

報告 構造物の表面と内部のコンクリートの収縮量の違いを考慮した鉄道 ラーメン高架橋の有限要素解析による一考察

坂口 淳一*1・土屋 智史*2・高橋 良輔*3・渡辺 忠朋*4

要旨：本検討では、鉄道のラーメン高架橋を対象に、構造物の表面と内部のコンクリートの収縮量の違いを考慮した解析を行うことで、コンクリートの収縮量の分布が構造物の応答に及ぼす影響を検討した。解析には、材料の非線形性を考慮した3次元の有限要素解析モデルを用いた。材料-構造連成応答解析から得られた構造物の表面から内部への収縮量の分布の経時変化を整理し、これをラーメン高架橋モデルへの入力として、部材内の収縮量の分布の取り扱いをパラメータとした解析を実施した。その結果から、コンクリートの収縮の取り扱いの違いによる変形やひび割れの発生状況の違い、鉄筋応力などの応答を確認した。

キーワード：有限要素解析, 3次元モデル, 収縮, ラーメン高架橋

1. はじめに

非線形有限要素解析は、鉄筋コンクリート構造物の性能照査への活用が進められている。土木学会コンクリート標準示方書〔設計編〕¹⁾には、照査方法が記載されており、同〔維持管理編〕²⁾においても、非線形有限要素解析による性能評価が取り入れられている。今後、非線形有限要素解析は、CIMに関連した3次元モデルとの連携の容易さや、既設構造物の性能評価において構造物内の位置の違いによる材料特性の違いやひび割れの影響を直接的に考慮できる等の利点から、構造解析手法として積極的に用いられていくものと考えられる³⁾。

コンクリートの収縮は、鉄筋コンクリート構造物において、応力の変化やひび割れ挙動に影響を及ぼすことから、構造物の応答を精緻に得るための重要な作用の一つである。鉄道のラーメン高架橋のような不静定構造物の照査を、骨組解析により行う場合には、コンクリートの収縮による影響は、不静定力の解析に用いるコンクリートの収縮ひずみ ϵ'_{cs} を上層の梁部材に考慮することで、設計断面力に考慮されてきた⁴⁾。一方、有限要素解析による構造解析においては、収縮の影響はコンクリートの引張強度を6~8割程度に低減することで間接的に考慮することが多い⁵⁾。本研究のように、拘束度合いが異なる様々な形状からなる不静定次数の高い構造物が対象となる場合、十分な養生を行ったとしても初期にひび割れが生じる場合もあり、引張強度を一律に低減するだけでは十分な精度が得られない可能性がある³⁾。

有限要素解析による構造解析において、コンクリートの収縮の影響をより精緻に考慮する方法として、構造物内の位置による違いを直接的に考慮できる利点を活かすことで、構造物の表面と内部で異なる収縮量を、要素ご

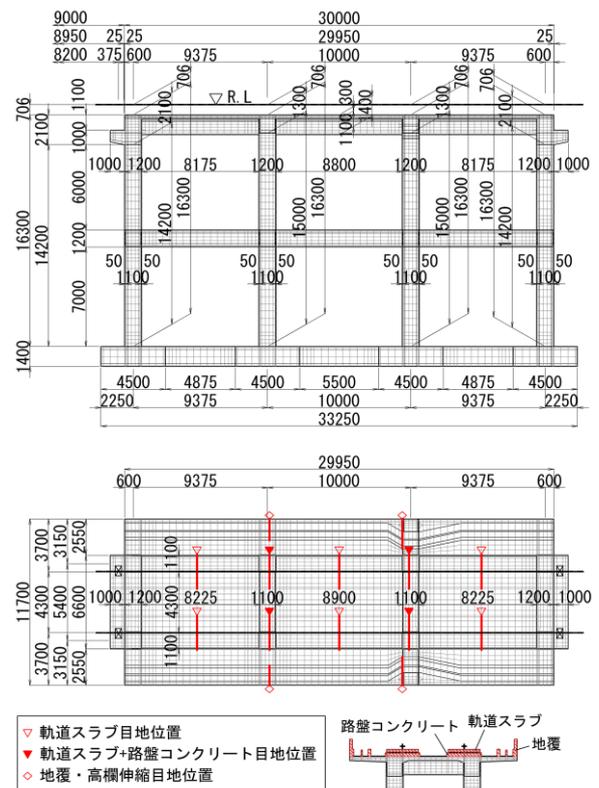


図-1 対象構造物

とに経時的に変化させて作用させることが可能であり、コンクリートの収縮に対して、鉄筋の拘束による内的な不静定や、構造物の部材相互による外的な不静定に起因する応力の変化やひび割れ挙動を考慮して、構造物の応答を求めることができる。

