

ASR劣化したPC部材の長期変形の解析的検討

九州工業大学

○矢野 佑輔

九州工業大学

正会員 Ph. D.

幸左 賢治

九州工業大学

益田 紘孝

Abstract : In this study, after around 3.5 years of exposure, the specimen for which ASR deteriorations have been confirmed is selected for evaluation. FEM analysis is also carried out by considering the expansion and the material degradation due to ASR. From the experimental and analytical results, upward deflection around 2mm was produced. Based on the FEM analysis, it is noted that the eccentricity of the PC steel wire led the difference of axial strain between the top and bottom of cross-section and then upward deflection happened. The compressive strength and modulus of elasticity of core from ASR-effected structure is considered to decrease slowly along with aging time. For that reason, the calculated result of the specimen that exposed for 20 years is 2.40mm, which is increased only 0.38mm from the specimen that exposed for 1300 days.

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

1. はじめに

本研究では、反応性骨材を使用した大型PC桁供試体(No.1~4)を作製して、長期暴露試験による劣化性状、載荷試験による耐荷性能の検討を行っている。No.1,2供試体は、ASR劣化初期に載荷試験を実施した。その後、屋外暴露を実施し、再び載荷試験を予定している。No.3,4供試体は、ASR劣化度中、大に載荷試験の実施を予定しているため、現在は長期暴露中であり、定期的に部材変形の計測を行っている。そこで、本稿では、詳細な計測を実施しているNo.4供試体(材齢1300日)を対象に、ASRによる材料劣化、および膨脹ひずみを考慮したFEM解析の実施により、部材変形の再現、変形メカニズムの評価を行った。また、将来予測として、20年後の劣化予測モデルを用いて、長期に亘る変形挙動について予測した。

2. 実験および解析概要

2.1 供試体概要

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。

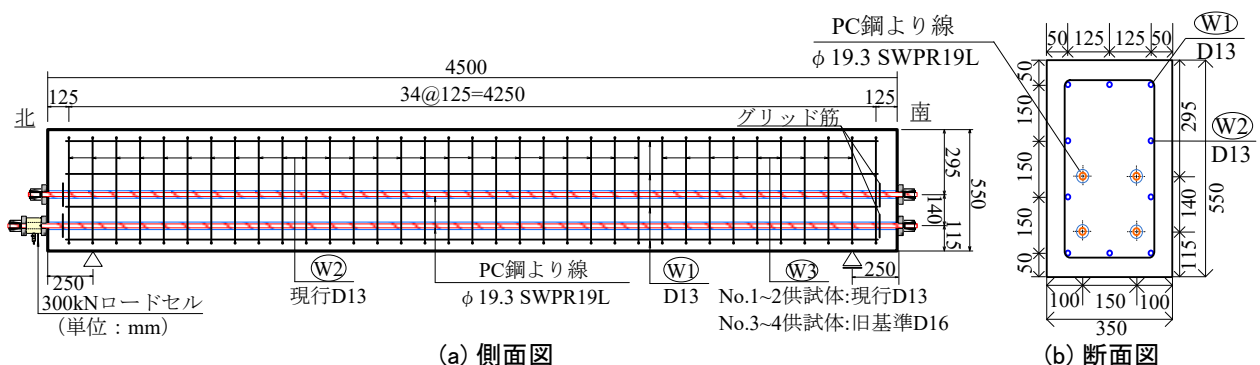


図-1 供試体概要

セメントには普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比は46%(=W/C=175/381)とした。反応性骨材の岩種はいずれも安山岩とし、細骨材に長崎県産砕砂を60%、粗骨材には北海道産砕石を50%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/m^3 とした。

図-2に変形状況の計測方法を示す。供試体周りに設置した固定アングルと供試体上面の距離を、ディプスゲージを用いて計測した。図に示すように、各断面4点を計測し、変形量の評価は4点の計測値の平均を用いた。

