

論文 ASR 劣化したプレテンション PC 桁の耐荷性能評価に関する数値解析的検討

金城 和久^{*1}・富山 潤^{*2}・金田 一男^{*3}・車谷 麻緒^{*4}

要旨: ASR 劣化したプレテンション方式の PC 構造物では, コンクリートの弾性係数およびプレストレスの低下などにより, 耐荷性能の低下が懸念される。一方で, 材料劣化したコンクリート構造物の耐荷性能評価に数値解析を適応する取り組みが行われ, その重要性が認識されてきている。しかし, ASR 劣化したプレテンション方式の PC 構造物に関する適応性の検討は十分ではない。そこで本研究では, ASR 劣化したプレテンション PC 桁の耐荷性能評価に関する既往の実験結果に対して, 非線形有限要素解析の適応性を検討し, 弾性係数およびプレストレスの低下を考慮することで, 数値解析的な耐荷性能評価が可能であることを示した。

キーワード: ASR 劣化, プレテンションプレストレスコンクリート, 耐荷性能評価, 数値解析

1. はじめに

アルカリシリカ反応 (以下, ASR と称す) により劣化したコンクリート内部は, ASR ゲルの吸水膨張により大小さまざまなひび割れが存在し, コンクリート構造物の力学的挙動に大きな影響をもたらすものと予想される。特にプレテンション方式のプレストレスコンクリート (PC) 構造物では, PC 鋼より線とコンクリートの付着によりプレストレスを導入するため, ASR によるひび割れがプレストレスロスの原因となり, 耐荷性能の低下が懸念される。文献 1) では, 実橋から切出した ASR 劣化したプレテンション PC 桁を対象に岩石学的評価に基づく ASR 診断, 材料劣化の評価および耐荷性能に関して健全試験桁と劣化試験桁との比較が行われている。その結果から, ASR 劣化したコンクリートの弾性係数は, ばらつきがあり, 圧縮強度に比較し, 低下が著しいという既往の知見²⁾と同様な結果が得られている。また, 耐荷性能については, 両試験桁ともひび割れ発生荷重はほぼ同等であるのに対して, 弾性域からの曲げ剛性の低下が確認された。

弾性域からの曲げ剛性の低下は, 先に述べたように弾性係数のばらつきおよび低下, コンクリートと PC 鋼より線の付着力の低下, プレストレス低下に原因があると考えられる。

これまでも材料劣化したコンクリート構造物の耐荷性能評価に関する研究があるが, 未だ不明確な部分が多いと考えられる。劣化したコンクリート構造物の耐荷性能を数値解析的に評価する試みも多く見られ, その重要性が認識されてきている。このような背景のなか, 土木学会コンクリート委員会「材料劣化が生じたコンクリー

ト構造物の構造性能小委員会」³⁾において材料劣化した構造物の力学性能を材料の劣化を適切にモデル化することで非線形解析により評価する手法の検証と提案を行っており, 塩害劣化を生じた RC 構造物や PC 構造物ではある程度の評価が可能となっている。しかしながら, ASR 劣化したプレテンション方式の PC 構造物に関しては, 数値解析的評価の可能性に関する提案は十分であるとは言えない。

ASR 劣化したプレテンション PC 桁の耐荷性能を数値解析により評価する際に問題となるのは, (1)材料劣化したコンクリートの弾性係数の考え方, (2)ASR 劣化に起因したコンクリート内部のひび割れに伴うコンクリートと PC 鋼より線の付着力の低下や, プレストレスの低下などを如何に考慮するかということが挙げられる。

以上より, 本研究では, 文献 1) の結果を基に, ASR 劣化したプレテンション PC 桁の耐荷性能を数値解析的に評価可能かどうかを検討することを目的に, 上記に示した 2 点について検討を行った。ここではその結果を報告する。

2. 研究対象構造物と検証結果の概要¹⁾

2.1 構造物の概要

研究対象の橋梁は, 沖縄県浦添市古島に位置している国道 330 号線上に 3 期に分けて架橋され, 2, 3 期工事に施工された主桁全面に ASR 劣化に起因した橋軸に沿ったひび割れが生じ, 耐荷性能の低下や第 3 者被害などが懸念された。このため, 下部工の耐震補強を機に供用から約 25 年経過後の平成 19 年に上部工の架け替えが行われた。なお, その時点では鋼材腐食はほとんど見られず,