そこで本検討では、鉄道のラーメン高架橋を対象に、非線形有限要素解析を用いて、構造物の表面と内部のコンクリートの収縮量の違いを考慮した解析を行い、部材

*1 北武コンサルタント (株) 技術本部 修士(工学) (正会員)

*2 (株) コムスエンジニアリング 博士(工学) (正会員)

*3 秋田大学大学院 理工学研究科 システムデザイン工学専攻准教授 博士(工学) (正会員)

*4 北武コンサルタント (株) 博士(工学) (正会員)

内の収縮量分布が構造物の応答に及ぼす影響を検討する。

2. 対象構造物および検討内容

2.1 対象構造物

本検討では、図-1 に示す 2 層 3 径間の RC ビームスラブ式の鉄道ラーメン高架橋を対象に、解析を実施する。軌道構造は、複線のスラブ軌道である。

2.2 検討ケース

検討ケースを、表-1 に示す。本検討では、部材内のコンクリートの収縮の分布を変数として検討を実施する。部材内のコンクリートの収縮の分布については、4 章に示す部分モデルを用いた材料-構造連成応答解析により求めた自由収縮ひずみの径時変化の解析結果に基づき、構造物の表面からの深さに応じて収縮量を変化させて与える場合 (Case2) と、部材内に一律の収縮ひずみを与えた場合 (Case3) の解析を行う。

3. 解析条件

3.1 解析モデル

解析モデル図を、図-2 に示す。解析モデルは、節点数 96,924 節点、要素数 75,324 要素である。解析モデルにおいては、路盤コンクリートと軌道スラブ、地覆等の版上構造を、解析モデルに考慮している。なお、高欄は PC 版が用いられることを想定して考慮していない。ただし、版上構造の収縮目地の位置を、図-1 中に示した位置に想定し、節点を共有せずに要素を分離する。

直接基礎の下面には、地盤ばねを模擬した Bond 要素を配置する。その剛性は、鉛直方向については、閉合時には $k_v = 47,400 \text{ kN/m}^3$ 、開口時には抵抗しないものとする。せん断方向には、 $k_s = 15,800 \text{ kN/m}^3$ の剛性を与える。

コンクリートの材料特性は、ラーメン構造物本体と版上構造のうち路盤コンクリートと地覆を圧縮強度 $f_c = 27.0 \text{ N/mm}^2$ 、軌道スラブを圧縮強度 $f_c = 40.0 \text{ N/mm}^2$ 、路盤コンクリートと軌道スラブの間に敷設される CA モルタルを $f_c = 3.0 \text{ N/mm}^2$ とする。なお、全体モデルによる応答解析においては、コンクリートの材齢による力学特性の経時変化や、クリープによる影響を考慮していない。鉄筋は、上層部および版上構造を降伏強度 $f_{sy} = 345 \text{ N/mm}^2$ (SD345)、柱および中層梁と地中梁と基礎を $f_{sy} = 390 \text{ N/mm}^2$ (SD390) とする。各部材の配筋量は、最新の設計基準⁴⁾に基づき設計された結果に基づき設定しているが、紙面の都合上、詳細は割愛する。

鉄筋コンクリートの材料非線形性には、土木学会コンクリート標準示方書 [設計編：標準]「10 編 非線形有限要素解析による性能照査」に準じた分散ひび割れモデルによる材料構成則^{1), 6)}を用いる。

表-1 検討ケース

解析ケース	部材内のコンクリートの収縮の分布
Case 1	収縮を考慮しない
Case 2	考慮
Case 3	無視 (部材内一律)

