

沈埋トンネルの複合劣化解析に関する基礎的検討

米田 大樹*1・土屋 智史*2・米津 薫*2

A Fundamental Study on Analysis with Composite Deterioration of Immersed Tunnel

Taiju YONEDA, Satoshi TSUCHIYA, Kaoru YONETSU

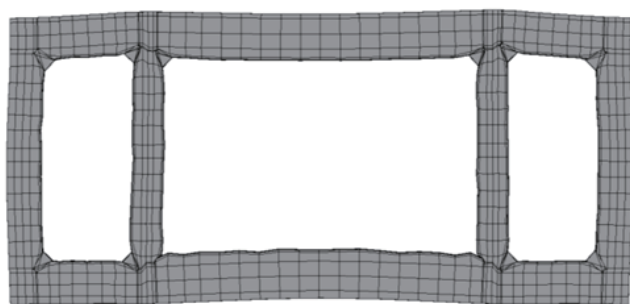


図-1 材齢 30 年の変形図（鉄筋腐食による膨張が現れている）



図-2 材齢 30 年の腐食量分布

研究の目的

限られた予算の中でコンクリート構造物を効率的に維持、運営、管理していくためには、構造物の使用性、安全性、耐久性を適切に評価し、対策を講じていくことが必要となる。特に、構造物の挙動を定量的かつ高精度に評価・予測することは、維持管理戦略を立案する上で重要である。本稿は、既設コンクリート構造物の中性化や塩害といった材料の複合的な劣化から構造性能の変化までを、解析を用いて一元的に評価することを試みたものである。

技術の説明

コンクリート構造物の長期耐久性や構造性能に関する経時変化について、東京大学コンクリート研究室で開発されたマルチスケール統合解析システム（DuCOM-COM3）を用いて解析的に追跡した。対象として、塩害が確認されている既設の地中道路トンネル（沈埋トンネル）を本検討のモデルケースとして選定した。解析は、熱、水分、塩化物イオン、二酸化炭素、酸素の 5 つの環境条件の個々の影響および複合の影響について、施工から 30 年後までの解析を実施した。さらに、各ケースともに 30 年後に静的震度によるプッシュオーバー解析を実施した。

主な結論

- 適切な要素分割および解析ステップの設定により、コンクリートの乾燥収縮、塩害、中性化が生じる環境下においても、所定のステップまで安定した収束解を得られることが確認できた。塩害、中性化による鉄筋の腐食と構造性能の連成についても解析的に評価することができた。
- 鉄筋の腐食量は、塩害と中性化が複合作用する場合、中性化単体による腐食量と塩害単体による腐食量の単純な足し合わせとならない解析結果が得られた。また、腐食位置については、トンネル内側のみとなり、酸素の供給がない場合には、塩化物イオンが存在しても腐食進行しない解析結果が得られた。
- 施工から 30 年後に静的加速度によるプッシュオーバー解析を実施した。各壁部材の静的震度一層間変形角関係より、鉄筋が腐食した連成解析の場合には、構造解析のみの結果に比べて剛性が低下する傾向が得られた。しかし、材齢 30 年後のいずれの解析ケースにおいてもせん断破壊は生じておらず、また耐力の大きな低下も見られない結果となった。

*1 本店 技術研究所

*2 株式会社コムスエンジニアリング

沈埋トンネルの複合劣化解析に関する基礎的検討

米 田 大 樹*¹ 土 屋 智 史*²
米 津 薫*²

要 旨

コンクリート構造物の挙動を高精度に予測することは、維持管理戦略を立案する上で重要となる。本研究では、統一的な物理・化学モデルに立脚した材料モデルによる3次元解析システムを活用し、乾燥収縮、中性化、塩害といった複合劣化を考慮した沈埋トンネルの30年後までの劣化および構造性能について解析を実施した。解析の結果、複合劣化の進行によって部材剛性は低下するが、耐力は維持されることが確認された。

キーワード 複合劣化／塩害／中性化／腐食／耐震／耐久性／解析

目 次

- | | |
|----------|------------|
| 1. はじめに | 4. 解析のモデル化 |
| 2. 解析手法 | 5. 解析結果 |
| 3. 対象構造物 | 6. まとめ |

A FUNDAMENTAL STUDY ON ANALYSIS WITH COMPOSITE DETERIORATION OF IMMERSED TUNNEL

Taiju YONEDA
Kaoru YONETSU

Satoshi TSUCHIYA

Synopsis:

Forecasting the behavior of concrete structures with high accuracy is important for planning maintenance management strategies. In this study, structural performance of the immersed tunnel is analyzed in consideration of complex deterioration such as dry shrinkage, carbonation and salt damage. Deterioration behavior of the immersed tunnel is evaluated by analysis of a three-dimensional analysis system based on a physical / chemical model, until 30 years after construction. As the result of the analysis, it is confirmed that although the member stiffness is lowered due to the progress of composite deterioration, the flexural capacity is maintained.