*1 大分県庁 大分土木事務所 修士 (工学) (正会員)

*2 琉球大学 工学部環境建設工学科准教授 博士 (工学) (正会員)

*3 (株) ホープ設計 設計部構造部長 博士 (工学) (正会員)

*4 茨城大学 工学部都市システム工学科講師 博士 (工学) (正会員)

桁全面に生じたひび割れは ASR によるものであった。

文献 1) では、1 期施工、3 期施工箇所からそれぞれ健全試験桁、劣化試験桁を切出し、両試験桁の耐荷性能に関して比較検討を行っている。

2.2 ASR 劣化の主要因

ASR 劣化の主要因は、岩石学的評価に基づく ASR 診断の結果、細骨材に含有する安山岩によるものであった。また、粗骨材に遅延膨張性を示す隠微晶質石英や微晶質石英が確認され、今後も膨張する可能性が示唆された。

2.3 圧縮強度および弾性係数

表-1 に試験桁から採取したコンクリートコアの圧縮強度および弾性係数を示す¹⁾。健全試験桁のコンクリートの圧縮強度は設計基準強度を満足しているが、劣化試験桁の圧縮強度は健全試験桁に比べ 25% 程度低下しており、設計基準強度の約 9 割である。弾性係数に関しては、劣化試験桁はばらつきが大きく、著しく低下している。

表-1 圧縮強度および弾性係数

試験桁	圧縮強度(MPa)	静弾性係数(GPa)
劣化試験桁	44.3	8.3~21.5(平均:15.2)
健全試験桁	60.9	37.7
設計基準強度	49.3	

2.4 曲げ破壊試験概要

曲げ破壊試験は、JIS A 5363 に準拠して行われている。その荷重状況を図-1 に示す。実橋から切出した両試験桁の桁長は $L=13.2\text{m}$ であることから、スパン長 $l=12.4\text{m}$ とされた。図-2 に試験桁断面図を示す。曲げ破壊試験の結果、桁中央の上下面の軸方向ひずみ(圧縮, 引張)は、健全および劣化の両試験桁に有意な差は見られなかったが、図-3 に示す荷重-たわみ曲線からは、初期の曲げ剛性の低下およびひび割れ後の非線形領域で有意な差が確認された。

劣化試験桁で曲げ剛性が低下した理由として、ASR 劣化によるコンクリートの材料強度および弾性係数の低下や ASR 劣化に起因するひび割れによるプレストレスの低下が生じていたと考えられる。また、荷重時には、ASR によって発生したひび割れによるコンクリートと PC 鋼より線の付着力低下に伴うすべり現象が健全試験桁よりも顕著に表れた可能性も考えられる。

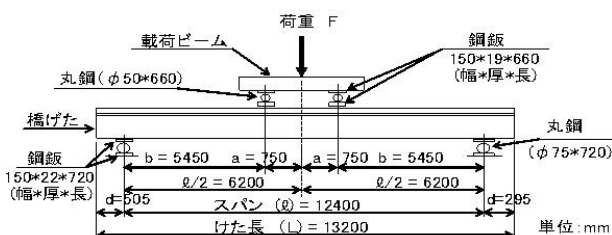


図-1 曲げ破壊試験の概要図

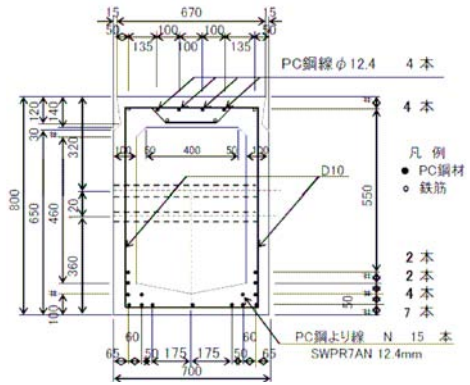


図-2 試験桁の断面詳細 (単位:mm)