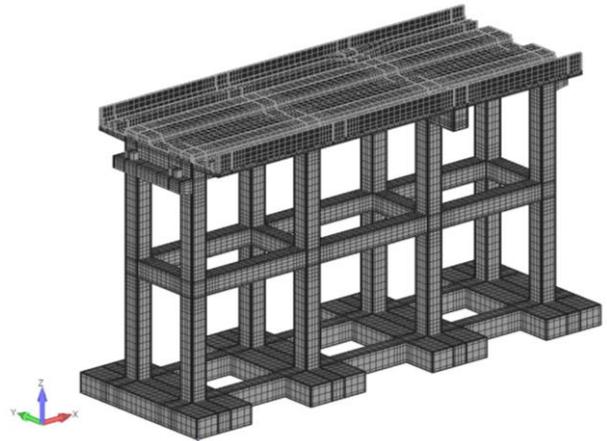


図-2 解析モデル (全体モデル)

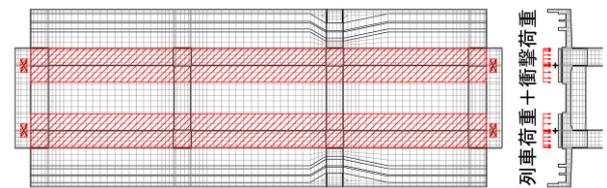


図-3 列車荷重+衝撃荷重の載荷範囲

3.2 作用と解析ステップ

本解析では、作用として構造物本体と版上構造の自重と列車荷重+衝撃荷重、コンクリートの収縮を考慮する。

構造物の自重は、各要素に設定した質量に重力加速度を与えると同時に、要素として考慮していない高欄やレールと締結装置、電柱荷重を節点荷重により与える。

列車荷重+衝撃荷重は、列車荷重を 1 軌道あたり 32.0 kN/m、衝撃係数を $i=0.207$ とし、1 軌道あたり 38.6 kN/m を図-3 に示す軌道スラブ上面の範囲に分布させて複線に載荷する。なお、ラーメン高架橋に隣接する調整桁の自重と列車荷重+衝撃荷重による反力は、桁受けの支承の位置に載荷することで考慮する。

収縮を考慮するケース (Case2, 3) においては、材齢 14 日、28 日、59 日、90 日、0.5 年、1 年、1.5 年、2 年、3.5 年、5 年、7.5 年、10 年、15 年、20 年、25 年、30 年、35 年、40 年、45 年、50 年の刻みで、収縮ひずみを変化させる Step 解析を行う。このとき、材齢 1 年のときに列車荷重+衝撃荷重を載荷し、材齢 50 年まで載荷し続ける。

4. 部分モデルによる収縮ひずみの経時変化の解析

4.1 解析条件

前章に示したラーメン高架橋の解析ケース Case2, 3 の収縮ひずみの入力値を、材料-構造連成応答解析ツールを用いた解析の結果から設定する。この解析ツールにおいては、セメントの水和反応、空隙構造形成、水分保持・移動の微視的挙動に着目した基本モデルによって、コンクリートの経時変化が追跡される。ここでは、自重を含む荷重作用を載荷しない条件の下で、コンクリートの収縮量の部材内の分布と、その経時変化を求める。

材料-構造連成応答解析は、図-4 に示す構造物の代表箇所を取出した部分モデルを用いて行う。部分モデルは、構造物全体の起点から 2 列目の C2 列周辺の線路直角方向ラーメンである。

収縮量の部材内の分布と経時変化を算出するための部分モデルによる解析は、材齢 50 年まで解析を実施する。解析においては、全要素を一斉に打設したものととして解析する。その際の各部位の構造物表面の境界条件として、相対湿度 RH は、一般部（上層部の側面および底面、柱、中層梁） $RH=60\%$ 、雨掛かり部（版上構造の上面および側面） $RH=70\%$ 、地中部（基礎、地中梁の上下面および側面） $RH=80\%$ に仮定した。ただし、材齢 9 日まで構造物表面を封緘とし、それ以降に乾燥開始として解析している。また、全体モデルからの切断面にあたる部分モデルの端部の断面は、封緘の条件としている。温度はすべて 20°C 一定とした。一般部、CA モルタル部、軌道スラブ部で異なる配合を設定している。

4.2 解析結果

部分モデルによる材料-構造連成応答解析の結果として、自由収縮ひずみコンター図の例を図-5 に示す。解析から、図に示すように、材齢に応じて自由収縮ひずみの構造物表面や内部の空間的な分布が得られた。

