

論文 ASR を生じた PC はりの膨張挙動と損傷後の構造性能の評価

上田 尚史*1・中村 光*2・国枝 稔*3

要旨: アルカリシリカ反応 (ASR) を生じたプレストレストコンクリート (PC) 部材の構造性能の評価を目的として、プレストレスによるクリープの影響を考慮した ASR 膨張モデルと、ASR によりコンクリートに生じる損傷の異方性を考慮した統合解析手法を開発し、PC はりの ASR 膨張挙動と ASR 損傷後の構造性能の評価の解析的な検討を試みた。その結果、提案した手法を用いることで、ASR 損傷を生じた PC はりの挙動を概ね妥当に評価可能となることを示した。

キーワード: アルカリシリカ反応, ASR 膨張モデル, 構造性能評価, PC はり, クリープ

1. はじめに

近年、高架橋やタンク等の PC 構造物において ASR 劣化した事例が複数確認されており、その安全性について広く検討されている¹⁾²⁾。とりわけ、PC はりを対象として、ASR 膨張挙動の評価や ASR 損傷後の耐荷力を確認する実験が精力的に行われている。しかし、現在までに PC 部材の ASR 膨張挙動や損傷後の構造性能を定量的に評価した事例はほとんど無いのが現状である。

PC 部材の ASR 膨張挙動については、プレストレスによる拘束の影響が大きい領域では膨張がほとんど生じないといった事例が数多く報告されているが、その理由は必ずしも明確になっておらず、拘束の影響や自由膨張量の違い、プレストレスによるクリープ変形の影響など様々な要因が複合していることが考えられる。

また、ASR により膨張を生じたコンクリートは、強度や弾性係数が低下するが、ASR を生じた RC や PC 部材はコンクリートに生じるケミカルプレストレス等の影響により、耐荷力や変形性能は大きく低下しないことが既往の実験において報告されている³⁾⁴⁾。しかし、これらの知見を実構造物に直接反映するためには更なる検討が必要であると思われる。とりわけ、ASR 損傷が RC ならび PC 構造物の構造性能に及ぼす影響を定量的に評価していくためには解析的な検討が有効である。

そこで本研究では、ASR を生じた PC 部材の膨張挙動と構造性能の解析的評価を目的として、著者らがこれまでに開発した ASR 損傷した RC 部材の構造性能評価解析手法を PC 部材へ拡張し、PC はりの ASR 膨張挙動と膨張後の構造性能の評価を試みた。

2. 解析概要

2.1 ASR 膨張解析における構成モデル

(1) ASR 膨張モデル概要⁵⁾

ASR 膨張を生じたコンクリートは、膨張に伴うひび割れの発生とともに、強度特性や剛性が低下する等の損傷を受けることが確認されている。著者らは、膨張ひずみの増加に伴い損傷が蓄積されると仮定し、次式に示す損傷理論に基づいた割線剛性型の構成式による鉄筋拘束下の膨張予測モデルを提案している。

$$\sigma(t) = (1 - \Omega) E_{c0} \cdot (\varepsilon_c(t) - \varepsilon_0(t)) \quad (1)$$

ここで、 $\sigma(t)$ 、 $\varepsilon_0(t)$ 、 $\varepsilon_c(t)$ は、それぞれコンクリートに生じる応力、ASR による自由膨張ひずみ、拘束下の膨張ひずみであり、時間 t の関数である。 E_{c0} はコンクリートの初期剛性である。また、 Ω は損傷を表わすパラメータであり、無損傷の状態を 0 とし、損傷が蓄積されるとともに 1 へと漸近する単調増加関数である。損傷パラメータ Ω は膨張ひずみ $\varepsilon_c(t)$ の関数とし、次式のようにモデル化される。

$$\Omega = 1 - \left(\frac{1}{1 + \alpha \sqrt{\varepsilon_c(t) - \varepsilon_{cr}}} \right) \varepsilon_c(t) > \varepsilon_{cr} \quad (2)$$

ここで、 ε_{cr} はひび割れ発生ひずみである。また、式中の α は損傷が蓄積する度合いを決定するパラメータであり、本研究では $\alpha = 1000$ とした。

