

令和 5 年 6 月 18 日現在

機関番号：13903

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2022

課題番号：21K14230

研究課題名（和文）PC部材の構造性能に及ぼす鋼材の付着損失機構に関するパラダイムシフト

研究課題名（英文）Paradigm Shift in Bond Loss Mechanism of Reinforcement on Structural Performance of PC Members

研究代表者

武田 健太（Takeda, Kenta）

名古屋工業大学・工学（系）研究科（研究院）・助教

研究者番号：10804958

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,000,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、曲げ破壊先行型およびせん断破壊先行型のプレストレストコンクリート部材を対象として、PC鋼材の付着損失が部材の構造性能に及ぼす影響を解析的に検討した。その結果、解析上でPC鋼材の付着応力-すべり関係を考慮することが、ひずみを含めた構造性能評価を行う際に不可欠であることを明らかとした。また、部材の破壊モードによらず、解析上四面体要素を用い、かつ一般的に高精度に評価可能とされる六面体要素使用時と同等な要素数とすれば、六面体要素使用時と同等な精度で構造性能を評価可能であることも示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、コンクリート部材における構造性能を解析的に検討する際の手法提案を目標とし、PC鋼材の付着や要素形状、コンクリートの材料モデルに主眼を置き、部材の構造性能に及ぼす影響を解析的に検討している。本研究で得られた知見および成果は、実用化されつつある解析的なコンクリート構造物の設計計算や、劣化構造物の残存性能評価を行う際のパラメータ選定に有用と考えられる。

研究成果の概要（英文）：In this study, we focused on prestressed concrete members which bending fracture and shear fracture occur. Then, the effect of the bond loss of PC strands on the structural performance of members were numerical investigated. As a result, it was found that it is necessary to consider the bond stress-slip relationship of PC strands in the analysis when evaluating structural performance including strain of PC strands. In addition, it was shown that structural performance can be evaluated with the same accuracy as when using hexahedral elements, regardless of the fracture mode of members, if tetrahedral elements are used and the number of elements is the same as when using hexahedral elements.

研究分野：コンクリート工学

キーワード：数値解析 コンクリートの応力-ひずみ関係 付着応力-すべり関係 要素形状 定着長 プレテンション部材 部材の破壊モード せん断剛性低減係数

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

高度経済成長期に建設されたプレストレストコンクリート(以下、PC)構造物において、塩害による鋼材劣化が確認されており、劣化構造物の構造的な性能評価を定量的に行う手法の開発、および合理的な維持管理が不可欠となっている。これまでに研究代表者は、劣化の生じた PC 橋を対象に、数値解析を用いた性能評価に関する研究を行ってきた。その結果、橋梁内の鋼材の腐食状況を解析上で精緻に表現すれば、PC 橋の性能評価を高精度に行えることを示した。ところが当該研究では、コンクリートと鋼材間の付着損失の影響を考慮していないことが課題である。コンクリート構造物は、コンクリートと鋼材は完全に付着している仮定の下で設計されるため、付着が損失すると、耐力低下や同荷重下における変形増大など、設計で想定されない挙動を示す可能性が高くなる。したがって、今後増加することが予想される劣化構造物の構造的な性能評価を高精度に行うためにも、コンクリートと鋼材間の付着損失が構造的な性能に及ぼす影響について、解析的な構造的な性能評価の検討を行う必要がある。

2. 研究の目的

本研究では、以下の2点を目的とした。

- ・ 曲げ破壊先行型およびせん断破壊先行型の PC 部材における、部材の耐力や破壊モードの評価に関する解析精度を向上するための手法を検討すること。
- ・ コンクリートと PC 鋼材間の付着損失の影響を、解析上で表現する手法を確立すること。