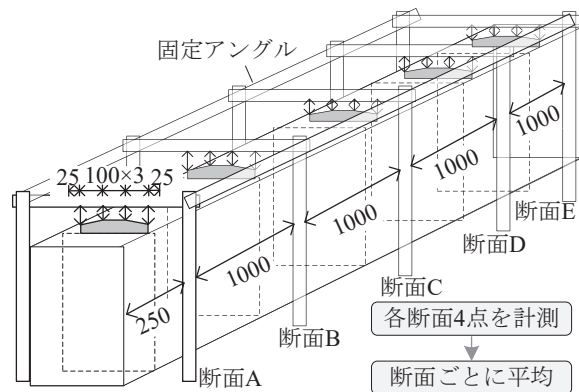


図-2 変形の計測方法

2.2 解析モデル

本解析は、過年度の研究¹⁾と同一の解析モデル(鋼材、コンクリートモデル等)を使用している。

図-3に材料劣化モデルを示す。解析では、ASRによる材料劣化を考慮するため、No.4供試体と同時期に作製したシリンダー(図中PC)、およびNo.4供試体と配合、暴露条件がほぼ同様であり、PCシリンダーの圧縮試験結果と同程度であるRC供試体(340×340×900mm)から採取したシリンダー(図中RC)による圧縮試験結果を参考にモデル化した。図から、材齢300日まで圧縮強度 64.7N/mm^2 、弾性係数 37.0kN/mm^2 と強度増進が認められた。その後、劣化が始まり、材齢1100日で圧縮強度 29.4N/mm^2 、弾性係数 16.0kN/mm^2 と約50%低下し、材齢1800日まで圧縮強度 27.6N/mm^2 、弾性係数 16.9kN/mm^2 と漸減していた。また、劣化が顕著な橋脚に対して、採取コアの圧縮試験が経年的に行われている²⁾。その結果、竣工後約1年の圧縮強度、弾性係数はそれぞれ設計基準強度に対して1.3、0.5と確認された。竣工後10年の圧縮強度比0.9、弾性係数比0.3と急激に低下し、20~30年後に亘り、圧縮強度比0.6、弾性係数比0.2と緩やかな低下が確認された。したがって、長期に亘る圧縮強度、弾性係数は最大でも約60%程度の低下であるため、材齢20年後の圧縮強度、弾性係数は60%低下率を用いることとした。以上より、図中に示すように、本解析では材齢300~1100日にかけて50%まで低下させ、材齢1100~7300日に亘って50%から60%まで低下させることとした。