本モデルの特徴は、膨張による損傷を直交異方性材料に適用することで、拘束力と方向性を考慮して拘束の影響を評価できることである。ただし、本モデルはクリープ等の時間依存性の変形も含んだマクロな膨張モデルであり、損傷パラメータ Ω は実際の損傷を直接表現するものではない。また、ひび割れそのものの挙動も考慮していない。本モデルを用いた RC 部材の ASR 膨張予測の詳細については、参考文献 5 を参照されたい。

(2) クリープ変形を考慮した ASR 膨張モデル

PC 部材のように、ASR 膨張が生じる以前にコンクリ

*1 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻助教 修 (工) (正会員)

*2 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻教授 博 (工) (正会員)

*3 名古屋大学大学院 工学研究科社会基盤工学専攻准教授 博 (工) (正会員)

ートに能動的な応力が作用する際には、その作用応力に対する時間依存変形であるクリープを考慮する必要がある。前述したように、本研究で用いる ASR 膨張モデルは ASR 膨張時の受動的な応力によるクリープ等の時間依存性変形挙動を含んだものである。そこで、クリープひずみの重ね合わせの原理から、ASR 膨張が生じる以前に作用した能動的な応力に起因するクリープひずみと受動的な応力によるクリープひずみは独立に考慮することができるかと仮定すれば、式(1)ならびに式(2)は以下のように修正される。

$$\sigma(t) = (1 - \Omega) E_{c0} \cdot (\varepsilon_c(t) - \varepsilon_0(t) - \varepsilon_{creep}(t)) \quad (3)$$

$$\Omega = 1 - \left(\frac{1}{1 + \alpha \sqrt{\varepsilon_c(t) - \varepsilon_{cr} - \varepsilon_{creep}(t)}} \right) \quad \varepsilon_c(t) > \varepsilon_{cr} + \varepsilon_{creep}(t) \quad (4)$$

ここで、 $\varepsilon_{creep}(t)$ は能動的に作用した応力により生じるクリープひずみである。

2.2 荷重作用解析におけるコンクリートの構成モデル⁶⁾

荷重作用解析におけるコンクリートの構成モデルには、格子等価連続体モデルを適用した。格子等価連続体モデルは、コンクリートおよび補強筋の耐荷機構と、ひび割れ面におけるせん断伝達を等価な格子成分によりモデル化し、各格子成分に一軸の応力-ひずみ関係を用いることで構築される構成モデルである。

圧縮を受けるコンクリートの応力-ひずみ関係は、圧縮強度までは Saenz の式を用い、その後は応力が直線的に減少するものとした。なお軟化域には、Nakamura らが提案する圧縮破壊エネルギーを考慮することで、解の要素寸法依存性の低減を図った。また、ひび割れたコンクリートの応力-ひずみ関係は、引張破壊エネルギーを考慮した 1/4 モデルを仮定した。

2.3 鉄筋および PC 鋼棒（鋼材）のモデル化

鋼材は、ASR 膨張解析ならびに荷重作用解析ともに同一のモデルを用いた。鋼材は、鉄筋および PC 鋼棒ともにトラス要素により離散的にモデル化し、鉄筋にはバイリニア型の応力-ひずみ関係を、PC 鋼棒にはトリリニア型の応力-ひずみ関係を適用した。また、付着応力-すべり関係を適用した付着要素を考慮することで、コンクリートとの付着挙動をモデル化した⁷⁾。なお、鉄筋および PC 鋼棒の定着部は、該当箇所の付着強度を増加させることで、すべりが生じないようにモデル化した。