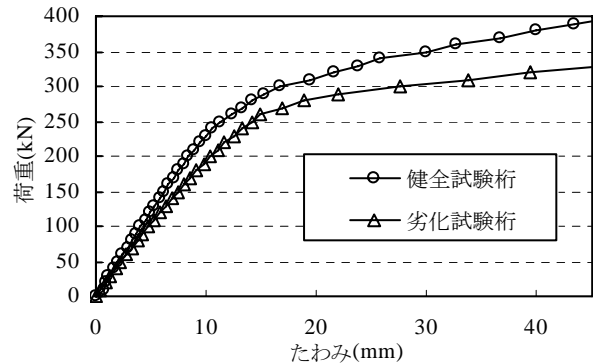


図-3 荷重-たわみ曲線 (中央)

3. 均質化法による弾性係数低下の検討

ASR 劣化したコンクリート構造物の非線形有限要素解析を行うためには、ひび割れを考慮したコンクリートの弾性係数が必要となる。一方で、ASR 劣化したコンクリートの材料特性を構造物から採取したコンクリートコアから求める際、採取する位置や方向によって値が異なることが知られている²⁾。そこで本研究では、ASR 劣化したコンクリートの弾性係数として、マルチスケール解析で知られている均質化法⁴⁾を用いてひび割れを考慮した均質化弾性係数の検討を行った。均質化法では、非均質な領域(ユニットセル)から、それぞれの異種材料の材料特性と方向を考慮した均質な弾性係数を数学的に求めることができる。

本研究では、劣化の指標としてひび割れ密度を考慮し、数ケースのひび割れ密度を有する均質化弾性係数を求め、均質化弾性係数の低下とひび割れ密度との関係を検討する。検討する際の仮定として、応力状態は平面ひずみ状態を仮定し、図-4 に示すユニットセル(50×50 分割)は健全部とひび割れ考慮部の二相材料とした。ひび割れ考慮部の弾性係数は、図-5 に示すユニットセル(100×100 分割)を用いてあらかじめ均質化弾性係数を求めている。これは、文献 1) の調査結果より、ひび割れ密度をカウントした領域にひび割れ幅 0.2mm のひび割れが最も多かったためである。すなわち 2 段階で均質化弾性係数を求めることになる。一方、健全部の弾性係数は、

表一に示す健全試験桁から採取したコンクリートコアの弾性係数値を用いる。

比較したひび割れ密度は、 0m^2 、 1m^2 、 3m^2 、 6m^2 、 9m^2 、 12m^2 の6ケースとした。なお、ひび割れパターンや要素分割密度は予備解析を行い、図-4（赤：健全部、黒：ひび割れ考慮部）のように決定した。

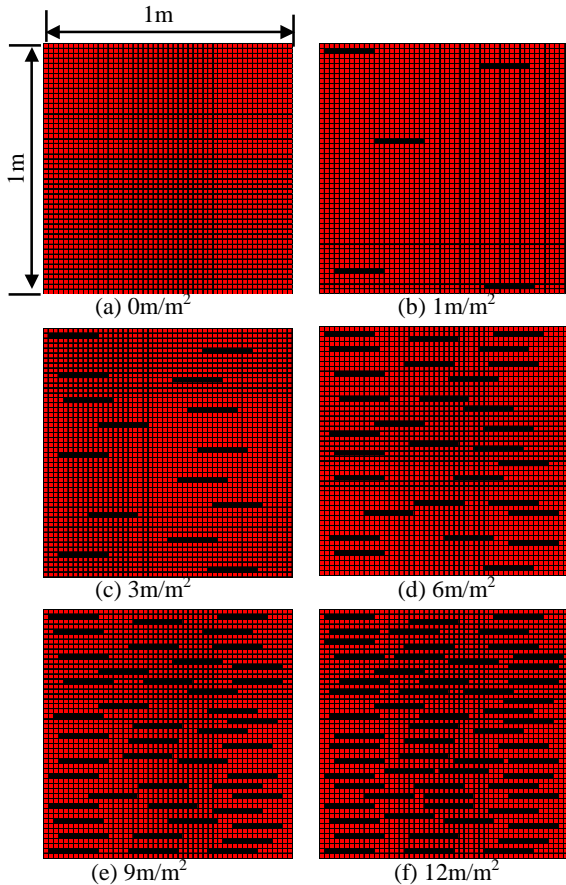


図-4 解析に用いたユニットセル
(50×50 ; 1セル 0.02m)

