

論文 新旧コンクリート界面における高圧縮応力作用下のせん断伝達挙動に関する解析的検討

湯浅 康史^{*1}・森川 英典^{*2}・大坪 正行^{*3}・近藤 拓也^{*4}

要旨：PC 桁の外ケーブル補強における定着体の開発にあたり、基礎検討として静的 2 面せん断実験を対象に非線形有限要素法解析を行い、新旧コンクリート界面における高圧縮応力作用下(20N/mm²)のせん断伝達挙動の解析手法について検討した。その結果、新旧コンクリート界面の構成則を適切に設定することで、実験を概ね表現できることがわかった。また、新旧コンクリート界面のせん断剛性は作用する圧縮応力に依存する可能性があり、感度解析の結果から、検討した供試体では 25N/mm³ 程度となることを推察した。さらに、実験の新旧界面の挙動や応力状態について解析的評価を行った。

キーワード：新旧コンクリート界面、せん断伝達挙動、静的 2 面せん断実験、非線形有限要素解析

1. はじめに

PC 鋼材の腐食や破断が生じた PC 桁において、補強が必要な場合、プレストレスを追加導入する外ケーブル補強が用いられることが多い。PCI 形桁に外ケーブル補強を行う場合には、主桁ウェブ側面にコンクリート製の定着体を設ける方法が一般に用いられ、ウェブを貫通した PC 鋼棒の緊張力により定着される(以下、ウェブ定着方式)。しかし、鉄道橋における多主 PCI 形桁は、主桁間隔が狭くウェブ定着方式の定着体を施工することが困難である。そこで、図-1 に示すように、主桁間に新たにコンクリート製の定着体を構築し、鉛直方向の PC 鋼材を緊張して定着する方式の構造(以下、桁間定着方式)を考案した。桁間定着方式は、下フランジハンチ面における新旧コンクリートの界面(以下、新旧界面)でのせん断伝達耐荷力により、外ケーブルの緊張力に抵抗することを意図している。また、ハンチ幅が小さいことから、ハンチ面に 10~20N/mm² の高い圧縮応力を作用させることで、コンパクトな形状とすることをコンセプトとしている。

桁間定着方式による定着体の力学的性能を評価するた

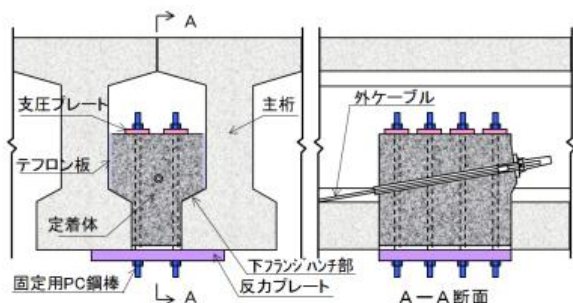


図-1 桁間定着方式の適用イメージ

め、これまでに実験的な基礎検討を実施してきているものの(例えば 1,2), 実構造物に適用した場合の定着体の耐力や主桁への影響を評価するためには、解析を用いた検討が必要不可欠である。なお、解析にあたっては、ハンチ面における新旧界面のせん断伝達に関する構成則やそのパラメータを適切に設定することが重要となると考えられる。しかし、新旧界面のせん断伝達に着眼する既往の解析的検討事例は少なく^{3,4}、さらに、新旧界面に垂直に作用する圧縮応力(以下、界面垂直応力)が高い場合の解析事例は見当たらない。これらのことから、高い界面垂直応力を受ける新旧界面のせん断伝達挙動を、解析にて表現できるか不透明である。

このような背景から、本研究では、桁間定着工法による定着体の解析的検討を実施する前段の基礎検討として、静的 2 面せん断実験の非線形有限要素法解析を行い、高い界面垂直応力を受ける新旧界面のせん断伝達挙動に関する解析手法の検証および実験の評価を行った。