2.4 ASR 膨張による初期ひずみ・初期応力状態を考慮した荷重作用解析手法

(1) ASR 膨張解析と荷重作用解析の統合⁸⁾

式(3)が表すように、ASR 膨張解析において拘束下のコ

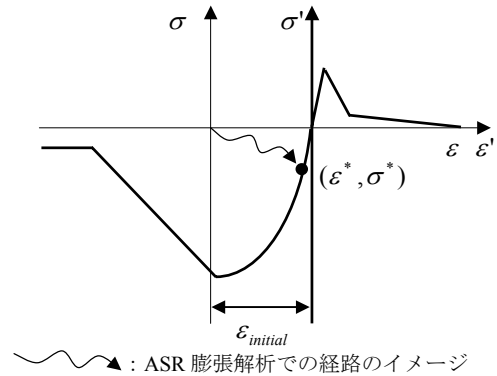


図-1 ASR 膨張解析と荷重作用解析の統合時に設ける応力-ひずみ関係の仮定

ンクリートは、引張ひずみ ε_c を生じながら自由膨張ひずみ ε_0 ならびにクリープひずみ ε_{creep} とのひずみ差により圧縮応力が生じる。ASR 膨張解析と荷重作用解析を統合するにあたり、図-1に示すように σ - ε 座標系での ASR 膨張解析の結果から得られたひずみ、応力 $(\varepsilon^*, \sigma^*)$ が、新たな座標系 σ' - ε' を設けることで、荷重作用解析で用いる応力-ひずみ関係上にあるものと仮定した。すなわち、荷重作用解析開始時には、コンクリートはひずみ ε^* と応力 σ^* が生じた状態であるとし、初期ひずみ・初期応力問題として取り扱うことで、ASR 膨張解析と荷重作用解析を統合する。なお、鉄筋および PC 鋼棒については、ASR 膨張解析と荷重作用解析で同一のモデルを用いているため、特別な仮定を設ける必要はない。

(2) ASR 損傷コンクリートのモデル化⁹⁾

上述したように ASR 膨張の影響は、荷重作用解析で初期ひずみ・初期応力問題とすることで考慮できる。さらに ASR の影響としては、膨張による損傷の蓄積が挙げられる。そこで、ASR 膨張により生じるコンクリートの損傷は、材料特性の低下と初期ひび割れを考慮することでモデル化した。既往の実験より、ASR を生じた PC 部材中のコンクリートの材料特性は、膨張が拘束された方向ではそれほど低下しないのに対して、膨張が卓越する方向では大きく低下することが認められている¹⁰⁾。本研究では、各 Gauss 点における主ひずみの大きさに従って材料特性を低下させることで ASR 損傷の方向性を考慮した。材料特性の低下は、弾性係数、圧縮強度、引張強度を対象として行なった。なお、圧縮側の応力-ひずみ関係の整合性をとるために、圧縮強度時のひずみについても膨張量に従って変化させた。

初期ひび割れは、ASR 膨張解析から得られた応力状態の主方向にひび割れ座標系を固定することで考慮した。ひび割れたコンクリートの構成則の特徴としては、ひび割れ面平行方向の圧縮強度が低下することと、ひび割れ面のせん断伝達応力が、ひび割れ幅に従い低下する点である。ひび割れ面平行方向の圧縮強度の低下については、

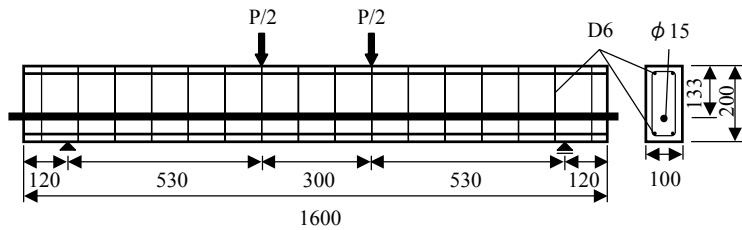


図-2 PC はりの概要図

式(5)に示す Collins らのモデル¹¹⁾により自動的に考慮される。

$$\frac{f_{c2max}}{f'_c} = \frac{1}{0.8 - 0.34 \varepsilon_1 / \varepsilon'_c} \leq 1.0 \quad (5)$$

ここで、 f_{c2max} 、 f'_c および ε'_c はそれぞれひび割れ面平行方向の最大圧縮応力、一軸圧縮強度および一軸圧縮強度時のひずみであり、 ε_1 はひび割れ面直交方向のひずみである。

一方、ASR 膨張により生じたひび割れ面のせん断伝達特性の低下は、ASR 膨張解析終了時における最大主ひずみの方向に対して垂直な方向にひび割れが生じているものと仮定し、ひび割れ面直交方向の膨張ひずみ（最大主ひずみ）から次式により初期ひび割れ幅を算定することでモデル化した。

$$w_{initial} = \beta \cdot \varepsilon_{c,max} \cdot l_{eq} \quad (6)$$

ここで、 $\varepsilon_{c,max}$ は最大主ひずみ、 l_{eq} は要素の等価長さであり、 β はひずみとひび割れ幅を関連付けるパラメータである。