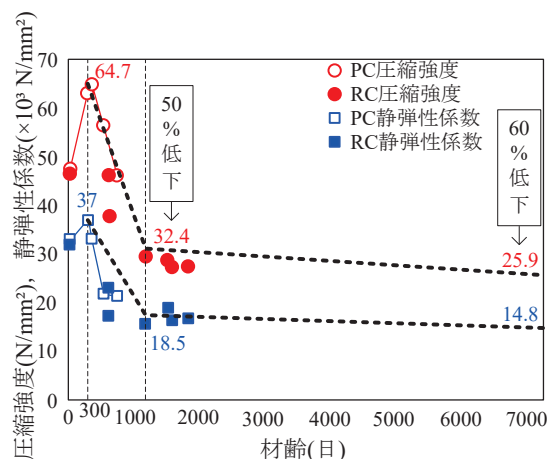


図-3 材料劣化モデル

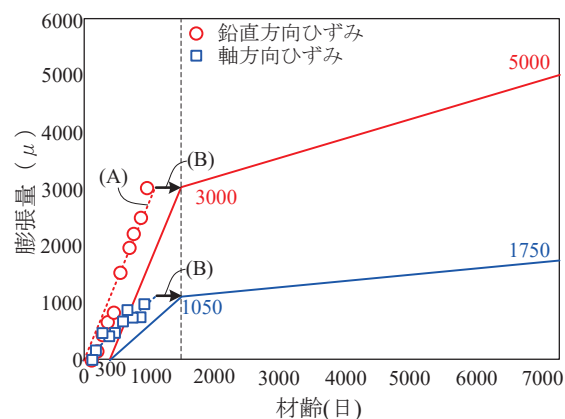


図-4 膨張ひずみモデル

図-4に膨張ひずみモデルを示す。解析では、ASRによる膨張ひずみを考慮するため、前述したRC供試体(帯鉄筋比0.41%、主鉄筋比2.97%)の膨張量計測結果を参考にした。なお、主鉄筋比は約3倍程度違うが、膨張と拘束関係³⁾から、鉄筋比1%以上では膨張ひずみはほぼ同程度であるため、RC計測結果を参考にした。計測値は、材齢100日頃から膨張ひずみが増加し続け、最終結果は鉛直方向 3000μ 、軸方向 1050μ 程度の膨張ひずみが計測された。本稿では、材齢300日以降を対象としているため、膨張傾向を模擬した近似直線(図中(A))のx切片を、材齢300日に補正した(図中(B))。また、終局値は、既往研究^{3),4)}を参考に仮定した。終局の

自由膨張量は低鋼材比で約5000 μ と確認されている。そのため、帯鉄筋方向は自由膨張すると仮定し、鉛直方向に5000 μ 、軸方向は鉄筋比が1%以上のため、膨張は非常に抑制されることから、RC計測結果の比率を参考に1750 μ (=5000 μ ×1050/3000)とした。以上より、本解析では、材齢300～1500日にかけ鉛直方向3000 μ 、軸方向1050 μ 、材齢1500～7300日にかけ鉛直方向5000 μ 、軸方向1750 μ の膨張ひずみを単調に与えることとした。なお、一般的にASRによる膨張は、進展期に急激に増加し、収束期に緩やかに増加する。その膨張変化を再現するため、進展期は3000 μ の急激な膨張と仮定し、収束期はその増加勾配2.5(=3000/1200)の約1/10程度とした。そのため、材齢20年までを考慮した解析を実施した。

3. 実験および解析結果

3.1 変形挙動

図-5に材齢1300日時点における実験および解析の変形状況を示す。実験値は、前述したディプスゲージの計測値を用いた。解析値は、計測点に相当する節点の変位を用いた。実験結果では、支点直上の桁上面位置(以下、端部)で1.46mm、1.48mm、中央部の桁上面位置(以下、中央部)では3.98mmの変形が生じた。解析結果では、端部1.47mm、中央部3.50mmの変位が生じ、実験結果とほぼ同様な変形が再現できた。また、軸方向には、上縁2.27mm、下縁1.08mmの伸びが生じた。上下で差が生じた要因としては、PC鋼線を偏心しているためと考えられる。

図-6に反り返り量の経時変化を示す。反り返り量は、中央部から端部を差し引いた値である。なお、解析値は、劣化開始した材齢300日時点をとった。

図より、実測値はほぼ単調に増加し、材齢1300日で2.50mmとなった。解析値は材齢300日から経時的に増加し続け、材齢1300日で2.02mmとなった。解析結果は実測とほぼ同様な傾向から、実験供試体で生じた反り返り変形を再現できた。

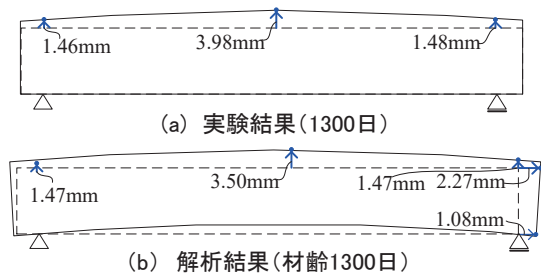


図-5 変形状況

3.2 鉛直方向への挙動

図-7に鉛直方向ひずみの経時変化を示す。図中に示すように、実測値は、コンタクトゲージを用いて100mmピッチを5区間、全5断面計測した平均値とした。解析値は、実測における計測箇所と対応する要素の平均値を算出した。図より、実測値は単調に増加し、材齢1300日で2224 μ となった。解析値は材齢300日から経時的に増加し続け、材齢1300日では2463 μ となり、実験値と概ね一致した。