2. 解析概要

2.1 解析対象²⁾

解析対象は、筆者らが過去に実施した²⁾ 静的 2 面せん断実験供試体とした。供試体の概要図および材料特性値を図-2、表-1 に示す。新旧界面の大きさは 230mm × 250mm とし、界面にずれ止め鉄筋は配置していない。実験では、水平方向の PC 鋼棒の緊張により新旧界面に界面垂直応力を作用させ、その後、荷重試験機により鉛直荷重を作用させた。対象供試体は界面垂直応力が 20N/mm² で、新旧界面の表面処理としてアルミナ粉によるショットブラストを行った供試体とした。

*1 西日本旅客鉄道株式会社 構造技術室 コンクリート構造 工修 (正会員)

*2 神戸大学大学院 工学研究科市民工学専攻 教授 博(工) (正会員)

*3 西日本旅客鉄道株式会社 構造技術室 コンクリート構造 課長 (正会員)

*4 西日本旅客鉄道株式会社 構造技術室 コンクリート構造 博(工) (正会員)

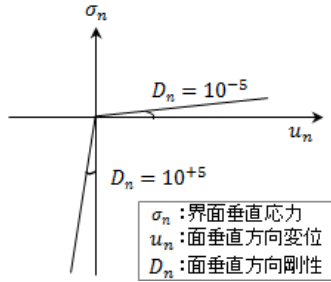


図-8 供試体底面 接合要素モデル

表-2 新旧界面の接合要素のパラメータ

	単位	設定値	備考
界面垂直方向剛性(D _n)	N/mm ³	100000	十分剛な値
せん断剛性(D _t)	N/mm ³	16.6	喜多らの研究を参考 ³⁾
粘着力(C)	N/mm ²	2	Randlらの研究を参考 ⁴⁾
摩擦係数(tanφ)	-	0.9	Randlらの研究を参考 ⁴⁾
界面の引張強度(f _t)	N/mm ²	2.214	コンクリートの引張強度の70% ⁵⁾

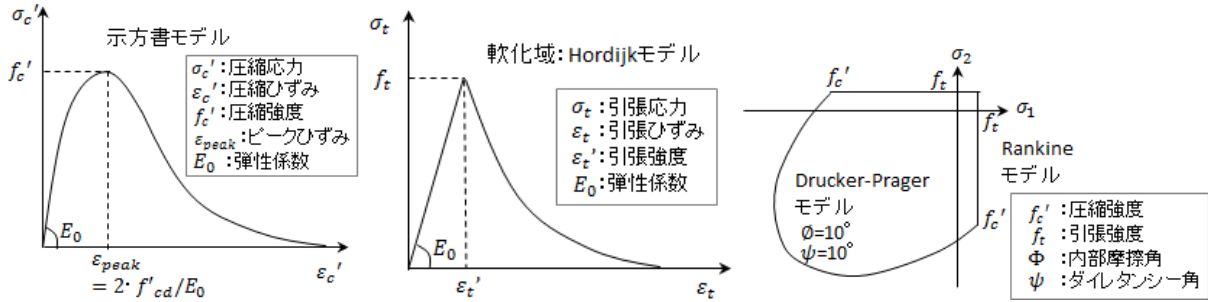


図-7 コンクリートの材料モデル (左: 圧縮モデル, 中: 引張モデル, 右: 降伏曲面)

を表現する引張応力の基準を設けた。すべり基準に達した後、図-6のようにせん断強度は粘着力分が低下し、界面垂直応力に比例すると仮定した⁴⁾。なお、摩擦係数(tan φ)はすべり前後で変化しないと仮定した。また、剥離基準に達した後は、せん断力も引張応力も伝達しないモデルとした。

