

ASR劣化したPC部材の変形挙動の解析的評価

九州工業大学		○矢野 佑輔
九州工業大学	正会員 Ph. D.	幸左 賢二
九州工業大学	正会員 工博	合田 寛基

Abstract : FEM analysis, which has considered the degradation and expansion of concrete material due to ASR, is carried out to simulate the exposure test of PC girder specimen, in which alkali reactivity aggregate is used. As a result, the simulative upward deformation is 0.98mm, which is close to the experimental one 1.50mm. FEM analysis parameterized by different degradations of concrete material is carried out. As a result, upward deformation increases with the decreasing of modulus of elasticity. FEM analysis parameterized by different eccentricities of PC steel wire is carried out. As a result, upward deformation increases with the increasing of eccentricity of PC steel wire.

Key words : Prestressed Concrete, Alkali-Silica Reaction, FEM

1. はじめに

著者らは、ASRが生じたPC部材の長期的な劣化性状の評価を目的に、反応性骨材を使用した大型PC桁供試体 (No.1~4) を作製した。No.1,2供試体では健全時の初期剛性の評価を目的に、初期に鉄筋が降伏するまで載荷試験を実施した。その後、屋外暴露を実施し、No.1供試体は劣化度中、No.2供試体は劣化度大で再び載荷試験を実施予定である。No.3,4供試体では、それぞれ劣化度中および大で載荷試験を行う予定であり、現在は屋外暴露中であり、定期的にひび割れ観察、膨張量および部材変形などの計測を行っている。

本稿では、詳細に計測を行っているNo.4供試体を対象に、ASRによる材料劣化、膨張ひずみを考慮した2次元弾塑性FEM解析を行い、ASRが生じたPC部材の基礎的な挙動の把握を行った。さらに、材料劣化と偏心量に着目したパラメータ解析を実施し、メカニズムについて詳細に分析を行った。

2. 実験概要

図-1に供試体概要を示す。形状は4500×350×550mmで、緊張方法はφ19.3mmのPC鋼より線を4本配置したポストテンション方式とした。供試体は打設から約100日間室内養生し、その後、屋外暴露を実施した。

セメントは普通ポルトランドセメントを用い、水セメント比は46%とした。反応性骨材の岩種はいずれも安山岩とし、反応性の細骨材は長崎県産砕砂を60%、反応性の粗骨材は北海道産砕石を50%を使用した。また、NaCl添加により、コンクリート中の等価アルカリ量は8kg/m³とした。

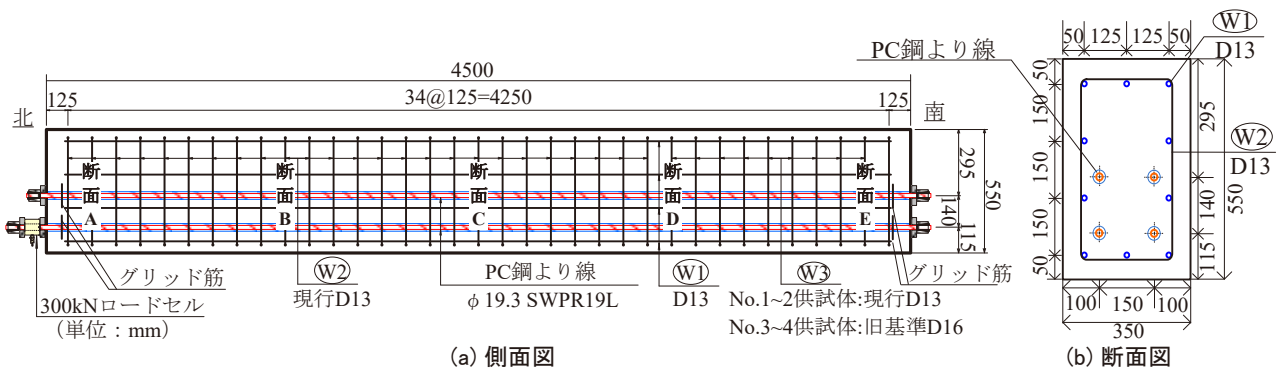


図-1 供試体概要

図-2に部材変形の計測方法を示す。図中のディプスゲージを用いて、供試体周りに設置した固定アングルを基準とし、供試体上面の距離を計4点計測した。なお、計測対象断面は、供試体端部から250mmを基点に、1000mmピッチで断面A~Eの計5断面とした。