3. 研究の方法

(1) 曲げ破壊先行型の PC 部材を対象とした解析精度の検証

本研究では、汎用有限要素解析プログラム ATENA Ver.5.6.1<sup>1)</sup>を用いた。まず、曲げ破壊先行型の PC 部材(図 - 1 参照)における、解析精度を向上するための手法について検討した。その際、コンクリートを分割する要素形状、要素寸法、要素の形状関数(1次、2次)をパラメータとした。要素形状として、六面体(1辺 25mm)および四面体(1辺 53mm)を用い、双方ともに要素数は同程度とし、約 13,000 個とした。

コンクリートの圧縮側の応力 - ひずみ曲線には、プレピーク域は放物線、ポストピーク域は直線のモデルを用いた。ポストピーク域では、要素寸法の影響を低減可能な圧縮破壊エネルギーを考慮した。

PC 鋼材の応力 - ひずみ曲線として、鋼材降伏後のひずみ硬化を考慮しないバイリニアモデルを用いた。コンクリートと鋼材間の付着損失は、付着応力 - すべり関係を用いて、その影響を考慮した。PC 鋼材のプレストレスは、道路橋示方書に基づいて、定着長を鋼材径の約 65 倍<sup>2)</sup>となるように、降伏強度の 60%に相当する応力とした。

(2) せん断破壊先行型の PC 部材を対象とした解析精度の検証

(1)の検討後、図 - 2 に示すせん断破壊先行型の PC 部材を対象に、せん断破壊に対する解析精度の検証を行った。対象部材は、せん断スパン  $a$  と有効高さ  $d$  の比であるせん断スパン比  $a/d$  を 2.0、2.5、3.0 とし、部材の破壊モードとして、 $a/d=2.0, 2.5$  ではせん断圧縮破壊、 $a/d=3.0$  では斜め引張破

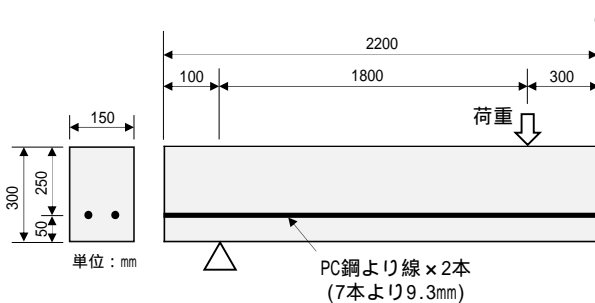


図 - 1 解析対象部材 (曲げ破壊先行型)

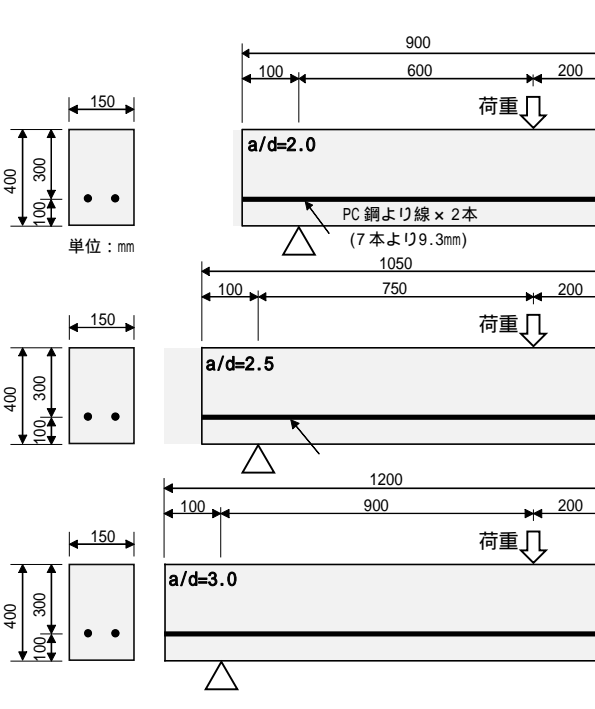


図 - 2 解析対象部材 (せん断破壊先行型)