(2) コンクリート

コンクリートの材料モデルを図-7に示す。圧縮側は軟化を考慮したコンクリート標準示方書⁸⁾のモデルとし、引張側は Hordijk の軟化勾配を考慮したテンションソフトニングモデルとした。なお、示方書に従って、引張破壊エネルギーは 0.1N/mm とした。コンクリートは2軸応力状態となることを考慮し、降伏の判定は圧縮側に Drucker-Prager モデルを適用し、内部摩擦角は 10° とした。一方、引張側には Rankine モデルを適用した。なお、コンクリートのひび割れは分散ひび割れモデルを用い、多方向固定ひび割れモデルを採用した。ここで、せん断剛性低下率は 0.2 とした。

(3) 鉄筋、PC 鋼材および定着板、載荷板

鉄筋、PC 鋼材は降伏強度に達するまで弾性挙動とし、その後は初期剛性の 1/1000 の剛性で直線的に応力が増加するバイリニアモデルを用いた。降伏条件は Von Mises の降伏基準に従うものとした。なお、鉄筋は埋め込み鉄筋要素⁷⁾を用いており、コンクリートと鉄筋の付着は完全付着とした。定着板および載荷板は完全弾性体とした。

(4) 供試体底面の接合要素

供試体底面の接合要素は図-4に示したバネ状モデルで、浮き上がりを考慮し、接合要素が引張応力を受ける場合、応力がほぼ発生しないモデルとした(図-8)。

3. 解析結果

3.1 新旧界面のパラメータおよび材料物性値

新旧界面の接合要素のパラメータは、既往の研究を参考に表-2のように仮定した。粘着力および摩擦係数は randlらが提案する拡張せん断摩擦理論⁴⁾に示される値の平均値を用いた。また、剥離の判定基準はコンクリートの引張強度の70%と設定⁵⁾した。また、コンクリートや鉄筋、PC 鋼材の物性値は材料試験結果に基づき設定した。

3.2 新旧界面パラメータの検証と同定

解析と実験の荷重変位関係を図-9に示す。なお、変位位置は中ブロック下端の変位を用いた。その他の解析結果の詳細については、3.3 解析結果にて示す。

図-9の荷重変位関係をみると、最大荷重については、解析値は実験値より1割程度小さく、解析は実験を多少過小評価していると考えられるが、比較的精度良く安全側に評価していると考えられる。このことから、最大荷重に影響すると思われる、新旧界面の粘着力や摩擦係数のパラメータは概ね妥当であったものと推察される。

次に、剛性に注目する。実験の剛性は載荷初期のなじみ等の影響で、載荷荷重 200kN までの初期の剛性が小さく、載荷荷重の増大とともに剛性が増加する挙動となっている。新旧界面のせん断剛性を検討する場合には、200kN 以降の剛性と比較することが適切と考えられ、200kN 以降の解析と実験の剛性を比較すると、解析の剛性が小さくなる結果となった。解析における新旧界面のせん断剛性の値は、界面垂直応力がほぼ作用しない供試体を対象として解析を行った結果³⁾であり、本供試体のように 20N/mm² 程度の高い界面垂直応力が作用する場合には、せん断剛性が異なる可能性がある。

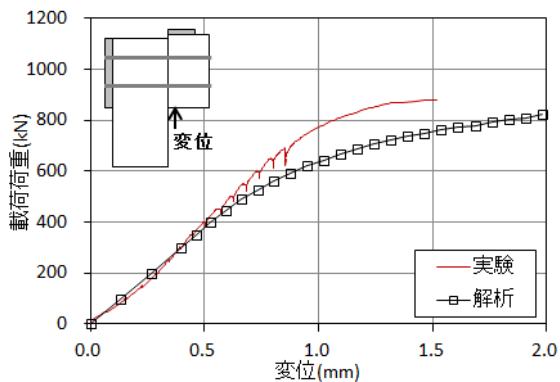


図-9 荷重変位関係

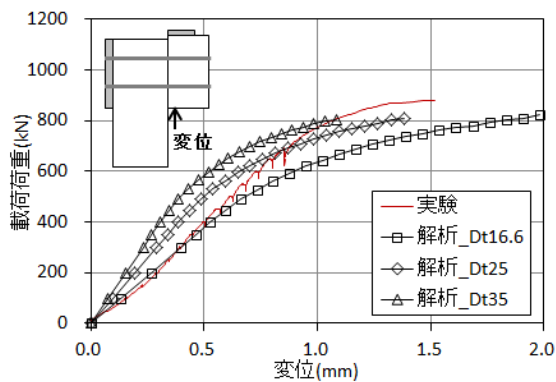


図-10 荷重変位関係 (応答解析)