* 1 本店 技術研究所

* 2 株式会社コムスエンジニアリング

1. はじめに

限られた予算の中でコンクリート構造物を効率的に維持、運営、管理していくためには、構造物の使用性、安全性、耐久性を適切に評価し、対策を講じていくことが必要となる。特に、構造物の挙動を定量的かつ高精度に評価・予測することは、維持管理戦略を立案する上で重要である。

コンクリート構造物の中性化や塩分浸透は構造物の耐久性に大きな影響を及ぼすため、個々の現象については多数の研究が実施されてきた。また、鉄筋が腐食した際の構造性能の低下に関しても多数の研究が行われている。一方、物理・化学現象に基づく一元的な材料モデルに立脚して劣化現象を考慮し、コンクリート構造物の鉄筋腐食やひび割れ等による構造性能の変化まで統一的に検討した事例は少ない。さらに、鉄筋腐食量は、中性化や塩害が個別に作用した場合よりも、複合した場合の影響が大きい可能性が考えられる。

そこで本稿は、既設コンクリート構造物の中性化や塩害といった材料の複合的な劣化から構造性能の変化までを、個々の劣化要因に着目しながら解析を用いて一元的に評価することを試みたものである。

2. 解析手法

材料の複合的な劣化から構造性能の変化までの挙動を一気通貫で評価するための解析ツールには、地震時挙動等の構造応答を評価でき、かつ鉄筋腐食等による劣化現象を追跡可能なモデル群が実装されていなければならない。そこで本検討では、東京大学コンクリート研究室で開発されたマルチスケール統合解析システム（DuCOM-COM3）¹⁾を用いることとした。本システムは、セメントの水和反応の進展、硬化体の空隙構造形成、内部の水分状態といったコンクリート内部の微視的挙動に関するモデル群を実装した熱力学連成解析システム（DuCOM）²⁾と、鉄筋コンクリートの巨視的応答・損傷を追跡可能な非線形動的 RC 構造解析システム（COM3）^{3),4)}を統合したものである。

DuCOM は、時々刻々と変化するコンクリートの材料レベル（微視的レベル）におけるセメント系複合材料組織と巨視的構造の形成していく過程を、一般環境条件と荷重条件の元で逐次計算する。さらに、オプションとして酸素、二酸化炭素、塩化物イオン、カルシウムイオン等を対象物質とした物質・運動量と化学エネルギーの生成・移動との連成が可能となっている（図-1）^{1),2)}

COM3 は、ひび割れ、降伏、終局へと至る鉄筋コンクリート構造物の巨視的応答の追跡が可能な非線形動的 RC 構造解析システムである。COM3 に適用されている構成則は、30 年以上に及ぶ研究開発の結果、高い精度と適用性が確立されており、各種 RC 構造物・部材に対する適用を通して検証が行われている。さらに、新設構造物だ

けでなく、鉄筋腐食やアルカリ骨材反応による鉄筋破断の考慮、疲労荷重に対する応答評価の枠組み等、既設構造物を対象とした性能評価解析も可能となっている^{3),4)}。

現時点で著者らの知る限りにおいて、材料の複合劣化から構造性能までを一元的に考慮可能な解析システムとしては、DuCOM-COM3 以外には存在しない。

3. 対象構造物

コンクリート構造物の長期耐久性や構造性能に関する経時変化を解析的に追跡することを目的に、解析モデルの適用性や最適なモデル化方法の検討に適した構造物として、塩害が確認されている既設の地中道路トンネル（沈埋トンネル）を本検討のモデルケースとして選定した（図-2）。

トンネルの様な構造物に対しては、2 次元解析で十分とも考えられる。しかし、飛来塩分等の劣化因子はトンネル内面以外に施工ジョイント部からもコンクリート内部に浸透すると推測される。そこで本検討では、トンネルの施工ジョイント部近傍を解析対象とし、奥行方向にも若干の厚さを考慮することで、トンネル内面と施工ジョ