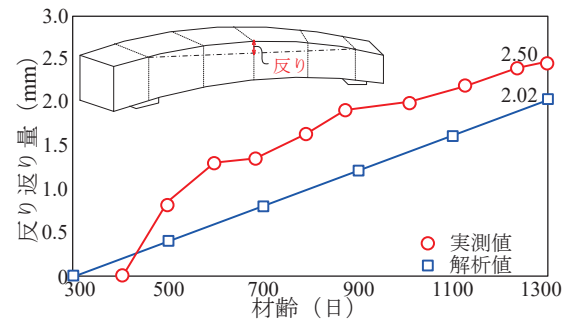


図-6 反り返りの経時変化

3.3 軸方向への挙動

図-8に解析の軸方向ひずみを示す。図には、初期と材齢1300日時点の中央部におけるひずみ量を示した。初期値は、プレストレスにより上縁-32 μ 、下縁-261 μ と供試体は圧縮され、下縁は上縁より229 μ 大きな圧縮ひずみが生じた。その後、膨張に伴い引張ひずみが増加し、材齢1300日で上縁756 μ 、下縁257 μ となり、初期値から平均で657 μ 増加した。また、上下のひずみ差は、PC鋼線の偏心により、鋼材比の大きい下部で膨張が拘束されたと考えられる。上下のひずみ差からなる曲率 ϕ は、初期

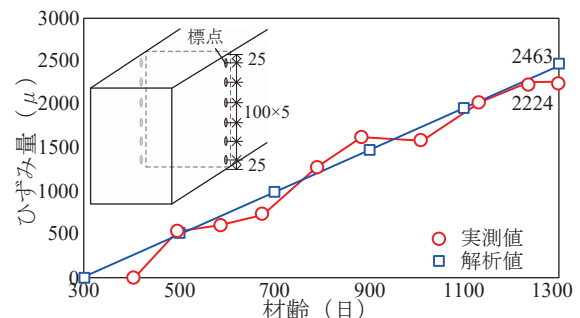


図-7 鉛直方向ひずみの経時変化

に対して大きくなり、材齢1300日時点において 9.10×10^{-7} ($=250\mu/275\text{mm}$)となった。

3.4 部材変形メカニズム

図-9に解析値と試算値の変形状況を示す。試算は解析で生じた各方向のひずみ結果を基に、以下のように行った。鉛直方向ひずみによる変形は、一様膨張に相当する変形であるため、試算値 1.35mm ($=2463\mu \times 550\text{mm}$)となり、解析値 1.47mm とほぼ一致した。次に、反り返りは上下のひずみ差で生じるため、曲率 ϕ から曲げによる変形を算出した。前述したように、 ϕ は 9.10×10^{-7} であることから、曲げによる変位 v は式(1)で求めた。

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

ここに、 L ：供試体中央までの長さ 2250mm したがって、試算値 v は 2.30mm となり、解析値 2.02mm と概ね一致する結果となった。以上から、部材変形は、鉛直方向ひずみによる一様膨張と上下のひずみ差からなる曲げ変形の重ね合せが生じていると考えられる。

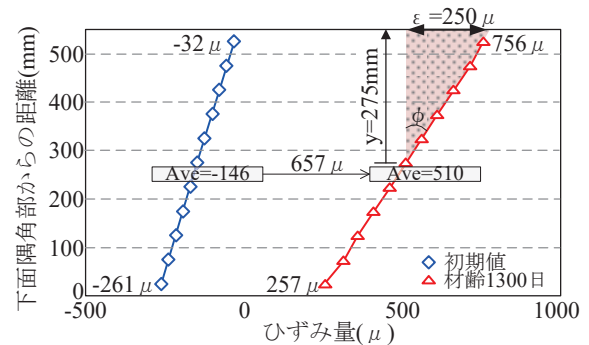


図-8 軸方向ひずみ

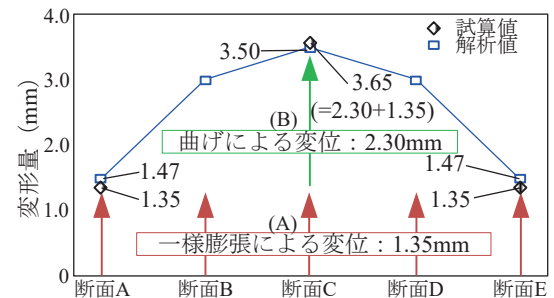


図-9 解析値と試算値の変形状況

4. 長期に亘る変形状況

4.1 解析概要

本章では、ASRが収束に至るとした材齢20年後の劣化予測モデルを用いて、長期に亘る変形挙動の検討を行った。劣化予測モデルについて、図-3, 4に示す。材料劣化としては、材齢1300日以降から約10%漸減させ、膨張ひずみとしては、材齢1300日以降から鉛直方向に約 2000μ 、軸方向に約 700μ 漸増させた。