コンクリートの収縮の一因は、コンクリート中の水分が構造物の表面から逸散することによるものであることから、ここで得られた自由収縮ひずみを、表面の相対湿度の条件ごとに、構造物表面から要素中心までの距離に対して整理を行い、構造物全体モデルに適用することとする。なお、材齢に応じてコンクリートの強度やヤング係数も変化するが、構造物全体モデルのコンクリートの材料特性には反映していない。材料定数の変化も踏まえて、 $\epsilon = \alpha \cdot \epsilon_{\text{free}}$ として、自由収縮ひずみに係数倍したものを入力値とすべきと考えられるが、ひとまず $\alpha=1.0$ として検討を行う。

各要素の構造物表面から要素中心までの距離のコンター図を、図-6 に示す。図に示す要素中心深さは、構造物表面から各要素の中心までの深さの最小値を示したものである。深さは、25mm から 800mm 程度の範囲に分

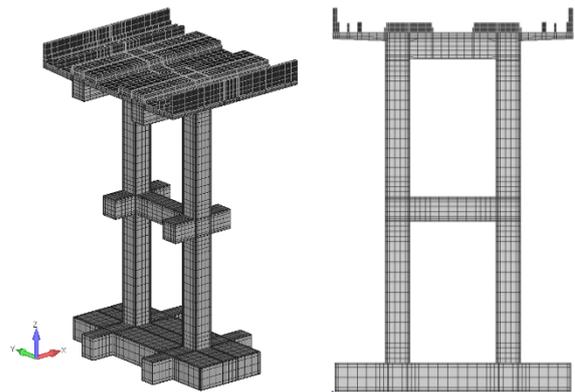


図-4 材料-構造連成応答解析用の部分モデル (C2 ラーメン周辺)

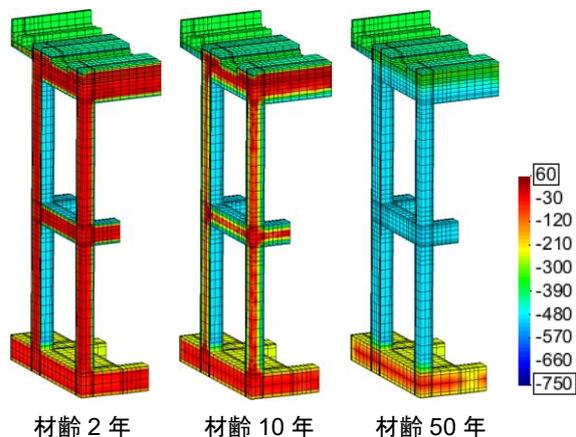


図-5 自由収縮ひずみコンター図

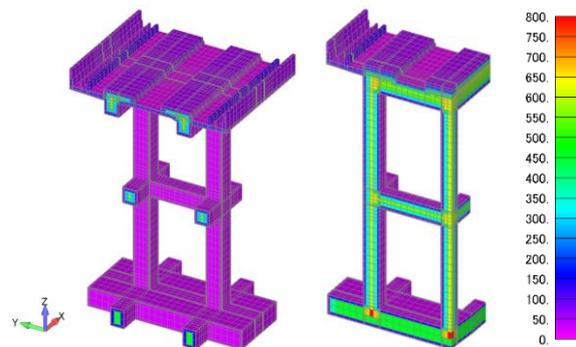
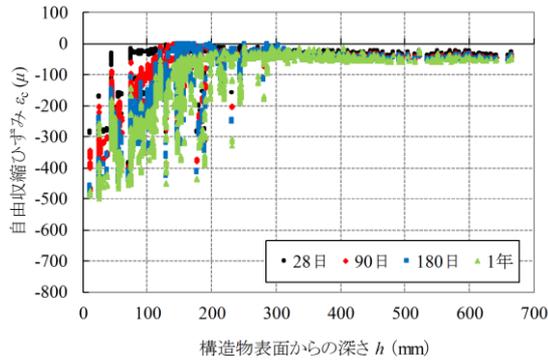


図-6 構造物表面から要素中心までの距離 (mm)