図-3にNo.3,4シリンダーの圧縮試験結果を示す。No.3,4シリンダーとは、No.3,4供試体と同時期に作製したシリンダーであり、暴露試験を実施した。同図より、No.3,4の圧縮強度、静弾性係数はともに材齢300日まで強度増進したが、300日以降は劣化進展が確認された。材齢1500日におけるNo.4の圧縮試験は実施していないため、No.3を参考に、No.4の圧縮強度、静弾性係数を予測した。図中(A)より、No.3の圧縮強度、静弾性係数は材齢300~1500日にかけて、両者とも約50%低下している。よって、図中(B)より、材齢1500日におけるNo.4の圧縮強度は $31.5\text{N/mm}^2 (=62.9 \times 0.5)$ 、静弾性係数は $18.5\text{kN/mm}^2 (=37.0 \times 0.5)$ と予測した。

3. 解析概要

解析はASRの進展が確認された材齢300日以降に着目し、ASRによる材料劣化と膨張ひずみを考慮した2次元弾塑性FEM解析によって実施した。本解析では過年度¹⁾と同一の解析モデル(鋼材モデル、コンクリートモデル)を使用している。初期の荷重条件に自重を与えた後、PC鋼より線をモデル化した埋め込み鉄筋要素に緊張力となる引張応力を与えることにより、供試体にプレストレスを作用させた。次いで、各要素に経時変化に基づく膨張ひずみおよび材料劣化モデルを与えた。

表-1に解析ケースを示す。case1はNo.4供試体で生じる現象を再現した標準ケースであり、4章において実験結果と比較し、解析精度を検証した。

case3,4,5は材料劣化の影響度を検討するパラメータケースであり、膨張を与えず、圧縮強度と弾性係数の低下度を変化させ、評価した。後述するが、case3,4,5の圧縮強度と弾性係数は、健全値から50,25,75%低下させたモデルであり、それぞれ比較した。

case2,6,7はPC鋼線の偏心量による拘束差の影響度を検討するパラメータケースであり、PC鋼線の偏心量を変化させ、膨張ひずみのみを与えて評価した。ここでの偏心量とは、供試体中央から上下2本のPC鋼線の中心までの距離と定義した。図-4に偏心量とその