4.2 変形挙動

図-10に材齢20年後の変形状況を示す。図から、鉛直方向に端部 2.87mm 、中央部 5.26mm の変位、軸方向に上縁 5.51mm 、下縁 4.10mm の伸びが生じた。材齢1300日から、鉛直方向は端部 1.40mm ($=2.87-1.47$)、中央部 1.80mm ($=5.26-3.50$)の変位増加が確認され、軸方向は上縁 3.24mm ($=5.51-2.27$)、下縁 3.02mm ($=4.10-1.08$)の変位増加が確認された。鉛直方向の変位増加は、鉛直方向ひずみによって生じた変形と曲率によって生じた曲げ変形であり、軸方向の変位増加は、軸方向ひずみによって生じた変形であると考えられる。

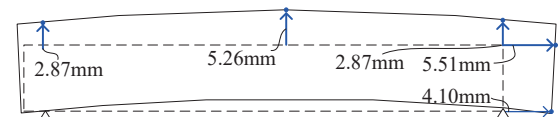


図-10 材齢20年後の変形状況

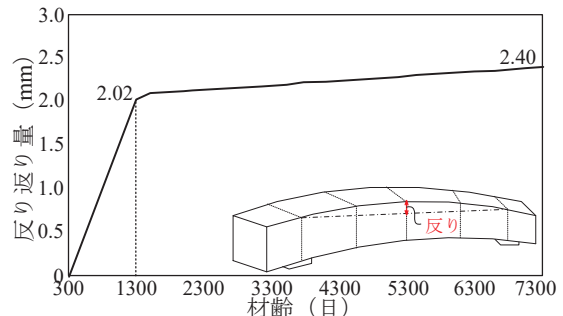


図-11 反り返りの経時変化

図-11に反り返り量の経時変化を示す。反り返りは材齢1300日以降、増加勾配は漸増し、材齢7300日時点で反り返り量は 2.40mm が確認された。そのため、材齢1300日から材齢7300日の反り返り増加量は 0.38mm と小さくなっていった。

図-12に反り返り量の経時変化を示す。反り返りは材齢1300日以降、増加勾配は漸増し、材齢7300日時点で反り返り量は 2.40mm が確認された。そのため、材齢1300日から材齢7300日の反り返り増加量は 0.38mm と小さくなっていった。

ここで、材齢1300日以降、反り返りが漸増した要因について、以下に考察する。過年度の研究では、本解析モデルのNo.4供試体を対象に、材齢300~1100日にかけて、膨張ひずみ(鉛直 2000μ 、軸 700μ)と材料劣化(50%低下)の両者を考慮したcase1、膨張のみを考慮したcase2、劣化のみを考慮したcase3を実施し、各パラメータによる反り返り影響度を検討している。

図-12にcase2, 3の結果について示す。図から、膨張ひずみのみを考慮したcase2では、 2000μ 膨張させ

た時に反り返り量0.2mmが生じ、材料劣化のみを考慮したcase3では、物性値50%低下した時に反り返り量0.8mmが生じた。反り返りは、膨張ひずみの増加と、圧縮強度および弾性係数の低下に対して比例関係が成り立つと仮定すると、case2から終局時5000 μ 膨張させた時には反り返り量0.5mm発生、case3から終局値60%低下時には反り返り量0.96mm発生すると予測される。よって、試算による20年後の反り返りの予測値は、膨張ひずみによる0.5mm、材料劣化による0.96mmを重ね合わせた1.46mmが反り返り増分として生じると予測される。この1.46mmにプレストレス導入時の反り返り1.0mmを足し合わせると2.46mmとなり、解析値2.40mmと比較すると概ね一致することが確認された。したがって、圧縮強度、静弾性係数は長期に亘り緩やかな低下が明らかになっているため、材齢20年の反り返り量2.40mmは材齢1300日から0.38mmの増加に留まったと推定される。