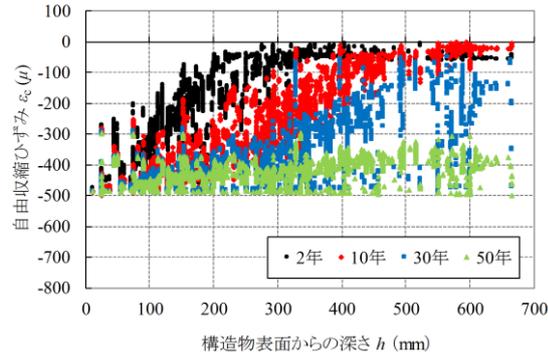
布しており、部材の中心や接合部の内部で深い。

構造物表面から要素中心までの距離に対する、部分モデルの各要素の構造物内の自由収縮ひずみの分布の例として、本体地表部（表面の相対湿度 $RH=60\%$ ）の場合の分布を、図-7 に示す。図は、材齢 28 日～1 年と材齢 2 年～50 年に分けて示しているが、図-7(a)の材齢が若い段階では、構造物表面に近い要素で収縮ひずみが大きく、内部では小さいことがわかる。一方、材齢が 50 年に達すると、表面と内部で収縮ひずみの差は殆ど無い。

図-7 に例を示した各要素の自由収縮ひずみの構造物表面から深さ 50mm ごとの範囲の平均値の分布を図-8 に示す。部材内のコンクリートの収縮ひずみの分布を考



(a) 短期 (材齢 28 日~1 年)



(b) 長期 (材齢 2 年~50 年)

図-7 自由収縮ひずみと構造物表面からの深さの関係
(例：本体地表部 (表面の相対湿度 RH=60 %))

慮する Case2 では、この図に示した材齢ごとの自由収縮ひずみの分布に基づきひずみの分布を設定する。

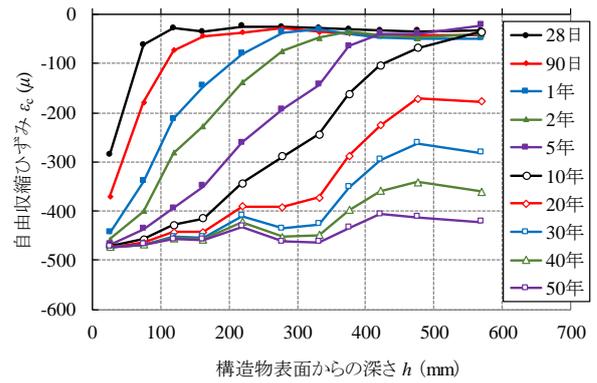
また、図-9 には、構造物表面から 500mm までの範囲の平均値を示した。ここに示す平均値は、表面の相対湿度の条件ごとに、図-8 に示した自由収縮ひずみを構造物表面から 0~500 mm の範囲で平均化したものである。ここで、平均化の範囲は、対象構造物の寸法から、梁や柱の幅や高さの半分として設定したものである。この図に示した、材齢ごとの自由収縮ひずみの平均値を、部材一律に収縮ひずみを与える Case3 に用いる。

なお、本検討では、ラーメン高架橋の部分モデルを用いて自由収縮ひずみを算出しているが、実務的には配合と環境条件ごとに、1 次元的な条件でのモデルにより算出することで、精度を保ちつつ、算出労力を低減可能と考えられる⁸⁾。