なお、荷重作用解析では、初期ひび割れ座標系と非直交方向のひび割れ座標系を考慮することで、荷重作用により生じるひび割れの発生を許容している。

3. ASR 膨張を生じた PC はり部材の構造性能評価

3.1 実験概要

小林らにより行われた PC はりの ASR 膨張試験ならびに静的載荷試験⁴⁾を対象として解析を行った。実験は、非反応性骨材を使用した普通コンクリート供試体と反応性骨材を使用した ASR コンクリート供試体に対して行われている。実験供試体の概略図を図-2に示す。供試体は幅 100mm、高さ 200mm、長さ 1600mm であり、断面上縁から 133mm の位置に $\phi 15$ の PC 鋼棒（降伏強度 1010MPa）が配置されている。導入プレストレス量は断面上縁で 10MPa である。上下組立筋およびせん断補強筋には D6 の異形鉄筋（降伏強度 320MPa）が使用されている。なお、せん断補強筋は 100mm 間隔で配置されており、せん断補強筋比は 0.56% である。

供試体は、材齢 28 日まで温度 20°C の室内で湿空養生され、材齢 29 日でプレストレスが導入された後に温度

表-1 コンクリートの材料特性

	圧縮強度	引張強度	弾性係数
NC	34.9	2.46	26800
	49.3	3.35	41200
ASR	41.3	2.75	24100
	30.1	1.83	17200

注1 NC：普通コンクリート，ASR：ASR コンクリート
注2 上段はプレストレス導入時，下段は静的載荷試験時
注3 単位はいずれも MPa

40°C、R.H.100%環境下で促進養生された。促進養生期間において、PC 鋼棒、スターラップおよび上下組立筋のひずみが測定された。所定の促進養生期間の後、せん断スパン比 4.0 とした単純支持により静的載荷試験が行われ、曲げ耐荷性状が検討された。なお、コンクリートの強度試験は、プレストレス導入時と静的載荷時に行われており、表-1に示す結果が得られている。

図-3に実験より得られた普通コンクリートならびに ASR コンクリート供試体のひずみの経時変化を破線で示す。普通コンクリートにおいては、湿潤膨張によりスターラップと上側組立筋には引張ひずみが生じているが、PC 鋼棒と下側組立筋は促進養生期間 50 日目あたりからひずみが減少し、最終的には圧縮ひずみが生じる結果が得られている。一方 ASR コンクリートにおいては、スターラップと上側組立筋のひずみが促進養生期間 20 日目あたりから急激に増加し、最終的にはそれぞれ 1500 μ 、850 μ の大きな引張ひずみが生じたのに対して、PC 鋼棒と下側組立筋は養生期間を通してほぼ一定のひずみとなっており、ASR 膨張はほとんど拘束された結果となっている。

また、図-4に普通コンクリートならびに ASR コンクリート供試体の静的載荷試験の荷重-スパン中央たわみ関係をそれぞれ実線と破線で示す。ASR コンクリート供試体は普通コンクリート供試体と比較して、コンクリートの圧縮強度や弾性係数は小さいが、PC はり供試体の挙動に関しては、最大荷重は 10% 程度低いものの初期剛性およびポストピーク時の変形性能はほとんど低下しない結果が得られている。

3.2 解析概要

図-5に解析に用いた要素分割図を示す。供試体は 6 面体要素によりモデル化し、奥行き方向に 3 等分割している。コンクリート、鉄筋および PC 鋼材の材料特性は、実験から得られたものを用いた。解析の手順としては、PC 鋼材に所定の初期ひずみを与えることでプレストレスを導入した後、ASR 膨張モデルを用いた ASR 膨張解析を行う。その後、ASR 膨張解析より得られた結果を用いて初期ひずみ・初期応力・初期ひび割れ問題として荷