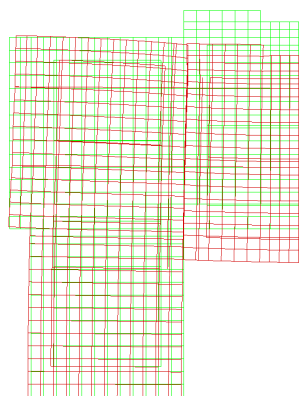


図-11 変形図 (解析最終ステップ)

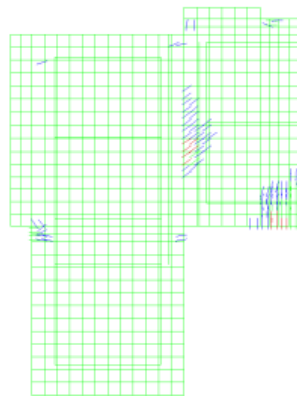


図-13 ひび割れ図 (左: 解析最終ステップ, 右: 実験終了後)

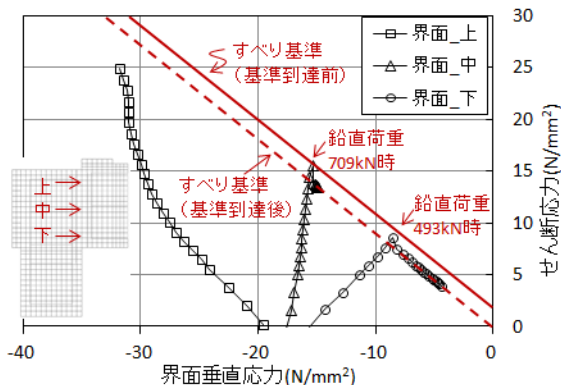


図-12 新旧界面 接合要素の応力経路図

そこで、せん断剛性をパラメータとして感度解析を実施し、検証することとした。ここでは、せん断剛性のみを 25, 35N/mm³ に変化させ、その他のパラメータは表-2 に示す値とした。その結果の荷重変位関係を図-10 に示す。図より、実験と解析の剛性が概ね一致するのは、せん断剛性 Dt が 25N/mm³ 程度であると推察された。

3.3 解析結果

前項で検討した新旧界面のせん断剛性を 25N/mm³ とした解析について、本項で実験との比較を示す。

(1) 新旧界面の挙動と終局状態

はじめに、解析における新旧界面の挙動について示す。変形図 (最終ステップ) および新旧界面の接合要素の応力経路図を、それぞれ図-11, 12 に示す。本供試体は載

荷により図-11 のように曲げ変形を生じ、図-12 のように新旧界面の上側は界面垂直応力が増加し、下側は減少する。すべりが生じるせん断強度は界面垂直応力に比例するため、上側はせん断強度が増加、下側は減少し、新旧界面の下側からすべり基準に達する (以下、要素すべり)。その後、鉛直荷重の増大とともに新旧界面上側に、順次要素すべりが伝達する挙動となっている。

次に、終局状態について考察する。実験では最大荷重時に新旧界面が全面で急激に滑動したが、解析では、解が収束しなくなるまで鉛直荷重を増加させ、収束した最後ステップを最終ステップとしている。このため、解析の終局状態を考察するため、最終ステップを確認する。