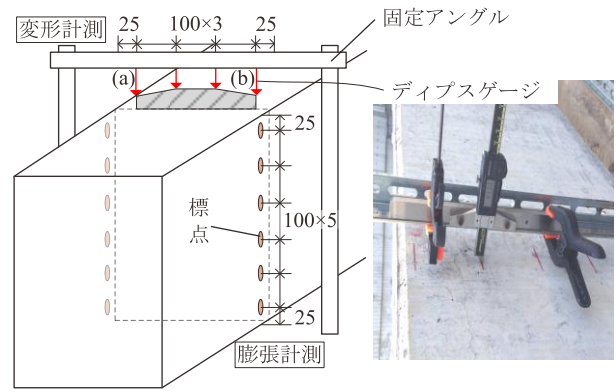


図-2 計測方法

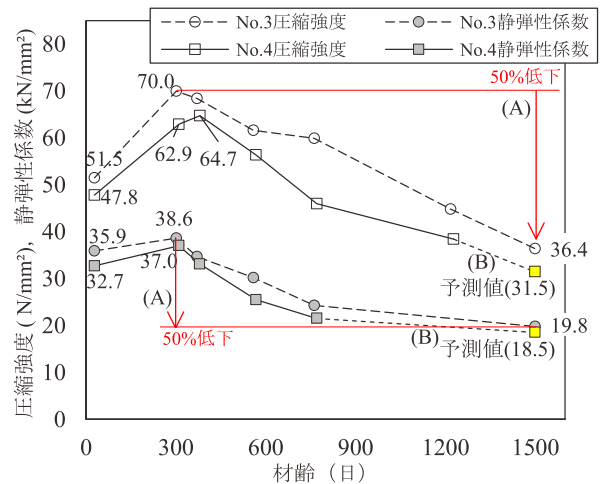


図-3 シリンダーの圧縮試験結果

表-1 解析ケース

	膨張ひずみモデル		材料劣化モデル		偏心量
	鉛直方向ひずみ	軸方向ひずみ	圧縮強度	弾性係数	
case1	3200 μ	550 μ	50%低下	50%低下	90mm
case2	3200 μ	550 μ	健全値	健全値	90mm
case3	0 μ	0 μ	50%低下	50%低下	90mm
case4	0 μ	0 μ	25%低下	25%低下	90mm
case5	0 μ	0 μ	75%低下	75%低下	90mm
case6	3200 μ	550 μ	健全値	健全値	100mm
case7	3200 μ	550 μ	健全値	健全値	130mm

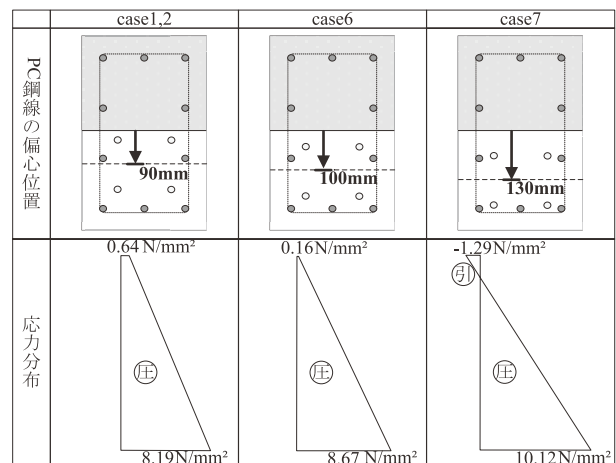


図-4 偏心量について

応力分布を示す。図中より、case2,6,7の偏心量は90,100,130mmの偏心量とし、それぞれ比較した。

図-5に圧縮側の応力ひずみモデルを示す。図中には、シリンダーの圧縮試験から得られた応力ひずみ曲線を基に、健全時の応力ひずみモデル、圧縮強度と弾性係数が50%低下した劣化時の応力ひずみモデル、さらにパラメータケースとして25%低下モデル、75%低下モデルを示している。標準ケースであるcase1は、図-3より圧縮強度および弾性係数が材齢300~1500日にかけて50%低下したため、コンクリートの応力ひずみモデルは材齢300~1500日かけて健全モデルから50%低下モデルまで単調に変化させることとした。また、5章で材料劣化のパラメータ解析を行うケースはcase3,4,5であり、前述と同様に、材齢300~1500日にかけて、健全値からそれぞれ50, 25, 75%低下モデルに単調に変化させるモデルとした。

本実験ではASR供試体しか作製していないため、乾燥収縮とクリープの影響を含んだ膨張ひずみを計測している。そこで、本解析の膨張ひずみモデルは本供試体と配合(W/C=45%)、形状(4000×535×560mm)、鋼材比(0.20%)、緊張力(300kN)、暴露条件(年平均気温約16.5℃)が概ね同様であるプレストレスト・コンクリート建設業協会(以下、PC建協)の供試体の膨張計測結果を参考とした²⁾。PC建協では、ASR供試体と健全供試体の2種類の供試体を作製し、この2種類の供試体のひずみの差分は乾燥収縮、クリープによる影響を除いたASRのみによるひずみ量となる。その結果を基に、各方向の膨張ひずみモデルは以下に示すように設定した。

図-6にPC建協の鉛直方向ひずみの計測結果を示す。健全供試体とASR供試体のひずみ差は材齢100~1300日で3200μとなった。よって、本供試体でも同様な膨張が生じると仮定し、材齢300日で0μ、材齢1500日で3200μとなるように鉛直ひずみを与えるモデルとした。