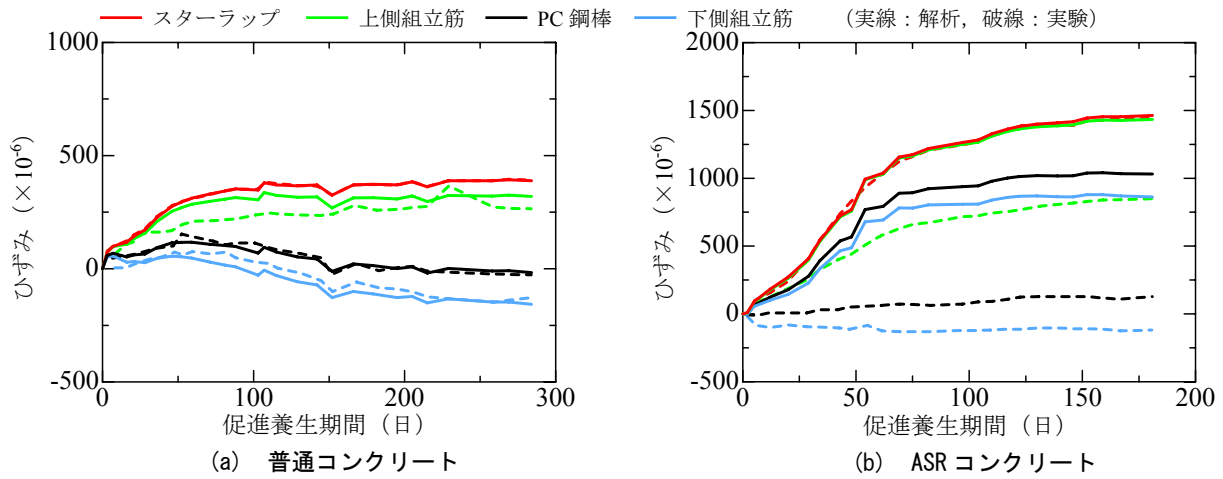


図-3 クリープ変形解析による膨張ひずみの経時変化

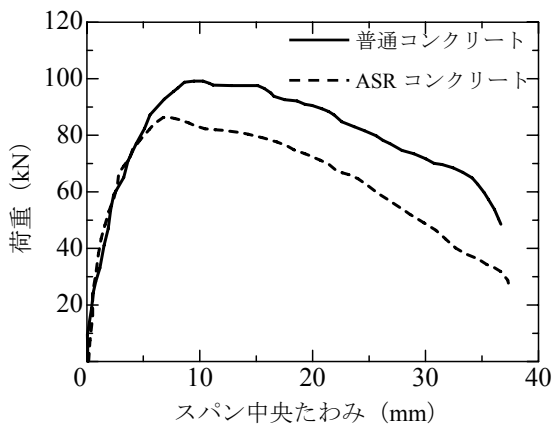


図-4 荷重-スパン中央たわみ関係 (実験結果)

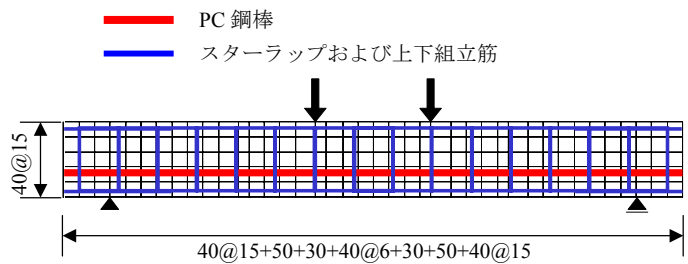


図-5 解析モデル

重作用解析を行い、ASR 膨張を生じた PC はりの構造的な性能評価を行う。

3.3 ASR 膨張挙動の評価

(1) クリープ変形解析

前節で述べたように、普通コンクリート供試体は、促進養生期間中に膨潤とクリープによる体積変化が生じている。そこで、クリープひずみ $\epsilon_{creep}(t)$ を次式により算定することで、PC はりの時間依存変形挙動の予測を試みた。

$$\epsilon_{creep}(t) = \phi(t) \cdot \sigma'_{cp} / E_{ct} \quad (7)$$

ここで、 σ'_{cp} はプレストレスにより作用する圧縮応力、 E_{ct} は載荷時材齢のコンクリートの弾性係数である。 $\phi(t)$ はクリープ係数であり、土木学会式¹²⁾を参考にして、次式を仮定した。

$$\phi(t) = a \cdot \{1 - \exp(-bt)^c\} \quad (8)$$

ここで、 a 、 b 、 c は定数である。普通コンクリートならびに ASR コンクリートのクリープ係数は等しいものと仮定し、それぞれ 2.0、0.01、1.0 とした。なお、PC 部材では PC 鋼棒のリラクゼーションを考慮する必要がある