ここで、解析と実験のひび割れ図を図-13 に示す。解析のひび割れ発生位置や方向は、実験でのひび割れが左右対称に発生していないため評価が難しいが、概ね傾向は一致している。しかし、新旧界面中央付近に斜め方向に発生したひび割れは、実験では微細なひび割れであったものの、解析ではひび割れが卓越し、コンクリートが破壊している状況であった。なお、図-12 の新旧界面の上側接合要素の応力経路図を確認すると、最終ステップにおいてもすべり基準には達しておらず、新旧界面の滑動は生じていない。これらのことから、解析の終局状態は局所的なコンクリートの破壊と推察され、実験で確認された新旧界面の滑動まで追跡できておらず、解析と実験で終局状態が異なると考えられる。

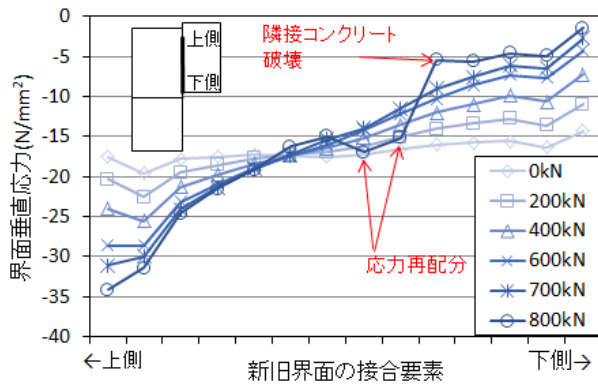


図-14 界面垂直応力の分布図

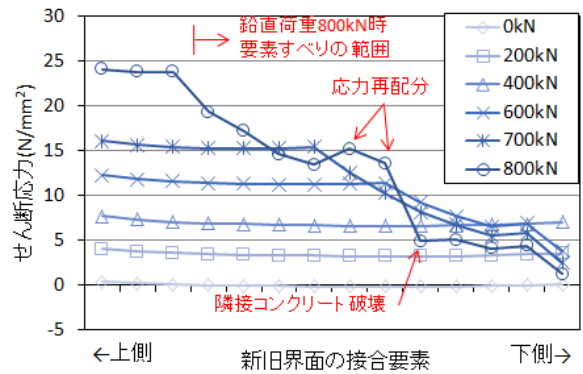


図-15 界面のせん断応力の分布図

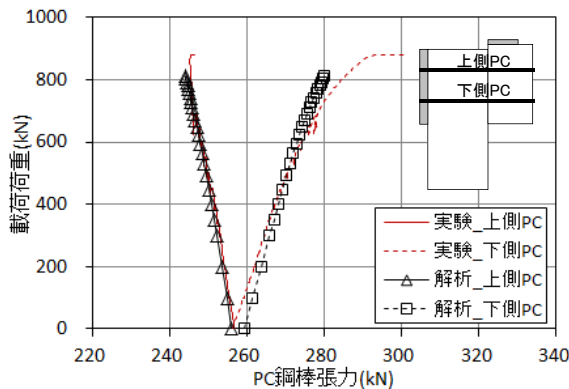


図-16 PC 鋼棒の張力

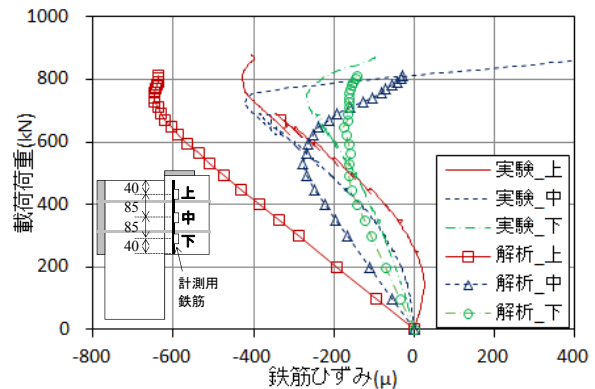


図-17 鉄筋ひずみ

(2) 最大荷重

解析が実験の終局状態である新旧界面の滑動まで追跡できていないため、解析と実験の最大荷重に大きな差異が生じる可能性がある。そこで、新旧界面の応力状態、すべり状況を確認することとした。