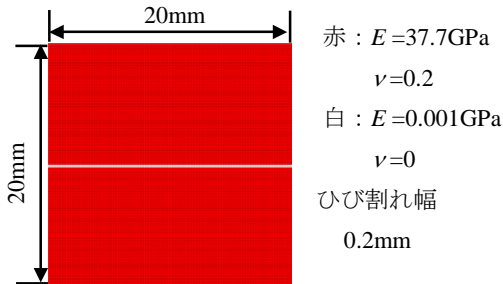


図-5 ひび割れ考慮部の均質化弾性係数を求めるために用いたユニットセル (100×100 ; 1セル 0.2mm)

図-6に、求めた均質化弾性係数とひび割れ密度の関係を示す。なお、縦軸は、求めた均質化弾性係数を健全なコンクリートの弾性係数で除し、ひび割れ密度の増加による弾性係数の低減率 n として表現している。この弾性係数の低減率は、軸方向のひび割れに対する軸方向の弾性係数の低減率である。本解析ではひび割れと直交方

向の弾性係数に対しても軸方向と同じ低減率を用いている。しかし、現実には軸直角方向の弾性係数の低減率は軸方向の低減率より大きく、曲げ破壊試験時の曲げひび割れ発生前においても異方性を考慮した解析が必要であるが、これは今後の研究課題である。

以降に示すASR劣化したプレテンションPC桁の曲げ破壊試験の非線形解析には、健全試験桁の弾性係数に文献1)で示されたひび割れ密度 9.9m^2 に対する低減率 $n = 0.74$ を乗じた値を用いることとする。しかし、ひび割れ密度は、目視で観察する事が多く客観性が問題となるため、観察方法について検討が必要である。

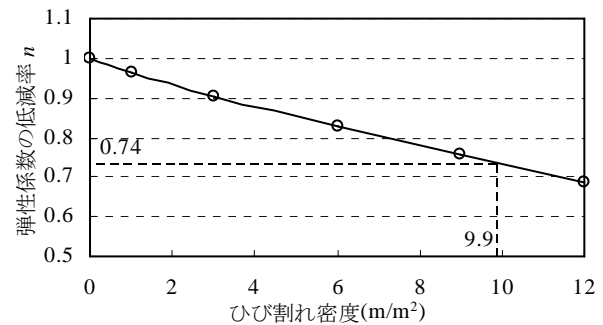


図-6 均質化弾性係数の低減率

4. 非線形有限要素解析手法

本研究では、構造解析ソフト midas-FEA⁵⁾ を用いて非線形有限要素解析を行った。なお、非線形解析の収束計算はニュートンラプソン法を用いた。以下に本解析で使用した材料の構成モデル及び本解析手法の詳細を示す。

4.1 構成モデル

(1) 圧縮モデル

コンクリートの圧縮特性には図-7に示される放物線モデルを使用した⁵⁾。ここで、 f_c はコンクリートの圧縮強度 $[\text{N}/\text{mm}^2]$ 、 G_{fc} はコンクリートの圧縮破壊エネルギー $[\text{N}/\text{mm}]$ 、 h は要素の等価長さ $[\text{mm}]$ である。

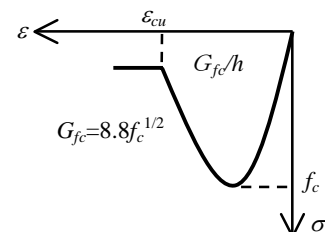


図-7 圧縮応力下のコンクリートの応力-ひずみ関係

(2) 引張軟化モデル

引張軟化モデルは、図-8に示される Hordijk モデル⁵⁾を使用した。ここで、 f_t はコンクリートの引張強度 $[\text{N}/\text{mm}^2]$ 、 G_{ft} はコンクリートの引張破壊エネルギー $[\text{N}/\text{mm}]$ 、 d_{max} は粗骨材の最大寸法 $[\text{mm}]$ である。 h は圧縮領域の構成モデルと同様に要素の等価長さ $[\text{mm}]$ である。

