である緑のグラフは変位  $1\text{mm}$  の数値で久米との線から逸れていき、結果的には  $10000\text{kN}$  まで届かなかった。中央の値は  $2.5\text{mm}$  の位置で荷重は  $9000\text{kN}$  を示した。本研究は動くようにプログラミングしてあるために数値が低くなったと考えられる。

図-14, 図-15, 図-16, 図-17 は、久米と本研究の破壊時の袖部下部の6リフト天端と上流側の鉛直方向全ひずみ分布の比較を示している。とも荷重増加に対してほぼ線形的な挙動を示し、上流側から見た袖部左下部で曲げひび割れが急激に開講するとともに、袖部右側にもひび割れが進展することで曲げ破壊の様相を呈した。ただし、曲げ破壊の様子が若干変化した。なお、袖部右側は弾性の地盤要素と接していることから、その部位にもずれによるひび割れが発生している解析対象とした砂防堰堤では、コンクリートのひずみが計測されている。

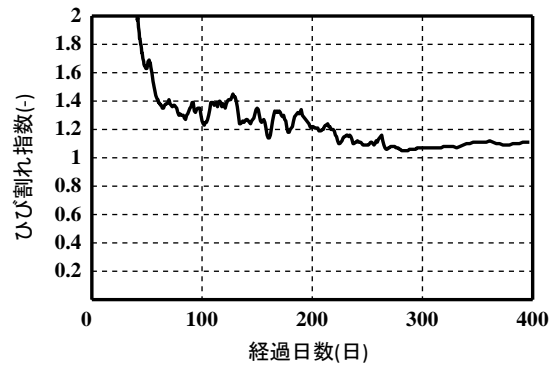


図-10 ひび割れ指数

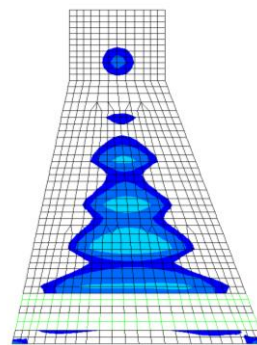


図-11 12時間後

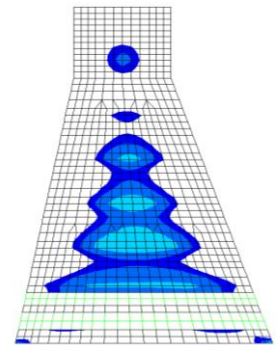


図-12 168時間後

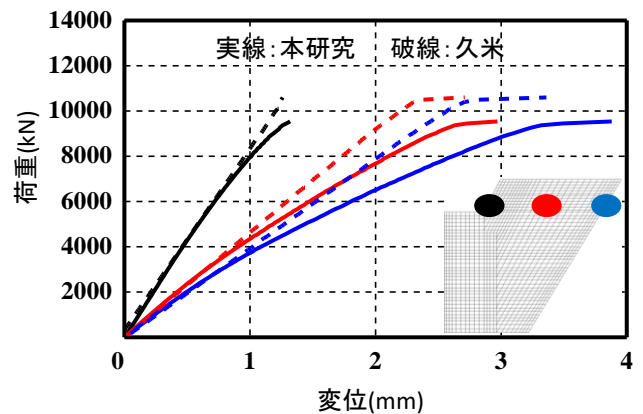


図-13 地盤面の摩擦が荷重-変位関係に及ぼす影響

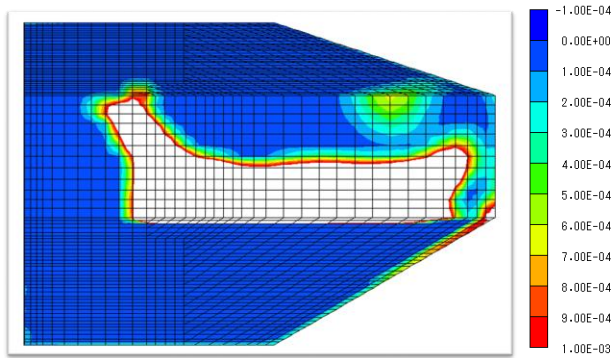


図-14 6リフト上 すべりがない場合

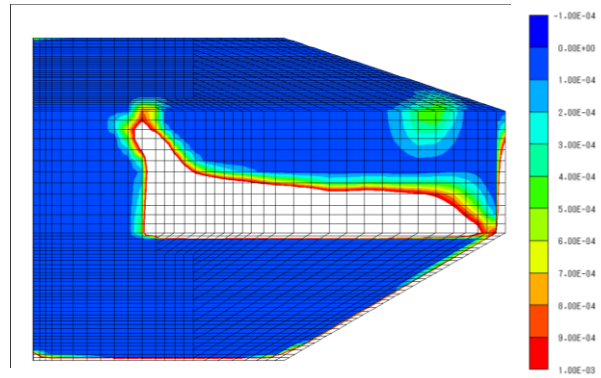


図-15 6リフト上 すべりがある場合

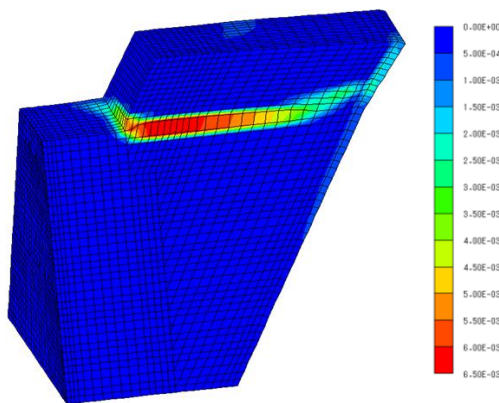


図-16 すべりがない時のひずみ分布