が、変形を伴う経時的なリラクゼーションの評価は困難であるため、本研究では PC 鋼棒のリラクゼーションは直接考慮せず、上記のクリープ係数を用いたクリープ解析により全体的な時間依存変形を評価することとした。

クリープ変形解析は、実験で観察された膨潤による時間依存変形を考慮するため、自由膨張ひずみを入力値とした初期ひずみ問題とし、線形弾性解析により行った。自由膨張ひずみは、普通コンクリートならびに ASR コンクリート供試体に対して、それぞれのスターラップひずみの経時変化から逆解析することで決定した。

図-3 に解析より得られた普通コンクリートならびに ASR コンクリート供試体の各種鋼材のひずみの経時変化を実線で示す。図より、普通コンクリート供試体を対象とした結果は、PC 鋼棒ならびに上下組立筋のひずみの経時変化を精度良く捉えていることが分かる。したがって、本研究で用いたクリープ係数は、解析対象とした PC はりのクリープ変形を評価するのに妥当であるといえる。一方、ASR コンクリート供試体を対象とした結果からは、PC 鋼棒および下側組立筋のひずみの経時変化を過大に評価する結果となった。このことから、クリープ変形を考慮するだけでは ASR を生じた PC はりの膨張挙動を評価することが出来ないといえる。

(2) ASR 膨張解析

ASR 膨張モデルを用いて、ASR コンクリート供試体の膨張挙動の予測を試みた。自由膨張ひずみは、1 軸の ASR

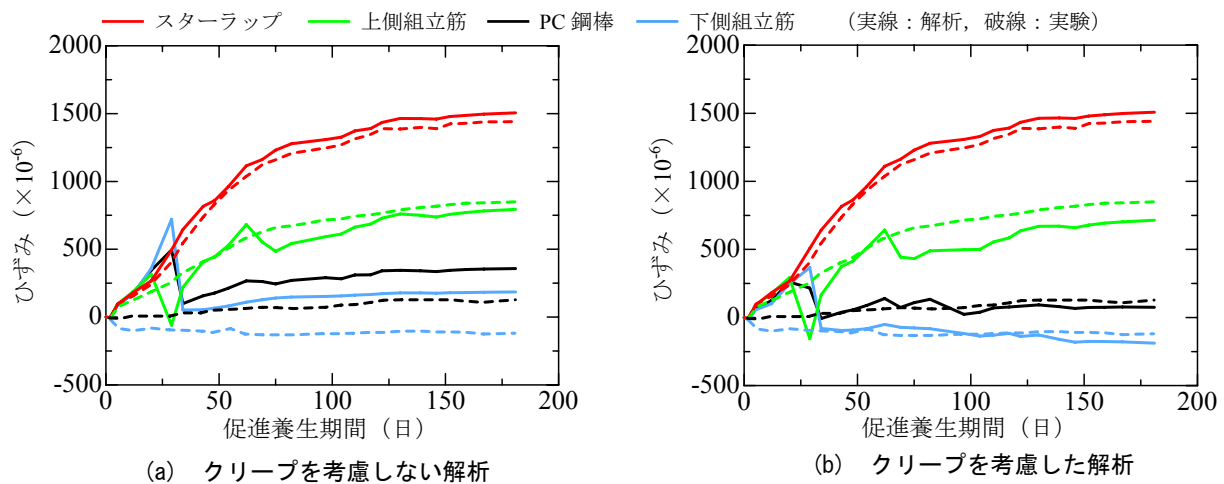


図-6 ASR 膨張モデルによる膨張ひずみの経時変化

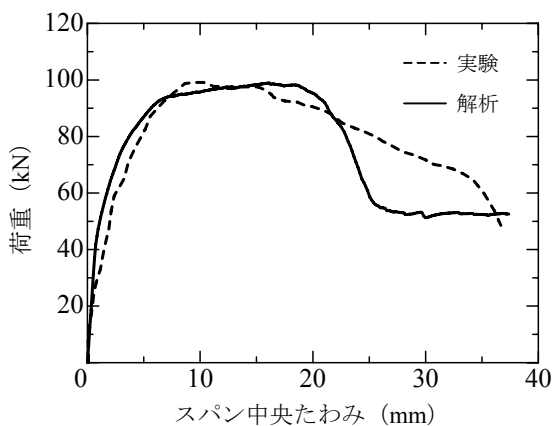


図-7 荷重-スパン中央たわみ関係 (普通コンクリート)