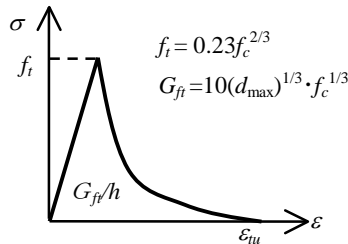


図-8 引張応力下のコンクリートの応力-ひずみ関係

(3) 鋼材の弾塑性モデル

PC 鋼材の構成モデルには図-9 に示されるモデル化された応力-ひずみ関係を使用した⁶⁾。ここで、 f_{ud} は使用する PC 鋼材の引張強度[N/mm²]である。また、鉄筋の構成モデルは、完全弾塑性モデルを採用した⁶⁾。

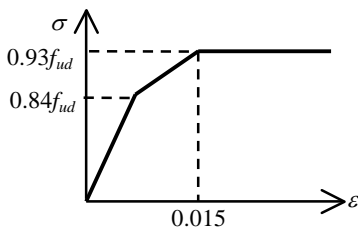


図-9 PC 鋼材の応力-ひずみ関係

(4) PC 鋼より線とコンクリートの付着モデル

プレテンション方式の PC 構造物では、コンクリートと PC 鋼より線の付着によりプレストレスを導入するため、ASR によるひび割れが原因でそれらの付着力が低下し、プレストレスがロスすることが予想される。従って、数値解析によりプレテンション PC 部材の耐荷性能評価を行う際には、それらの付着力の低下を考慮する必要があると考えられる。しかし、プレテンション PC 部材における付着応力-すべりモデルの検証は少ないのが現状である。本研究では、文献 7) を参考に、図-10 に示す簡略化した 2 直線モデルを仮定した付着応力-すべりモデルを用いた。なお、付着応力とすべりの閾値(付着応力 1.0 N/mm²、すべり 0.025mm)は、付着応力とすべりをパラメータとした予備解析の結果を基に決定した。

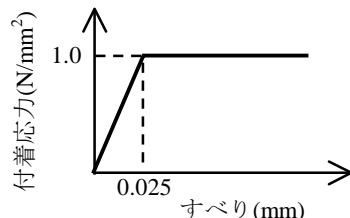


図-10 付着応力-すべりモデル

4.2 均質化法による ASR 劣化したコンクリートの弾性係数評価

ASR 劣化したコンクリート構造物の耐荷性能を解析的に評価するためには、ASR 劣化によるひび割れを考慮

したコンクリートの弾性係数が必要となる。文献 8) では、ASR 劣化したコンクリートの弾性係数として、圧縮強度から推測する方法を示し良好な結果を得た。しかし、この方法には根拠がないため、ここでは、ASR 劣化したコンクリートの弾性係数を求める一つの方法として、第 3 章に示した均質化法を利用した方法を提案する。

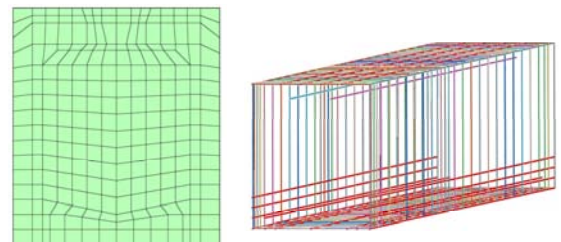
図-6 から、ひび割れ密度 9.9m²に対する弾性係数の低減率は 0.74 であるため、劣化試験桁のコンクリートの弾性係数は、健全試験桁の弾性係数に 0.74 を乗じた 27.9GPa を用いた。なお、この値は、圧縮強度から推測する方法より若干低い値となっている。