4.3 鉛直方向への挙動

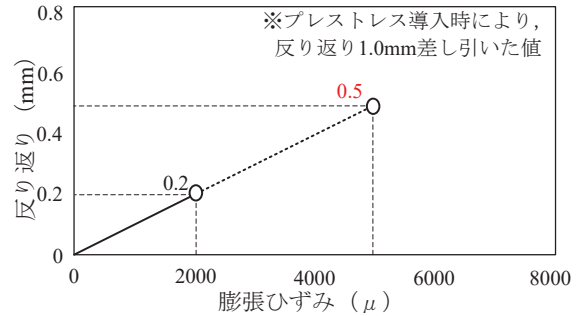
図-13に鉛直方向ひずみの経時変化を示す。前述したように、材齢300日から経時的に増加し続け、材齢1300日では2463 μ と確認された。その後、鉛直方向ひずみの増加勾配は小さくなり、材齢7300日で4981 μ のひずみ量が発生し、材齢1300日の約2倍のひずみ量となっていた。それに対して、図-11から反り返り量は材齢1300日から材齢7300日にかけて約1.2倍に留まっていた。これは、反り返りの主要因である物性値が材齢1300日以降漸減するため、鉛直方向ひずみが2倍増加するが、反り返りは1.2倍しか増加しないと考えられる。

4.4 軸方向への挙動

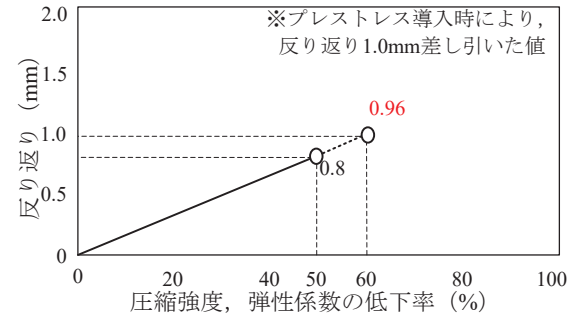
図-14に軸方向ひずみを示す。ASR膨張により、コンクリートに引張ひずみが作用し、材齢7300日時点で、上部1550 μ 、下部959 μ まで増加した。材齢1300日から平均750 μ 増加し、軸方向の一樣膨張増加分3.37mm(=750 μ ×4500mm)に概ね一致した。また、材齢1300~7300日に亘って、上下のひずみ差は46 μ (=296 μ -250 μ)しか増加しておらず、曲率 $\phi=1.65\times 10^{-7}$ (=46 μ /275mm)と確認され、反り返りは図-11のように材齢1300日以降漸増したと考えられる。

4.5 部材変形メカニズム

図-15に長期に亘る変形状況を示す。一樣膨張による変位増加1.40mmは、鉛直方向ひずみ2518 μ (=4981 μ -2463 μ)(図-13参照)の増加分に対する変形に相当し、曲げによる変位増加0.36mmは、曲率 ϕ (図-14参照)の増加分に対する変形に相当すると考えられる。そのため、長期に亘る部材変形メカニズムにつ