図-7にPC建協の軸方向ひずみの計測結果を示す。健全供試体とASR供試体のひずみ差は材齢100~1300日で550μとなった。よって、本供試体でも同様な膨張が生じると仮定し、材齢300日で0μ、材齢1500日で550μとなるように軸ひずみを与えるモデルとした。

4. 実験および解析結果

図-8に材齢500~1500日における実験と解析case1の部材変形の比較を示す。実験値は、図-2に示すディ

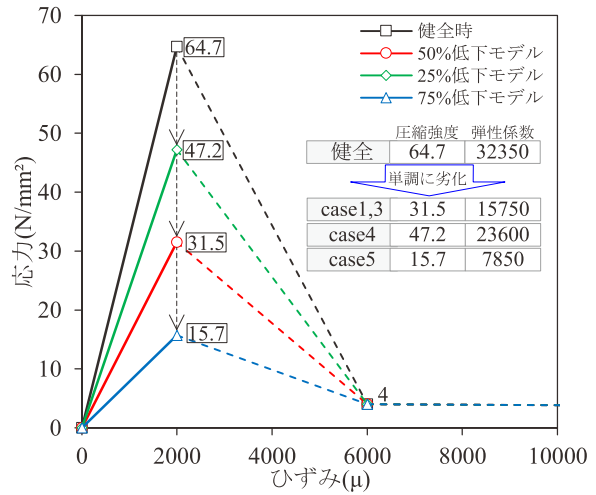


図-5 圧縮側の応力ひずみモデル

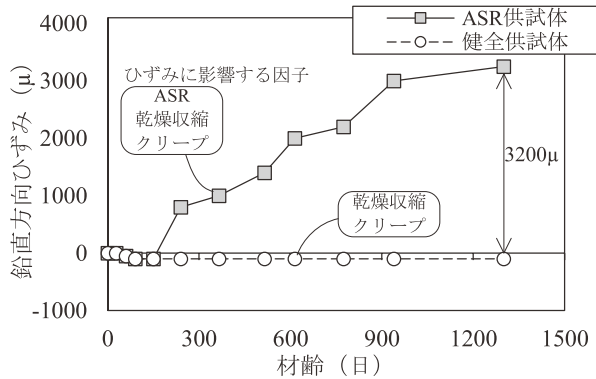


図-6 PC建協の鉛直方向ひずみの計測結果²⁾

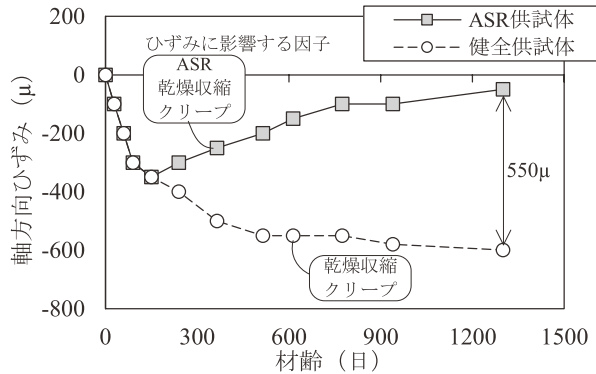


図-7 PC建協の軸方向ひずみの計測結果²⁾

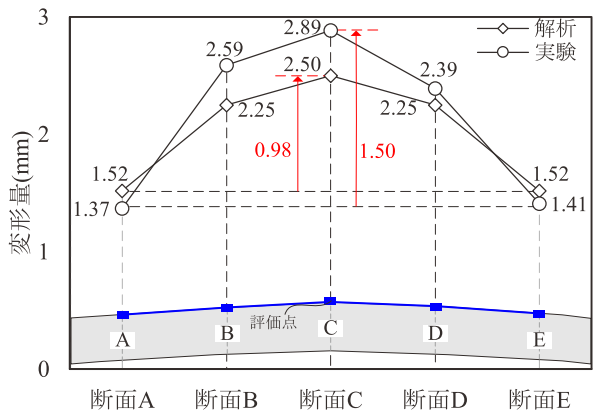


図-8 部材変形の比較

プスゲージを用いて計測し、各断面につき計測点2箇所
のa点、b点の平均値を用い、解析値は、計測位置に相当
する各断面上縁の変位量を用いて比較した。図中より、
実験では、端部の断面A、Eで平均1.39mmの変形量、中
央の断面Cで2.89mmの変形量が確認され、反り戻り量
は1.50mmとなった。一方、解析case1では、端部の断面
A、Eで1.52mm、中央部の断面Cで2.50mmと確認され、
反り戻り量は0.98mmとなった。以上より、部材変形の
再現は、一様変形は90% (=1.39/1.52)、反り戻り変形は
65% (=0.98/1.50)となり、概ね再現できた。