壊を想定した。解析手法は基本的に、(1)に示すものにしたがったが、せん断剛性低減モデルを導入した。ひび割れ発生後のせん断剛性は、ひび割れ発生前のせん断剛性に低減係数を乗じ、ひずみによらず一定となるモデルを用いた。せん断剛性低減係数には、既往の研究に基づき 0.005 を採用した<sup>3)</sup>。

#### 4. 研究成果

##### (1) 曲げ破壊先行型の PC 部材を対象とした解析精度の検証

図 - 3 に、荷重 - 中央変位関係における各解析値の比較を示す。T1 (四面体 1 次要素) の解析値に着目すると、B1 (六面体 1 次要素) の解析値に比べ、ひび割れ発生荷重や降伏荷重、最大荷重、終局変位を過大評価した。これは、T1 は B1 に比べ節点数が少ないことが原因で、解析精度が低下したことが考えられる。一方、T2 (四面体 2 次要素) は、降伏荷重、最大荷重は B1 と概ね一致した。図 - 4 に、PC 鋼材降伏時の PC 鋼材ひずみ分布における各解析値の比較を示す。各解析値ともに、曲げひび割れ発生箇所でのひずみが大きくなっている。T1 と T2 は概ね同様なひずみ分布となっているが、B1 はひずみが大きくなる箇所同士の間隔が広い。これは、四面体要素と六面体要素とでは要素形状が異なり、コンクリート内の積分点と鋼材要素との距離がそれぞれ異なることが原因と考えられる。しかし、図 - 3 より、部材の耐荷性能や変形性能を検討する際、T2 と B1 は最大荷重が同程度となっていること、T2 が B1 に比べ終局変位が小さくなっていることを考慮すれば、安全側へ評価可能な四面体 2 次要素を用いて要素分割を行うことが、解析精度を向上する方法といえる。

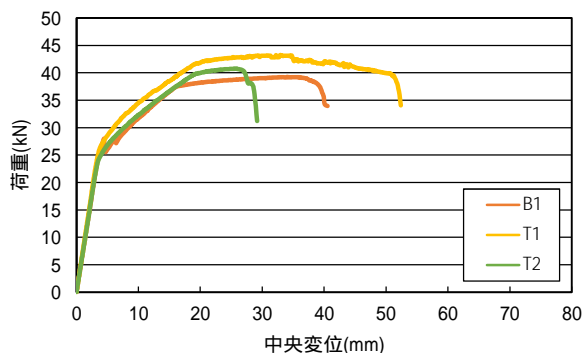


図 - 3 荷重 - 中央変位関係  
(曲げ破壊先行型)

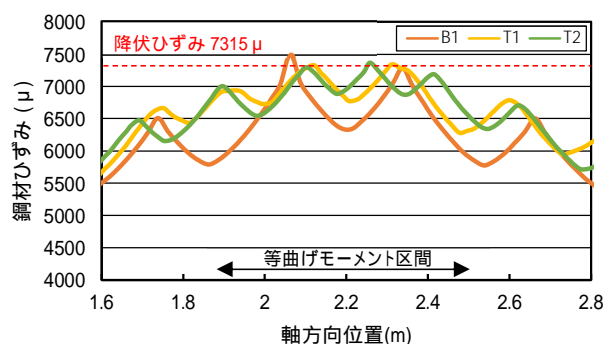


図 - 4 PC 鋼材ひずみ分布  
(PC 鋼材降伏時)