(a) 膨張ひずみcase2



(b) 材料劣化case3

図-12 case2, 3の結果

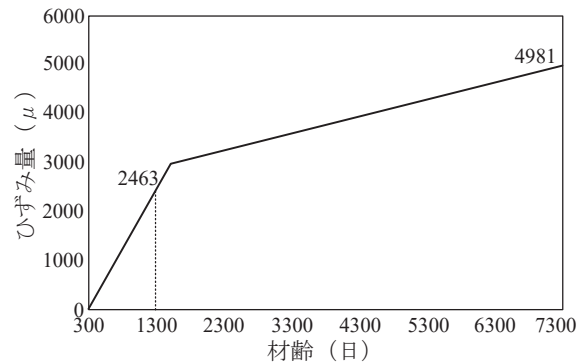


図-13 鉛直方向ひずみの経時変化

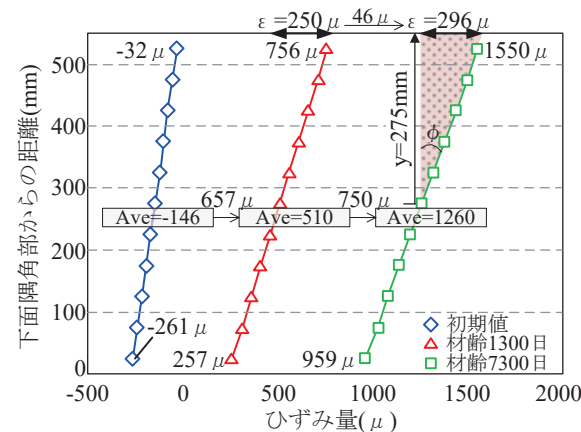


図-14 軸方向ひずみ

いて、以下の試算を行った。まず、一様膨張による変位の増加分は $1.38\text{mm}(=2518\mu\times 550\text{mm})$ と、解析値 1.40mm とほぼ一致した。次に、曲げによる変位の増加分は、曲率 $\phi=1.65\times 10^{-7}$ から式(1)より $v=0.42\text{mm}$ となり、解析値 0.36mm と概ね一致した。以上から、長期に亘る部材変形に関しては、鉛直方向ひずみの増加分からなる一様膨張と、曲率の増加分からなる曲げ変形の重ね合わせによって生じていると考えられる。

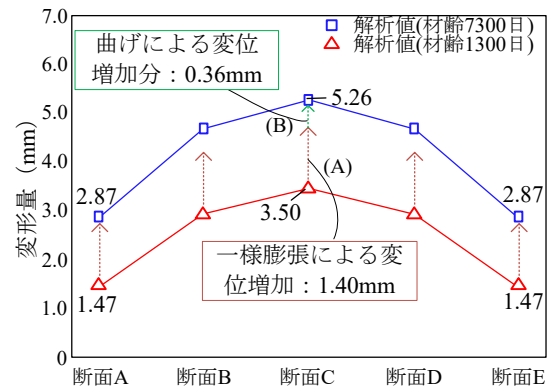


図-15 長期にわたる変形状況

5. まとめ

材齢1300日が経過したNo.4供試体の実験結果、および解析結果により、以下の知見を得た。

- 1) 供試体の変形状況は、実測値、および解析値ともに反り返り挙動が確認された。材齢1300日までに実験値 2.50mm 、解析値 2.02mm の反り返りが生じ、実験供試体の変形状況を概ね再現できた。また、反り返りは、解析からPC鋼線の偏心により、上下の軸ひずみ差が生じたことにより発生したと考えられる。
- 2) ASR劣化した実構造物の採取コアから、圧縮強度、弾性係数は長期に亘り緩やかな低下が明らかである。そのため、劣化予測モデルの圧縮強度、弾性係数の低下は小さいため、材齢20年の反り返り 2.40mm は、材齢1300日から 0.38mm の増加に留まったと推定される。
- 3) 材齢1300日から7300日にかけて、上下の軸ひずみ差は 46μ 増加し、曲率 1.65×10^{-7} が確認された。曲率から曲げ変形を算出した結果 0.42mm となり、解析値 0.36mm と概ね一致した。以上から、長期に亘る反り返りは、曲率の増加分により発生すると考えられる。

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) 幸左賢二, 久利良夫, 川島恭志, 三浦正嗣: ASR構造物より採取したコアの力学的特性に関する研究, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.1036-1047, 2009
- 3) 土木学会: アルカリ骨材反応対策委員会報告書, 第2編, pp.116, 2005
- 4) 立屋敷久志, 窪山潔, 高田潤, 中村亨: 大型供試体によるアルカリ骨材反応の劣化特性, コンクリート工学年次論文集, vol.12, No.1, pp.801-806, 1990