図-9に解析結果の軸方向ひずみの変化量を示す。図
中のひずみ値は、供試体中央断面の軸方向ひずみの値
を用いた。図中より、上下縁のひずみ差242μ(=572-330)
と確認された。反り戻りは上下のひずみ差から発生す
ると考えられ、式(1)より求められる。

$$v = \varphi \times L^2 / 8 \dots (1)$$

ここに、v: 反り戻り量(mm), φ: 曲率(1/mm), L: ス
パン長4000mm

よって、式(1)より、反り戻り量は0.88mmとなり、図
-8の解析値0.98mmとほぼ一致した。

5. 材料劣化の影響の検討

5.1 解析結果

図-10に劣化をパラメータとした部材変形の比較を
示す。図中には、表-1に示すように、圧縮強度と弾性
係数をともに50,25,75%低下させたcase3,4,5を示す。な
お、図中の変形量は材齢300~1500日の変形量とした。
同図より、case3,4,5の反り戻り量は0.80,0.30,2.02mmと
なった。以上より、弾性係数の低下が著しいほど、反り
戻りが大きくなることが確認された。

図-11に材料劣化の差による変形挙動の違いを示
す。ここでは、case3,5に着目しており、図中(1)は初期プ
レストレスによって生じた変形ひずみ、図中(2),(3)は弾
性係数が低下した時のひずみを示している。図中(1)よ
り、初期プレストレスにより、上縁で-32μ、下縁で-261μ
のひずみが生じた。劣化が生じると、図中(2)より、50%
低下時では上縁で-65μ、下縁で-495μのひずみとなり、
また、図中(3)より、75%低下時では上縁で-126μ、下
縁で-855μのひずみとなった。以上より、弾性係数の低下
が著しいほど、供試体下部で圧縮ひずみが増加する。

5.2 変形メカニズム

図-12に材料劣化による変形メカニズムを示す。ま

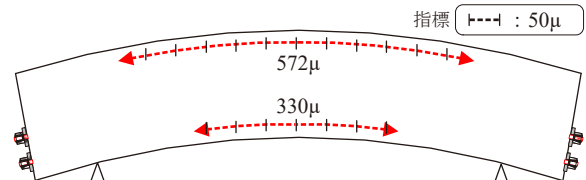


図-9 軸方向ひずみの変化量(材齢500~1500日)