5. 解析モデルおよび曲げ破壊試験の解析結果

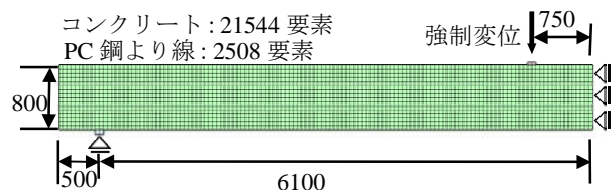
ここでは、解析モデル、解析条件及び解析結果を示す。

5.1 解析モデルおよび解析条件

解析モデル及び解析条件を図-11 に示す。解析領域は、対称性を利用し PC 桁の 1/2 をモデル化した。コンクリート部は、8 節点アイソパラメトリック要素、PC 鋼より線にはトラス要素、鉄筋はすべりを考慮しないため、埋め込み型鉄筋要素を採用した。コンクリートのひび割れについては、分散ひび割れモデルの回転ひび割れモデルを使用している。また、コンクリートと PC 鋼材の付着応力と付着すべりの影響を考慮するため、インターフェイス要素⁵⁾を導入した。曲げ破壊試験時の有効プレストレスは、道路橋示方書⁹⁾に準拠して計算した値を用いた。その際、材料特性は設計値を用いて計算を行った。また、長期供用のプレストレスロスを考慮するため、クリープ係数および乾燥収縮度は終局値を用いている。コンクリートの圧縮強度は、実験から得られた値を用いており、コンクリートの引張強度はコンクリートの圧縮強度から推定した値を用いている。載荷方法は強制変位を与え、各ステップ当たり 0.5mm とした。



(a) コンクリート (断面図) (b) 鉄筋および PC 鋼より線



(c) 境界条件および荷重条件 (側面図, 単位: mm)

図-11 解析モデルおよび解析条件

5.2 解析結果

図-12に、非線形有限要素解析で得られた荷重-たわみ曲線を示す。図中の解析結果は、図-10の付着応力-すべりモデルを導入していない場合の結果である。また、図中の劣化試験桁(解析1)の解析結果には、文献1)のコンクリートコアの材料試験で得られた平均値である15.2GPaを弾性係数として用いた。劣化試験桁(解析2)は、弾性係数を4.2節で述べた均質化法を用いて求めた27.9GPaを用いた解析結果である。図-12より健全試験桁の解析結果は、実験結果とほぼ一致している。また、表-2に示すひび割れ発生荷重においても実験と解析の結果が同程度である。よって健全試験桁では、コンクリートコアの材料試験で得られた物性値を数値解析に必要な材料特性として用いることで実験を再現でき、耐荷性能を数値解析的に評価可能であると言える。

次に劣化試験桁(解析1)は、線形および非線形領域ともに実験値と異なっている。よって、コンクリートコアの材料試験から得られる弾性係数を用いると、実験結果を再現できない可能性が示された。これは、ASR劣化したコンクリート構造物から採取したコンクリートコアは、採取位置や方向で値にばらつきがあり、値も低かったことが原因である。一方で劣化試験桁(解析2)では、実験値と線形領域で一致している。しかし、非線形領域では実験値に比べ同一たわみ時の荷重が高めの値を示している。これは、コンクリートのASR劣化に起因したひび割れによるプレストレスの低下及び載荷時のコンクリートとPC鋼より線の付着力の低下に伴うすべりが考慮されていない事が原因だと考えられる。そこで本研究では、まずプレストレスの低下を考慮した解析を行った。

図-13にプレストレスの低下を考慮した解析から得られた結果を示す。図-13に示す劣化試験桁(プレストレス90%)および劣化試験桁(プレストレス80%)の両ケースは、道路橋示方書に準拠して計算された有効プレストレスの90%および80%のプレストレス量を用いて解析を行った結果である。図-13より劣化試験桁(プレストレス90%)では、実験結果と良く一致しており、また、表-2のひび割れ発生荷重においても実験と解析の結果が同程度である。従って、劣化試験桁はASR劣化により供用時に10%程度プレストレスが低下していた可能性がある。一方で、劣化試験桁の解析では弾性係数も低減させているため、弾性係数を低減させていない健全試験桁より、プレストレス導入によるひずみが大きく導入されている可能性がある。しかし、ASRに起因したひび割れによるプレストレスのロスの影響がより大きいと考え、本解析結果ではその可能性を示している。