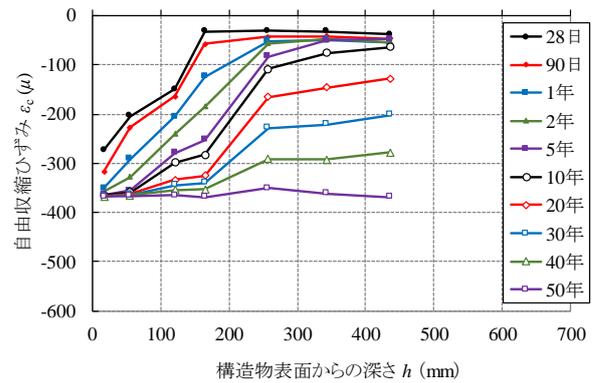
5. 収縮を考慮したラーメン高架橋全体モデルの解析

5.1 変形状況

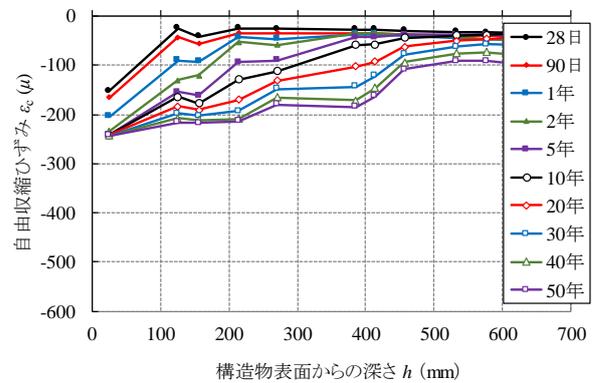
収縮を考慮した場合の、倍率を 500 倍とした変形図の例を、図-10 および図-11 に示す。3.2 節に述べたとおり、材齢 1 年以降は、列車荷重+衝撃荷重が載荷された状態の応答である。図-11 より、収縮ひずみの考慮により、経時的に変形が増加している。なお、地中部に比べて上層部が収縮しているのは、図-8 に示したとおり、



(a) 本体地表部：表面の相対湿度 RH=60 %



(b) 版上構造：表面の相対湿度 RH=70 %



(c) 本体地中部 (基礎)：表面の相対湿度 RH=80 %

図-8 構造物表面から深さ 50mm ごとの範囲の自由収縮ひずみの平均値と構造物表面からの深さの関係

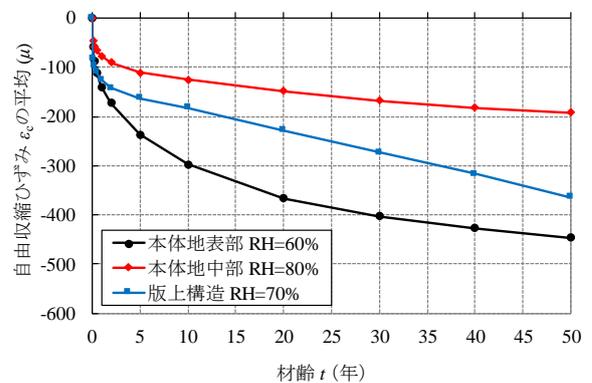


図-9 構造物表面から 500mm までの範囲の自由収縮ひずみの平均値と材齢の関係

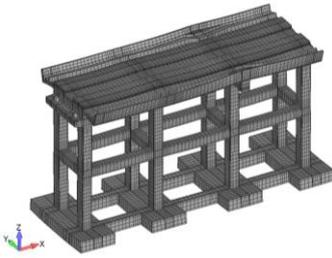
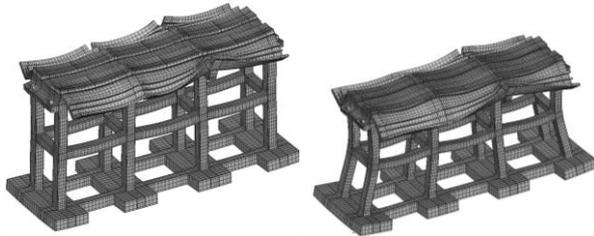


図-10 変形図 Case1 変形倍率 500 倍



(a) 2 年後 (b) 50 年後

図-11 変形図 Case2 変形倍率 500 倍

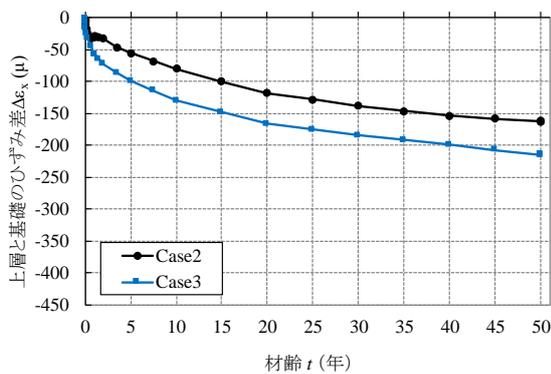


図-12 上層と基礎のひずみ差 $\Delta \epsilon_x$ の経時変化

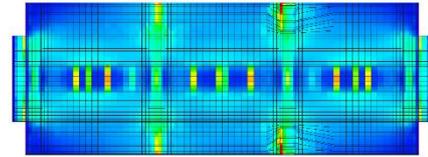
地中部に比べて一般部の収縮量が大きいためである。

図-12には、線路方向の伸縮量に基づき算出した、上層部（軌道階）と基礎のひずみ差 $\Delta \epsilon_x$ の経時変化を示した。図に示した線路方向のひずみ差 $\Delta \epsilon_x$ は、両端部の柱の接合部間の線路方向の相対変位を、両端部の柱間距離 28.750m で除すことで得られる線路方向のひずみについて、上層と基礎で差をとったものである。