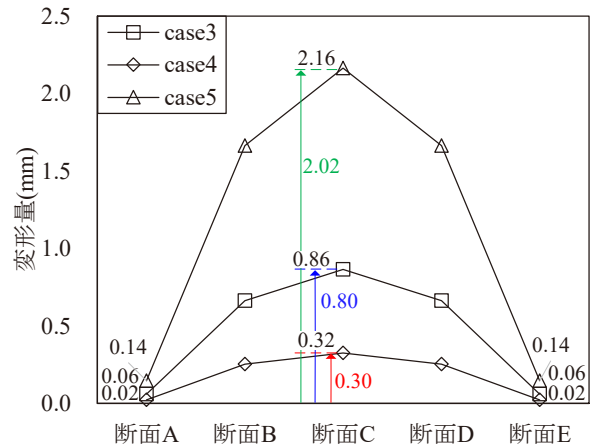


図-10 劣化をパラメータとした部材変形の比較

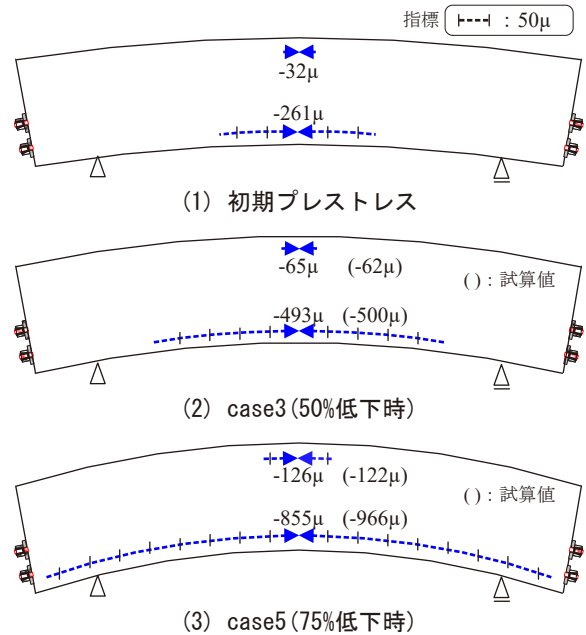


図-11 材料劣化の差による変形挙動の違い

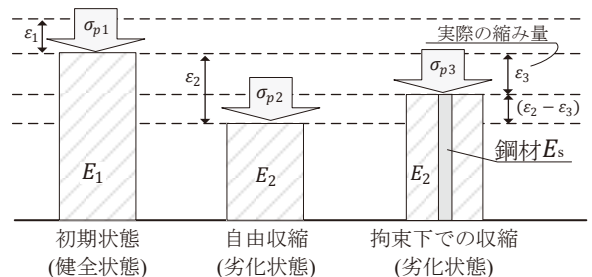


図-12 材料劣化による変形メカニズムの模式図

ず、初期プレストレスの応力 σ_{p1} によって変形ひずみ ε_1 が生じる。劣化が進展した場合、プレストレスによる変形がさらに進展し、 ε_2 が生じる。鋼材による拘束がない場合、図中のコンクリートの応力 σ_{p1} と σ_{p2} は一定値となり、自由変形ひずみ ε_2 は式(2)により求められる。

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_1 \times (E_1/E_2 - 1) \dots (2)$$

ここに、 ε_1 ：健全時の変形ひずみ、 ε_2 ：劣化時の変形ひずみ、 E_1 ：健全時の弾性係数(N/mm²)、 E_2 ：劣化時の弾性係数(N/mm²)

しかし、実際には鋼材による拘束がある。そのため、拘束条件下の変形ひずみ ε_3 は、力の釣り合いと変形の適合条件を満たす式(3)より求められる。

$$\varepsilon_3 = \frac{E_2 * \varepsilon_2}{(p * E_s + E_2)} \dots (3)$$

ここに、 ε_2 ：自由変形ひずみ、 ε_3 ：拘束条件下での変形ひずみ、 p ：拘束鋼材比、 E_s ：鋼材の弾性係数(N/mm²)、 E_2 ：コンクリートの弾性係数(N/mm²)

図-13にcase3の試算結果を示す。上記の試算手法より、図心位置における自由変形ひずみ ε_2 は-300 μ 、拘束条件下での変形ひずみ ε_3 は-286 μ となり、-14 μ のひずみ量が拘束された(図中(A)参照)。ここで、PC鋼線の偏心による拘束差を表現するために、応力分布を用いて上下縁の拘束分のひずみ量を求めた。応力分布の比率から、図心位置における拘束ひずみが-14 μ であるため、上縁では-2 μ 、下縁では-22 μ となった。以上より、自由変形ひずみ ε_2 から拘束ひずみ分を差し引くと、上縁で-62 μ 、下縁で-500 μ となった。

上記の試算手法を用いた結果、図-11 (2), (3)中に示す試算値が得られた。試算値は解析値と概ね一致している。したがって、ASRが生じたPC桁供試体は弾性係数の低下に伴い、軸力が大きい下部で変形ひずみが卓越し、上下のひずみ差が大きくなると考えられる。