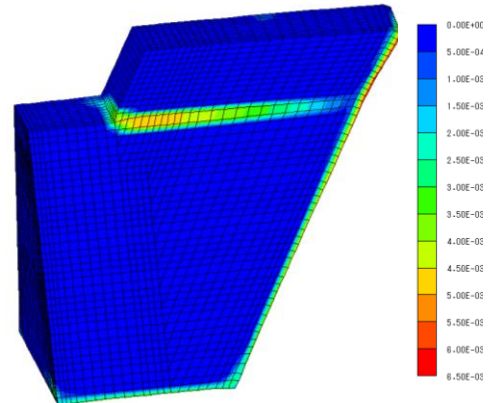


図-17 すべりがない時のひずみ分布

#### 4. 結論

久米の研究対象の無筋のマスコンクリート構造物である砂防堰堤を対象に、耐荷力解析、温度応力解析、自重の荷重材齢、地盤の剛性を条件に加え解析を行った結果、以下のことが明らかとなった。

本検討範囲内では、温度応力解析では、久米の結果とあまり変化が起きなかった。耐荷力解析では、荷重—変位関係のグラフでは、久米の結果は 10000kN を超えたあたりで上流側から見た袖部左下端部で曲げひび割れが開口するとともに、袖部右側にもひび割れが進展することで曲げ破壊した。本研究では 9000 kN を超えたあたりで同じような曲げ破壊が起こった。

自重の荷重材齢、地盤の剛性を加えた条件でも、久米の結果とは全然変化がなかった。なお、本検討ではひび割れが発生しており、実際の砂防堰堤はひび割れが発生していないことから、地盤要素が躯体の耐荷機構や耐荷性能に大きく影響を及ぼしていると考えられる。そのため新たに、材料特性やヤング係数の引張強度の発現、クリープの影響を考慮することが必要と考えられ今後の再検討が必要である。

#### 参考文献

- 1) 町勉ほか：打設間隔を短縮して試験施工した砂防堰堤垂直壁の温度応力解析とモニタリング，土木学会 第 74 回年次学術講演会，第 6 部門，p.701，2019.9
- 2) 久米修平：2019 年度卒業論文 砂防堤防の初期ひび割れが耐荷力に及ぼす影響に関する研究
- 3) 土木学会「2017 年制定 コンクリート標準示方書」
- 4) 設計要領 第二集 橋梁建設編，東日本高速道路株式会社，2012.7
- 5) 日本コンクリート工学会「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016」
- 6) 伊藤 睦ほか：初期応力を考慮した RC 構造物の耐荷力手法の構築，コンクリート工学年次論文集，Vol.34，No.2，pp.19-24，2012