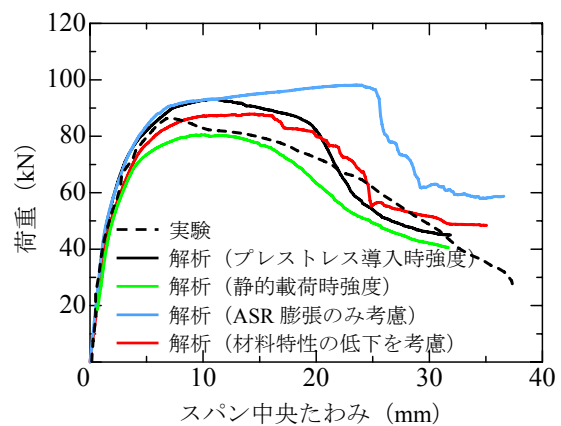


図-8 荷重-スパン中央たわみ関係 (ASR コンクリート)

膨張モデルを用いてスターラップのひずみの経時変化から逆解析を行うことで求めた。逆解析の結果、自由膨張量はおよそ 4000μ と予測された。なお、ASR コンクリート供試体においても、湿潤膨張による変形が生じていたと推察されるが、本解析では膨張は全て ASR により生じたものとした。

図-6 にクリープを考慮しない ASR 膨張解析(式(1), (2)を使用)の結果ならびにクリープを考慮した ASR 膨張解析(式(3), (4)を使用)の結果を示す。図-6 (a) より、クリープを考慮しない ASR 膨張解析では、初期導入プレストレスが比較的小さな上側組立筋のひずみの経時変化は概ね妥当に捉えているが、初期導入プレストレスが大きな PC 鋼棒ならびに下側組立筋のひずみの経時変化は過大に評価することが分かる。一方、図-6 (b) より、クリープを考慮した ASR 膨張解析では、上側組立筋のひずみを若干小さく評価しているものの、総合的に見るといずれの鋼材に対してもひずみの経時変化を概ね妥当に捉えており、提案した ASR 膨張モデルは妥当であるといえる。ただし、促進養生期間 25 日前後において、PC 鋼棒ならびに下側組立筋のひずみを過大評価して

いるが、この点については、更なる検討が必要である。

3.4 ASR 損傷を考慮した PC はりの構造性能評価

前節の ASR 膨張解析の結果を用いて荷重作用解析を行った。前述のように、実験ではプレストレス導入時と静的載荷時試験時にコンクリートの強度試験が行われている。そこで、材料特性は、膨張ひずみが自由膨張ひずみと等しくなったときに表-1 に示す強度となるように、各ガウス点の主ひずみの大きさに従って線形的に低下させた。具体的には、膨張ひずみが 4000μ の時に、実験から得られた静的載荷時の強度となるようにした。初期ひび割れ幅は、実験においてスターラップひずみが 1500μ 程度であったことと、断面高さ 200mm に対して軸方向にマクロなひび割れが 4 本程度入っていたことを考慮し、式(6)において $\beta = 50/l_{eq}$ とした。なお、今回対象とした PC はりでは、せん断補強筋が 0.56% 配筋されているため、初期ひび割れ幅が部材の挙動に及ぼす影響は小さいと考えられる。

図-7 に普通コンクリートを対象とした荷重作用解析の結果を示す。なお、普通コンクリート供試体は、養生後の材料特性値を一様に与えている。解析はひび割れ

後の剛性を若干大きく見積もっているものの最大荷重を精度良く予測しており、普通コンクリートの PC はりの構造性能を妥当に評価できていることが分かる。

図-8に ASR コンクリート供試体を対象とした荷重作用解析の結果を示す。図中には、ASR 膨張を考慮しない解析、ASR 膨張のみを考慮し材料特性の低下を考慮しない解析の結果も併せて示す。図において、赤線は ASR 膨張を考慮して材料特性を低下させた解析の結果を、青線は ASR 膨張のみを考慮して材料特性の低下を考慮しない解析の結果を、黒線、緑線はそれぞれ ASR 膨張を考慮しない解析において、プレストレス導入時の材料特性値を用いた場合の結果と静的載荷試験時の材料特性値を用いた場合の結果である。