界面垂直応力とせん断応力の分布図を図-14, 15 に示す。なお、分布図において、新旧界面の上縁の1要素は、応力集中の影響が大きかったため図から除外している。界面垂直応力は700kNまでは曲げ作用に応じた挙動になっているが、800kN時に分布の傾向が異なっている。せん断応力の分布も同様に、700kNまでは要素すべりが生じていない領域では概ね一定のせん断力が作用し、要素すべりが生じた領域では負担するせん断力が減少して、鉛直荷重の増加に伴って要素すべりが上側に伝達している挙動となっているが、800kN時に分布の傾向が異なっている。これは、図-13 で新旧界面中央付近に隣接するコンクリートが破壊して、軟化領域に達していることが関係していると推察される。つまり、軟化したコンクリート要素に接する新旧界面の接合要素は、界面垂直応力およびせん断応力を伝達することができず大きく低下し、低下分を上側の接合要素に再配分するためと考えられる。これらを踏まえ、800kNのせん断応力分布図を確認すると、新旧界面中央の分布が乱れているものの要素のすべりが概ね上側まで到達しており、解析上の最大荷重を概ねせん断伝達耐力と評価できると考えられる。

表-3 最大荷重の一覧

実験値(kN)	解析値(kN)	解析値/実験値
880.9	810.5	0.92

ここで、解析と実験の最大荷重を表-3に示す。解析と実験の最大荷重の誤差は1割程度であり、比較的精度よく最大荷重を評価していると考えられる。

(3) PC 鋼棒張力

PC 鋼棒の張力の解析と実験の比較を図-16に示す。実験の張力はPC 鋼棒端部のロードセルにて計測したものである。なお、PC 鋼材の張力は、上側と下側のPC 鋼材に区分して示している。実験ではPC 鋼材の張力は曲げ作用により、荷重に伴って上側PC 鋼材の張力は減少し、下側は増加する挙動を示したが、図-16をみると、解析は実験を概ね精度よく表現していることが確認できる。PC 鋼棒の張力は、両端部の固定間距離によって決まるため、水平方向の変位の精度を検証する指標とも考えられる。解析では新旧界面のダイランシーを考慮していないが、実験を概ね表現できており、実験においてダイランシーの影響は小さかったものと推察できる。

(4) 鉄筋ひずみ

次に、新旧界面付近の内部応力の状態を検証するため、新旧界面から中ブロック側に20mm離して、鉛直に配置した鉄筋のひずみについて、解析と実験の結果の比較を図-17に示す。鉄筋ひずみの実験値は、荷重初期におい

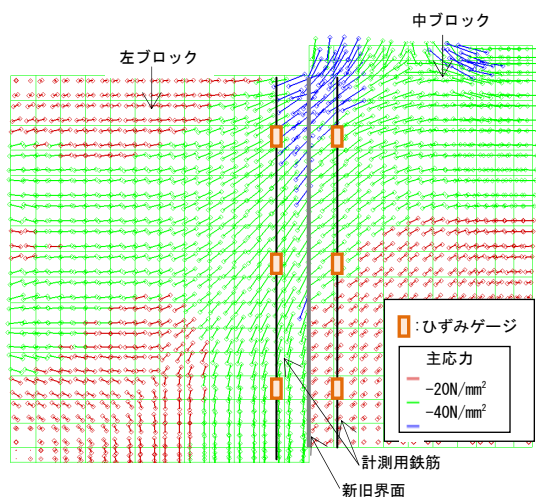


図-18 最小主応力ベクトル図（最終ステップ）

鉄筋上側のひずみが引張応力となる等、変位と同様になじみの影響を受けている。また、荷重に伴う荷重段階で圧縮応力の増加から減少に転じる点（以下、変曲点）が現れている。解析では、荷重初期のなじみの影響を表現できないことから、解析と実験で差異が生じているが、その後の傾き（荷重増分に対する鉄筋ひずみの応力増分）や変曲点は解析で表現できており、内部応力についても概ね評価できているものと考えられる。