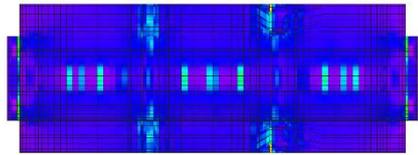
図より、算出された上層と基礎のひずみ差 $\Delta \epsilon_x$ は、骨組解析において考慮される、不静定力の解析に用いるコンクリートの収縮ひずみ $\epsilon'_{cs}=150 \mu^4$ に近似した値となっている。なお、Case2 でひずみ差 $\Delta \epsilon_x$ が小さいのは、ひび割れが発生することでコンクリートの引張応力が解放され、上層部の変形が小さくなるためと考えられる。

5.2 ひずみ分布

線路方向の直ひずみのコンター図を、図-13 および図-14 に示す。図は、ラーメン本体の上層部の上面側を示しており、図に示すひずみは、線路方向のひずみであり、収縮ひずみを含んだ値を示している。

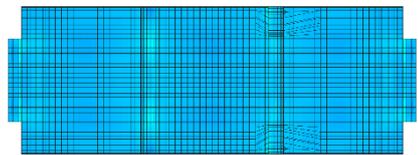


(a) 2 年後

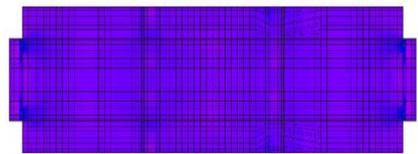


(b) 50 年後

図-13 線路方向ひずみ Case2 上層部の上面側



(a) 2 年後



(b) 50 年後

図-14 線路方向ひずみ Case3 上層部の上面側

図より、部材内のコンクリートの収縮分布を考慮した Case2 において、中間スラブにひずみの増加が見られ、線路直角方向のひび割れが生じている。材齢の比較的若い段階にひび割れが生じており、材齢 50 年においてもひずみが残留している（図-13）。同様のひび割れは、実構造物において施工後の早い段階に見られる。よって、収縮ひずみの分布と、時間変化を考慮することで、実構造物のひび割れ性状の再現が可能となる。

一方、Case3 においては、このひび割れ損傷は再現できていない。これは、いずれのケースも、構造物の表面からの深さに関わらず、ほぼ同じ収縮ひずみを与えられるため、構造物の部材相互による拘束や、部材内部のひずみ差による拘束が再現されず、ひび割れが発生しなかったものと考えられる。