6. 偏心量の影響の検討

6.1 解析結果

図-14に偏心量をパラメータとした部材変形の比較を示す。図中には、表-1に示すように、供試体中央の高さからPC鋼線の位置を90,100,130mmとしたcase2,6,7を示す。なお、図中の変形量は材齢300~1500日の変形量とした。同図より、case2,6,7の反り反り量は0.14,0.16,0.20mmとなった。以上より、偏心量が大きいほど、反り反り変形が大きくなることが確認された。

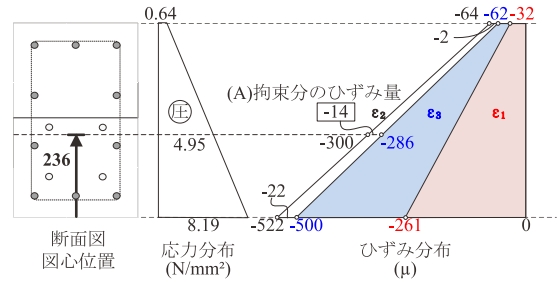


図-13 case3の試算結果

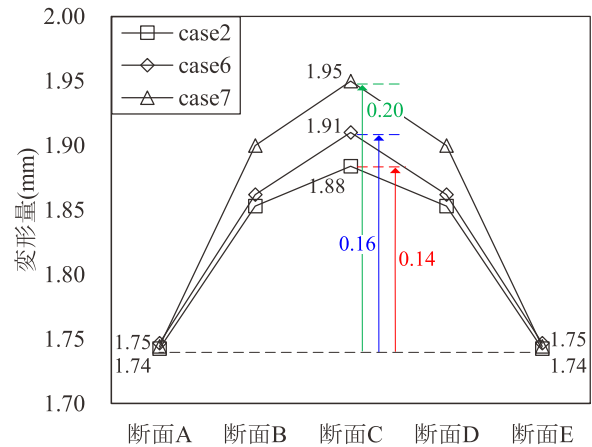


図-14 偏心量をパラメータとした部材変形の比較

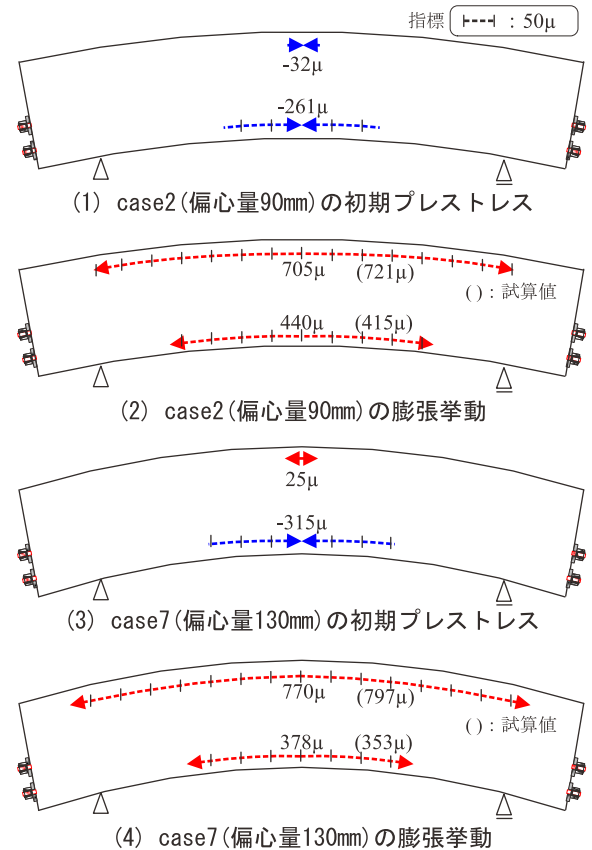


図-15 偏心量の差による変形挙動の違い

図-15に偏心量の差による変形挙動の違いを示す。ここでは、case2,7に着目しており、図中(1),(2)はcase2の初期プレストレスによって生じた変形ひずみとASR膨張後のひずみ、図中(3),(4)はcase7の初期プレストレスによって生じた変形ひずみとASR膨張後のひずみを示している。まず、case2において、図中(1)より、初期プレストレスによって上縁-32 μ 、下縁-261 μ のひずみが生じた。図中(2)より、ASR膨張によって上縁705 μ 、下縁440 μ のひずみとなった。次いで、case7において、図中(3)より、初期プレストレスによって上縁25 μ 、下縁-315 μ のひずみが生じた。図中(4)より、ASR膨張によって上縁770 μ 、下縁378 μ のひずみとなった。以上より、偏心量の増加に伴い、供試体下部で引張ひずみが拘束され、供試体上部では卓越する。