ここで、ひずみの変曲点の発生メカニズムを解析結果から考察する。なお、実験においてひずみの変曲点は中ブロック側では確認されたものの左ブロック側では確認されていない。界面の要素すべりが生じていない段階では、図-15で示したように新旧界面のせん断力は概ね均等に作用し、新旧界面全面で応力が伝達されるが、鉛直荷重が増加していくと、曲げ作用の影響に加え、界面の要素すべりが下側から上側に伝達することで、応力は新旧界面の上側に集中するようになる。最終ステップ時の最小主応力ベクトル図を図-18に示す。図のように、応力が徐々に界面上側に集中した結果、中ブロックの中・下側では応力が伝達されにくくなり、中ブロック側に変曲点が生じるものと推察される。一方、左ブロック側は、応力が新旧界面の上側に集中しても、応力は伝達されにくくならないため、変曲点が生じないものと考えられる。

3.4 解析の妥当性

前項の解析結果と実験結果の比較から、終局状態については、解析にて実験を追跡することができなかったが、全体の挙動は概ね表現できると考えられる。このことから、本解析の新旧界面の構成則およびパラメータの仮定は、概ね妥当であったと考えられる。

4. まとめ

二面せん断実験供試体を対象に、有限要素法解析を実施し、新旧界面における高い界面垂直応力作用下のせん断伝達挙動の解析手法の検討および実験の評価を行った。

以下に、得られた知見を示す。

- (1) 新旧界面の構成則や値を適切に設定することで、高い界面垂直応力が作用する場合の新旧界面のせん断伝達挙動を概ね表現できることが分かった。
- (2) 新旧界面のせん断剛性は界面垂直応力に依存する可能性があることがわかった。感度解析の結果、界面垂直応力 20N/mm^2 の場合、せん断剛性は 25N/mm^3 程度と推察された。
- (3) 実験では新旧界面の滑動で終局したが、解析では新旧界面の滑動まで表現できなかった。しかし要素レベルのすべりが上側まで伝達していることから、解析の最大荷重をせん断伝達耐力とすると、実験と解析の最大荷重の比は 1 割程度の誤差で、比較的良好な精度であった。
- (4) 実験で確認した鉄筋ひずみの変曲点のメカニズムは、新旧界面の部分的なすべりや供試体の曲げ変形の影響により、応力の流れが新旧界面の上側へ変化することに起因するものと解析的に推察した。

謝辞

本研究において、「持続可能な鉄道コンクリート構造物に関する検討委員会」（(公社)日本材料学会）の委員各位より多数のご助言を賜りました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 湯浅康史, 藪田紘一郎, 木戸弘大, 森川英典: 主桁間隔の狭い PCI 形桁における外ケーブルの桁間定着に関する実験的検討, 第 22 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.331-316, 2013.10
- 2) 湯浅康史, 濱田 譲, 河村直彦, 森川英典: 新旧コンクリート界面のせん断伝達機構に関する実験的研究, 第 23 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.35-40, 2014.10
- 3) 喜多俊介, 三木朋広, 松尾真紀, 二羽淳一郎: 形状の異なる打継ぎ面を有する鉄筋コンクリート部材の非線形解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.24, No.2, pp709-714, 2002.6.
- 4) 西内達雄, 阪田憲次: 鉛直方向の施工ジョイント部での離接を考慮したアーチダムの常時挙動解析, 土木学会論文集 E Vol.62, No.4, pp672-688, 2006.10
- 5) 村田二郎, 長滝重義, 菊川浩治共著: 土木材料コンクリート第 3 版, 共立出版, 1983
- 6) Norbert Randl: Design recommendations for interface shear transfer in fib Model Code 2010, Structural Concrete, Vol.14, No.3, pp.230-241, Sep.2013
- 7) DIANA User's Manual (9.4), TNO DIANA BV.
- 8) 土木学会: コンクリート標準示方書(設計編), 2014.5