ASR劣化したプレテンションPC桁では、コンクリートとPC鋼より線の付着力低下も懸念されるため、図-

10に示す付着応力-すべり関係を用いたプレストレス100%とした場合の劣化試験桁の解析も行った。図-14に示す劣化試験桁(すべりあり)の結果より、すべりを考慮しない場合とほぼ同じ結果を得た。なお、荷重の最終ステップ時のPC鋼材の最大すべり量は0.3mmに達していた。これより、曲げ試験時には、付着力低下に伴うPC鋼より線のすべりよりも、供用時に生じたプレストレスの低下の影響が大きいことがわかる。しかし、この結果は本研究で用いた付着応力-すべりモデルの場合の結論であることから、今後詳細な検討が必要である。

図-15に実験および非線形有限要素解析で得られた健全試験桁と劣化試験桁の荷重-ひずみ曲線を示す。図-15の劣化試験桁の解析結果は、プレストレス90%での結果である。図-15より健全試験桁および劣化試験桁の解析結果は実験結果とほぼ一致しており、この結果からも本数値解析で実験結果を再現できていることがわかる。

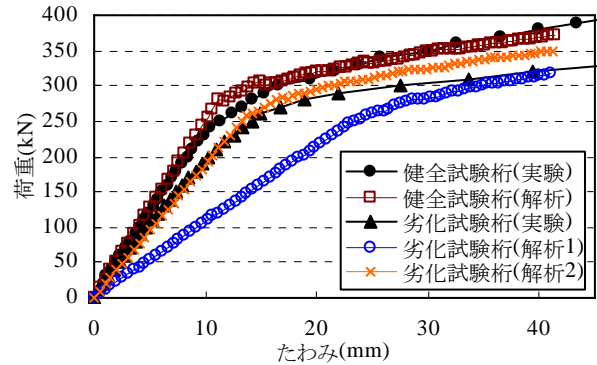


図-12 荷重-たわみ曲線 (中央)

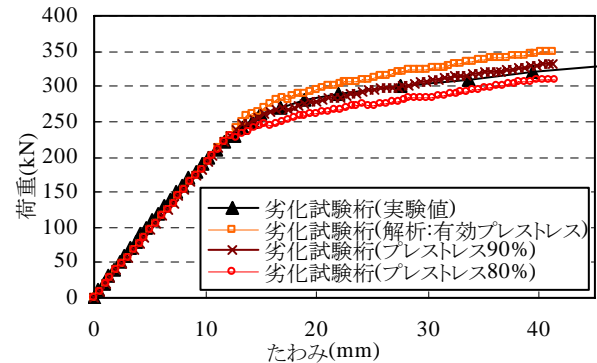


図-13 劣化試験桁での荷重-たわみ曲線

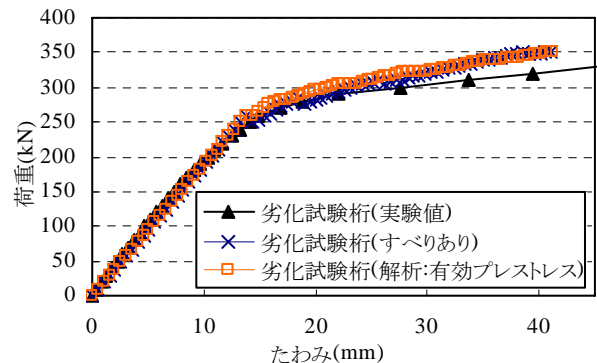
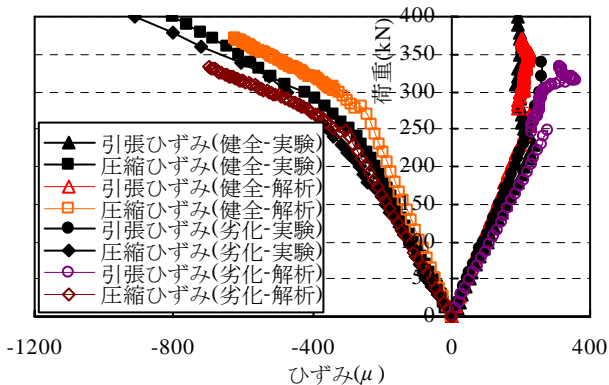


図-14 すべりを考慮した荷重-たわみ曲線

表一 2 ひび割れ発生荷重

		ひび割れ発生荷重(kN)
健全試験桁	実験(目視)	250
	解析(有効プレストレス)	256
劣化試験桁	実験(目視)	240
	解析(有効プレストレス)	240
	解析(プレストレス 90%)	221
	解析(プレストレス 80%)	202
道路橋示方書に準拠した計算		173