6.2 変形メカニズム

図-16に膨張ひずみによる変形メカニズムを示す。まず、初期状態に対し、自由変形ひずみ ϵ_2 が与えられる。しかし、実際には鋼材による拘束があるため、式(3)より、拘束条件下の変形ひずみ ϵ_3 を求められる。

図-17にcase2の試算結果を示す。上記の試算手法より、図心位置における自由変形ひずみ ϵ_2 は614 μ 、拘束条件下での変形ひずみ ϵ_3 は563 μ となり、51 μ のひずみ量が拘束された。ここで、前述と同様に、応力分布を用いて上下縁の拘束分のひずみ量を求めた。応力分布の比率から、図心位置における拘束ひずみが51 μ であるため、上縁では7 μ 、下縁では84 μ となった。以上より、自由変形ひずみ ϵ_3 は上縁で721 μ 、下縁で415 μ となった。

上記の試算手法を用いた結果、図-15(2)、(4)中に示す試算値が得られた。試算値は解析値と概ね一致している。以上より、PC桁供試体はPC鋼線の偏心量が大きいほど、供試体上部の拘束力が弱まり、上部で変形ひずみが卓越し、上下のひずみ差が大きくなると考えられる。

7. まとめ

材齢1500日が経過し、ASR劣化したPC桁供試体の実験結果、およびASRによる材料劣化と膨張ひずみを考慮した解析結果より、以下の知見を得た。

- 1) 変形計測より、反り返りは材齢500~1500日にかけて、1.50mm確認された。一方、解析では0.98mmとなり、実験値に対して65%の値となった。また、解析結果により、供試体の上下縁のひずみ差が242 μ と確認され、そのひずみ差から反り返り量を算出すると0.88mmとなった。以上より、反り返り変形はPC鋼線の偏心により、上下でひずみ差が生じることで発生すると考えられる。
- 2) 劣化をパラメータとした解析より、弾性係数の低下が著しいほど、反り返り量が大きくなることが確認された。これは、弾性係数の低下に伴い、軸力が大きい下部で変形ひずみが卓越し、上下のひずみ差が大きくなるためと考えられる。
- 3) 偏心量をパラメータとした解析より、PC鋼線の偏心量が大きいほど、反り返り量が大きくなることが確認された。これは、PC鋼線の偏心量が大きいほど、供試体上部の拘束力が弱まり、上部で引張ひずみが卓越し、上下のひずみ差が大きくなるためと考えられる。

参考文献

- 1) 上園祐太, 幸左賢二, 鄭玉龍, 矢野佑輔: 数値解析によるASR劣化したPC部材の変形挙動評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp.699-704, 2016
- 2) (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会: ASR対策委員会報告書, pp.62-68, 2009

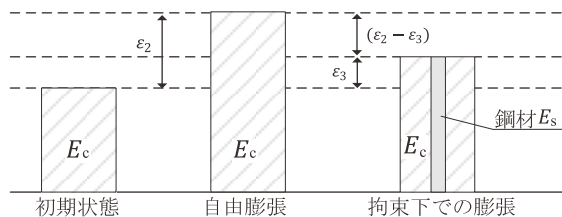


図-16 膨張ひずみによる変形メカニズムの模式図

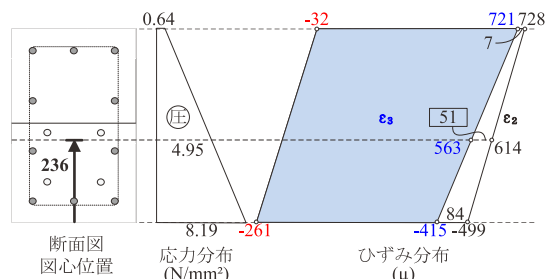


図-17 case2の試算結果