##### (2) せん断破壊先行型の PC 部材を対象とした解析精度の検証

図 - 5 に、荷重 - 中央変位関係における各解析値の比較を示す。図中の  $P_b$ 、 $P_u$ 、 $P_c$  はそれぞれ、曲げ破壊荷重、せん断圧縮破壊荷重、斜め引張破壊荷重の計算値<sup>4)</sup>である。なお、PC 部材におけるせん断圧縮破壊荷重の算定式は確立されていないため、鉄筋コンクリート (RC) 部材における算定式を用いた。 $a/d=2.0$  の B1 (六面体 1 次要素) と T2 (四面体 2 次要素) の解析値は、 $P_u$  付近で荷重が最大となっていることから、要素形状によらず、せん断圧縮破壊となっていると考えられる。 $a/d$  が増大するにしたがい、両解析値は  $P_b$  付近で荷重が最大となっている。終局変位に着目すると、T2 に比べ B1 の方が大きくなっていることから、B1 は曲げ破壊となっていることが予想される。

図 - 6 に、各解析値における最大荷重時のひび割れ図および最大主ひずみ分布を示す。図中の赤色は、大きなひずみが生じていることを示す。B1 の解析結果に着目すると、 $a/d=2.0, 2.5$  ではせん断圧縮破壊、 $a/d=3.0$  では曲げ破壊となった。一方、T2 では、 $a/d$  によらずせん断圧縮破壊となった。ここで、(2) の解析では、 $a/d=2.0, 2.5$  でせん断圧縮破壊、 $a/d=3.0$  で斜め引張破壊を想定しており、要素形状によらず  $a/d=3.0$  で想定とは異なる破壊モードとなった。四面体要素に比べ六面体要素の方が、鋼材降伏後の変形性能を大きく見積もる傾向があるため、四面体要素を用いて要素分割を行うことが、せん断破壊を表現可能といえる。T2 の  $a/d=3.0$  で斜め引張破壊ではなく、せん断圧縮破壊となった理由について考察する。PC 部材の場合、軸圧縮力が導入され、曲げひび割れ発生箇所が限定され、等曲げ区間付近に集中する。一般的には、RC 部材の場合、部材長の増大に伴い曲げひび割れは分散する傾向となるが、PC 部材においては  $a/d$  が増大しても、前述のようなせん断圧縮破壊が起こり得ると考えられる。

##### (3) 本研究で得られた知見

本研究では、曲げ破壊先行型およびせん断破壊先行型の PC 部材を対象として、部材の耐力や破壊モード等に関する解析精度の向上、コンクリートと PC 鋼材間の付着損失の影響を表現する手法を検討することを目的として、解析的検討を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。実構造物において複雑な箇所をモデル化する際に有利と考えられる四面体要素で要素分割を行い、下記に留意して解析的な評価を行えば、部材の破壊モードによらず解析精度が向上することが示唆された。

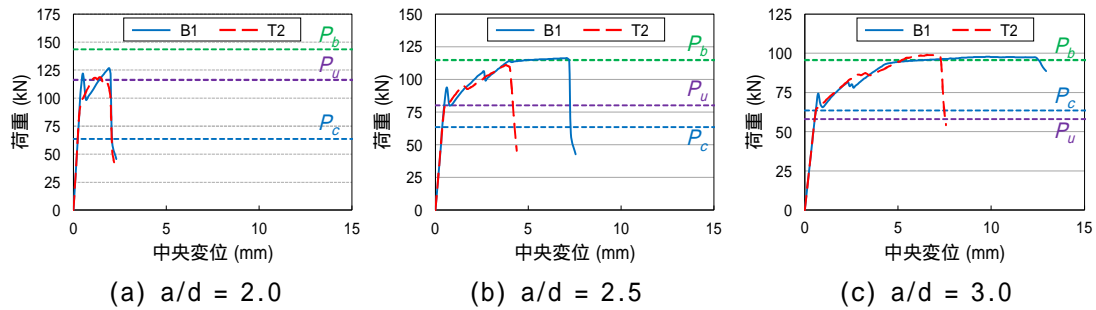


図 - 5 荷重 - 中央変位関係における各解析値の比較 (せん断破壊先行型)