図一 15 荷重－ひずみ曲線 (中央)

5.3 考察

ASR 劣化したプレテンション PC 桁の耐荷性能評価を数値解析的に行う際、コンクリートコアの材料試験から得られる弾性係数を用いて解析を行うと実験結果を再現できないため、弾性係数に関して何らかの処置・工夫が必要である。本研究では ASR 劣化した弾性係数の低下を均質化法を用いて求め、線形領域では実験結果を再現することができた。しかし、非線形領域では実験値より同一たわみ時の荷重が高めの値を示したため、ASR 劣化に起因したひび割れによるプレストレス低下も併せて考慮する必要があった。

以上より、ASR 劣化したプレテンション PC 桁の耐荷性能評価を数値解析的に行う場合、弾性係数及びプレストレスの低下を適切に考慮することで、耐荷性能を数値解析により評価可能であると考えられる。しかし、ASR 劣化した既存の構造物に関しては、点検等から得られる情報は限られており、解析の入力データとしては、高精度な非破壊試験等を利用する必要があると考えられる。

6. まとめ

ASR 劣化したプレテンション PC 桁の耐荷性能評価を数値解析により実現可能かどうかを検討することを目的に、文献 1) の実験結果を基に数値解析的に検討を行った。本論文で得られた知見を以下に示す。

(1) ASR 劣化の生じていない健全試験桁では、コンクリートコアの材料試験から得られる物性値を用いるこ

とで、耐荷性能を数値解析的に評価可能である。

- (2) ASR 劣化の生じている劣化試験桁の耐荷性能評価を数値解析的に行う際、コンクリートコアの材料試験から得られる弾性係数を用いると、実現象とは異なる解析結果になる可能性がある。
- (3) ASR 劣化したプレテンション PC 桁の弾性係数を、均質化弾性係数とひび割れ密度の関係から求めること、また、ASR 劣化に起因したひび割れによるプレストレスの低下を考慮することにより、数値解析により劣化試験桁の曲げ破壊試験をほぼ再現でき、耐荷性能を数値解析により評価可能である。
- (4) 本論文で対象とした ASR 劣化試験桁では、プレストレスが設計の有効プレストレスから 10%程度低下している可能性がある。
- (5) 本研究で用いたコンクリートと PC 鋼より線の付着応力すべりモデルでは、載荷時のすべりの影響はほとんどないと言える。しかし、今後詳細な検証が必要である。

謝辞：本研究の一部は、琉球大学島嶼防災研究センターにご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) 富山潤, 山田一夫, 金田一男, 伊良波繁雄, 大城武：ASR 劣化したプレテンション PC 桁の岩石学的検討に基づく ASR 診断および耐荷性能の評価, 土木学会論文集, Vol.67, No.4, pp.578-595, 2011
- 2) 田附伸一, 津吉毅, 石橋忠良, 松田芳範, 今井勉：ASR により損傷した RC 部材の耐荷力に関する実験的研究, 土木学会論文集, Vol.63, No.1, pp.166-177, 2007.3
- 3) 土木学会：材料劣化が生じたコンクリート構造物の性能評価, コンクリート技術シリーズ, No.71, 2005.
- 4) 寺田賢二郎, 菊池昇：均質化法入門, 丸善株式会社, 2005.5
- 5) midas-FEA Analysis Manual (理論マニュアル)
- 6) 土木学会：2007年制定 コンクリート標準示方書[設計編], 丸善(株), pp.60-61, 2007.3
- 7) 大石哲哉ほか：プレテンション方式 PCaPC 大梁の適用拡大その 1 要素実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.921-922, 2008.9
- 8) 金城和久, 富山潤, 山田将人, 金田一男：ASR 劣化したプレテンション PC 桁の耐荷性能に関する数値解析的研究, 第 66 回年次学術講演会公演概要集, pp.1105-1106, 2011.9
- 9) (社)日本道路協会：道路示方書 (I 共通編・III コンクリート橋編)・同解説, 2002.3