5.3 鉄筋の応力

鉄筋の応力の分布として Case2 の上層部の上面の縦梁と中間スラブの線路方向の鉄筋の応力分布を、図-15 に示す。鉄筋の応力は、引張側を正の符号で示している。

図より、上層縦梁の上面側においては、ひび割れは発生せずに全体が圧縮側に分布しており、材齢の経過に伴い圧縮側に変化している。中間スラブにおいては、前節

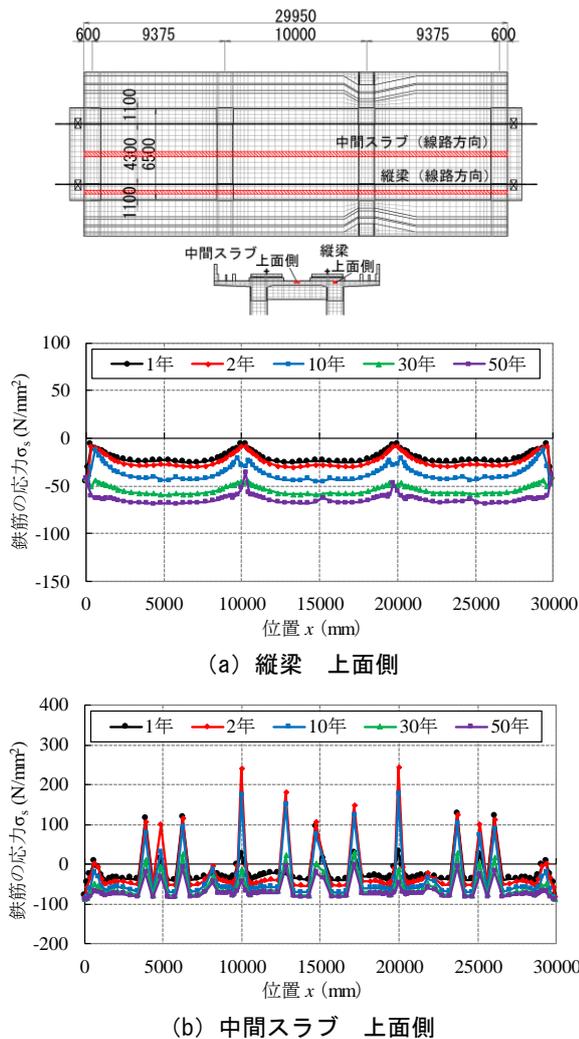


図-15 線路方向の鉄筋の応力の分布 Case2

で述べたひび割れ発生位置で鉄筋に引張応力が生じているが、その他の位置では、圧縮側の応力となっている。

6. まとめ

本検討では、鉄道のラーメン高架橋を対象に、構造物の表面と内部のコンクリートの収縮量の違いを考慮した解析を行うことで、収縮量分布が構造物の応答に及ぼす影響を検討した。本検討の範囲内において、解析結果から以下の事項が確認された。

1. 材料-構造連成応答解析から得られた構造物表面から内部への収縮量の分布の経時変化を、構造物全体モデルに与えることで、コンクリートの収縮による構造物の応答を解析した。このとき、地表部や地中部、雨掛り部ごとに、構造物の表面の相対湿度の条件を変えて収縮ひずみを設定することで、上層部と基礎部の収縮ひずみの差を再現した。
2. 部材内の収縮量の分布の取り扱いをパラメータとした解析を行った。その結果、部材内のコンクリートの収縮分布を考慮したケースのみ、材齢の比較的

若い段階に中間スラブにひび割れが発生を伴うひずみの増加が見られ、実構造で観察される収縮ひび割れ性状の再現ができた。

3. 鉄筋の応力分布を見ると、ひび割れが発生しない部位には、コンクリートの収縮により圧縮の鉄筋応力が分布し、材齢の経過に伴い圧縮側に変化した。ひび割れが発生した部位では、ひび割れ発生位置のみで引張応力が生じ、その周辺は圧縮の応力となった。
4. 以上の結果から、骨組解析に用いられる不静定力の解析に用いるコンクリートの収縮ひずみの考慮や、非線形有限要素解析において引張強度を低減させる方法では、ラーメン高架橋でみられる収縮挙動を適切に考慮できていないものと考えられる。

謝辞

本検討にあたり、土木学会コンクリート委員会 コンクリート構造物の設計と連成型性能評価法に関する研究委員会 (351 委員会, 委員長: 牧剛史教授 (埼玉大学大学院)) の委員の皆様より、貴重なご意見を頂きました。この場を借りて、深謝の意を表します。また、解析ツール (DuCOM-COM3) は、前川宏一教授 (横浜国立大学大学院) よりお借りしました。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会：2017 年制定 土木学会コンクリート標準示方書 [設計編], 2018
- 2) 土木学会：2018 年制定 土木学会コンクリート標準示方書 [維持管理編], 2018
- 3) 土木学会：コンクリート構造物の設計と連成型性能評価法-時空間性能評価技術の未来予想図-, コンクリート技術シリーズ 113, 土木学会, 2017.6
- 4) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説, コンクリート構造物, 2004.4
- 5) 出雲淳一, 島弘, 岡村甫：面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文集, 第 25 巻, 第 9 号, pp.107-120, 1987.9
- 6) Maekawa, K., Pimanmas, A. and Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, London, 2003
- 7) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multi-scale modeling of concrete performance integrated material and structural mechanics, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol.1, No.2, pp.91-126, 2003
- 8) 水野希典ら：使用材料および施工方法に起因するトンネル覆工のひび割れに関する考察, 土木学会論文集 F1 (トンネル工学), Vol. 75, No.1, pp.88-106, 2019.9