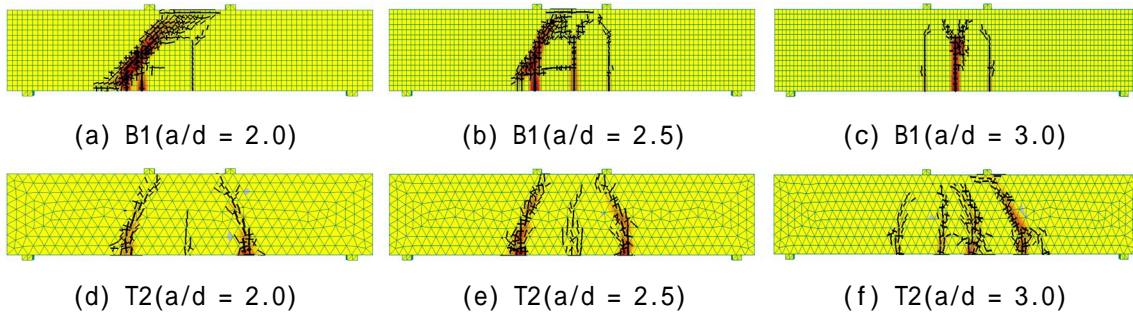


図 - 6 各解析値における最大荷重時のひび割れ図および最大主ひずみ分布

- ・四面体 2 次要素を使用し，要素数は六面体要素使用時と同程度とする．
- ・コンクリートの圧縮側の応力 - ひずみ関係には，ポストピーク域で圧縮破壊エネルギーを考慮する．
- ・コンクリートと PC 鋼材間に付着応力 - すべり関係を導入する．
- ・せん断剛性低減モデルとして，ひび割れ発生後のせん断剛性が低減後に一定となるものを用い，せん断剛性低減係数を 0.005 とする．

せん断破壊先行型の PC 部材の場合，せん断スパン比の増大に伴い，想定外の破壊モードとなる可能性があることが示された．これは，PC 部材特有のひび割れ分散性が小さいことが原因であることが示唆された．

本研究で得られた知見は，せん断破壊先行型の部材の場合は，せん断スパン比 2~3 程度の部材に限定される．部材長が大きい，あるいは有効断面が小さい場合は別途検討が必要となる．現状，曲げ破壊先行型，せん断破壊先行型それぞれの部材に対する解析手法は分離しているため，将来的には部材の破壊モードに無関係に，解析手法を一般化する検討を行っていく．さらに，せん断破壊先行型の部材を対象とした検討において，上述のように PC 部材のせん断圧縮破壊荷重の算定式が確立されていない．本解析結果で，PC 部材特有のひび割れ分散性が小さいことが明らかとなり，部材長が増大してもせん断圧縮破壊が生じる可能性が高い．そのため，PC 部材におけるせん断圧縮破壊荷重の算定式の確立に向けての検討も行う予定である．

#### 引用文献

- 1) Cervenka, V. et al.: ATENA program documentation, Cervenka Consulting, 2007
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 / III コンクリート橋・コンクリート部材編，2017
- 3) 山谷敦ら：回転ひび割れモデルによる RC 梁のせん断挙動解析，土木学会論文集，No.620，V-43，pp.187-199，1999
- 4) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書[設計編]，2018

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 井戸崇仁, 武田健太, 松原左月	4. 巻 43
2. 論文標題 付着すべりを考慮したPC梁部材の解析評価精度に与える要素寸法および要素形状の影響	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 コンクリート工学年次論文集	6. 最初と最後の頁 115-120
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 久野純怜, 武田健太
2. 発表標題 有限要素解析による鉄筋の腐食ひび割れ発生モードの再現解析
3. 学会等名 令和3年度 土木学会中部支部 研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 福田脩登, 武田健太
2. 発表標題 プレテンション式PC部材のせん断破壊における構造性能評価手法の検討
3. 学会等名 令和4年度土木学会全国大会 第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

研究室ホームページ：  
<https://nitmateriallab.wordpress.com/>

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------