図より材料特性の低下を考慮しない場合、剛性が急変する 90kN 以降も荷重が増加する結果となった。この結果は、PC はりにおいては、ASR 膨張を生じて材料の劣化の程度が小さければ、健全なはりよりも最大荷重、変形性能が増大する可能性があることを示唆している。

一方、材料特性の低下を考慮した場合は、最大荷重以降徐々に荷重が低下する挙動となり、実験結果を概ね妥当に予測できている。このことから、ASR 損傷を生じた PC はりの構造性能を評価するには、材料特性の低下を考慮する必要があるといえる。また、ASR 膨張を考慮しない場合と比較すると、最大荷重が 10%程度低下する結果となった。これは、コンクリートの圧縮強度が低下したためであると考えられる。また、静的載荷試験時の材料特性値を用いた場合には、実験結果を過小評価していることが分かる。これは、PC はりの部材軸方向の膨張が拘束されるため、実際には圧縮強度はほとんど低下していないことを示唆するものである。

すなわち、ASR 損傷した部材の構造性能を評価するためには、ASR による膨張量を評価した上で、材料特性値を低下させる必要があり、提案した手法は ASR 損傷した PC はりの構造性能を評価するのに有用であるといえる。

4. 結論

本研究で得られた結論は以下の通りである。

- (1) プレストレスによるクリープを考慮可能な ASR 膨張モデルを提案するとともに、ASR コンクリートの損傷の方向性を考慮可能な統合解析手法を提案することで、PC はりの ASR 膨張挙動を概ね妥当に評価することでモデルの妥当性を示した。
- (2) ASR による材料の劣化の程度が小さければ、最大荷重、変形性能ともに増大する可能性が高い。ただし、ASR を生じた PC はりの構造性能を予測するためには、ASR を生じた部材中における材料特性（特に圧縮強度）の低下の程度を適切に評価する必要がある。

謝辞

本研究は、名古屋高速道路公社「平成 20 年度コンクリート構造物の劣化損傷に関する研究（研究代表者：中村光）」の一部として行った。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリートライブラリー124，アルカリ骨材反応対策小委員会報告書，2005.
- 2) 尾花祥隆，鳥居和之：プレストレストコンクリート・プレキャストコンクリート部材における ASR 劣化の事例検証，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.30，No.1，pp.1065-1070，2008.
- 3) 小柳洽，六郷恵哲，内田裕市，長瀬道雄：著しい AAR 損傷を生じた RC はりの挙動，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.15，No.1，pp.947-952，1993.
- 4) 小林和夫，井上晋，山崎應生，中野錦一：アルカリ骨材反応を受けた PC はり部材の耐荷性状に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9，No.1，pp.615-620，1987.
- 5) 上田尚史，澤部純浩，中村光，国枝稔：アルカリ骨材反応による RC 部材の膨張予測解析，土木学会論文集 E，Vol.63，No.4，pp.532-548，2007.
- 6) 伊藤睦，Kongkeo P.，中村光，田辺忠顕：格子等価連続体化法による鉄筋コンクリート部材の有限要素解析，土木学会論文集，No.767/V64，pp.115-129，2004.
- 7) 菅満宣，中村光，檜貝勇，齊藤成彦：RC はりの力学的挙動に及ぼす付着特性の影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.295-300，2001.
- 8) 上田尚史，中村光，国枝稔：ASR 損傷した RC 部材の構造性能評価に関する解析的研究，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレード論文報告集，Vol.7，pp.113-120，2007.
- 9) 上田尚史，中村光，国枝稔：RC 構造物の ASR 膨張予測と構造性能評価に関する解析的研究，コンクリート構造物の耐久力学に関するシンポジウム論文集，pp.347-356，2007.
- 10) 尾花祥隆，蓑田理希，古川柳太郎，鳥居和之：ASR 劣化した PC 梁部材の曲げ耐荷力と破壊性状，土木学会第 62 回年次学術講演会，5-441，pp.881-882，2007.
- 11) Vecchio, F. J. and Collins, M. P. : The Response of Reinforced Concrete to In-Plane Shear and Normal Stress, University of Toronto Publication, 1982.
- 12) 土木学会：2007 年制定コンクリート標準示方書【設計編】，2007.