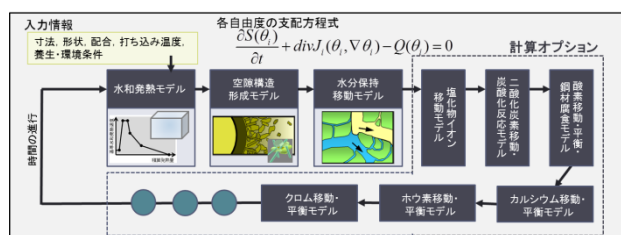


図-1 DuCOM の計算^{1),2)}

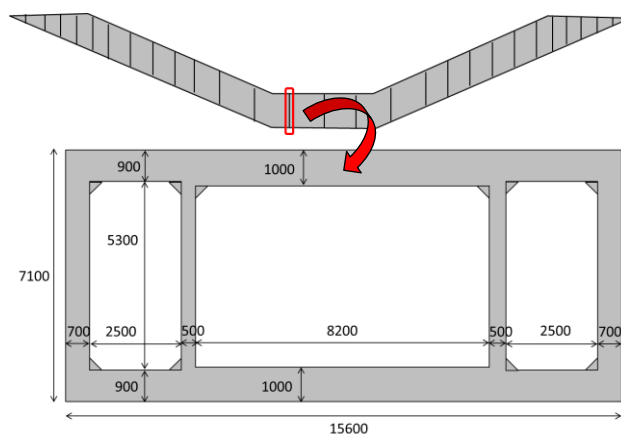


図-2 対象構造物の縦断方向、横断方向断面図

表-1 検討ケース

検討 ケース	環境条件
Case0	考慮しない（構造解析のみ）
Case1	熱＋水分
Case2	熱＋水分＋塩化物イオン＋酸素
Case3	熱＋水分＋二酸化炭素＋酸素
Case4	熱＋水分＋塩化物イオン＋二酸化炭素
Case5	熱＋水分＋塩化物イオン＋二酸化炭素＋酸素

イントの複数面からの劣化因子侵入を表現可能な 3 次元形状にて検討を行うこととした。すなわち、耐久性の観点においては 3 次元であるが、構造的には、実質的に 2 次元平面ひずみ問題である（図-3、図-4）。

4. 解析のモデル化

4.1 検討ケース

解析の検討ケースは、熱（水和反応）と水分の移動によるコンクリートの収縮・クリープを考慮した Case1 を基本とし、塩化物イオン、酸素、二酸化炭素に起因する塩害および中性化について検討を実施する。すなわち、熱、水分、塩化物イオン、二酸化炭素、酸素の 5 つの環境条件の個々の影響および複合の影響について、施工から 30 年後までの長期材齢までの解析を実施した。なお、Case0 は、比較用として材料劣化を考慮しない（DuCOM と連成しない）構造解析単体（COM3 単体）の解析である。Case0 から Case5 の検討ケースを表-1 に示す。さらに、各ケースともに 30 年後に静的震度によるプッシュオーバー解析を実施した。

4.2 要素分割

解析の要素分割は、奥行方向に厚さを考慮し、3 次元ソリッド要素にてモデル化した。躯体外周の鋼殻は、積層シェル要素とした。地盤はモデル化せず、地盤と底版の相互作用はモデル底面に地盤バネを設定することで考慮している。

大気と接する躯体コンクリート表層の分割については、熱、水分に加えて塩化物イオン、酸素、二酸化炭素の移動を考慮するため細かく分割する必要がある。本検討では、表層から順に、5 mm、7 mm、20 mm の要素寸法とした。なお、表層の要素分割は、一次元感度解析を実施し、現実的に計算可能な要素分割を設定している。モデル奥行方向についても、飛来塩分が施工ジョイント部からトンネル内部に浸透することを想定し、侵入面の要素を壁厚方向と同様の細かさで分割した（図-3、図-4）。

本モデルにおいて、総要素数 9,278（ソリッド要素 6,490、積層シェル要素 500、接合要素 280、DuCOM 側の境界条件要素 2,008）、節点数 8,778（D.O.F.=26,334）となっている。

4.3 材料物性値と配合条件

コンクリートの配合を表-2 に、セメント鉱物組成を表-4 に示す。鉄筋については、主筋は降伏強度 345 N/mm²、ヤング係数 200 kN/mm² とし、せん断補強筋は降伏強度 235 N/mm²、ヤング係数 200 kN/mm² を設定した。

4.4 環境条件

対象構造物周辺の環境条件は、温度、湿度、塩化物イオン、二酸化炭素、酸素を設定した。温度および湿度に

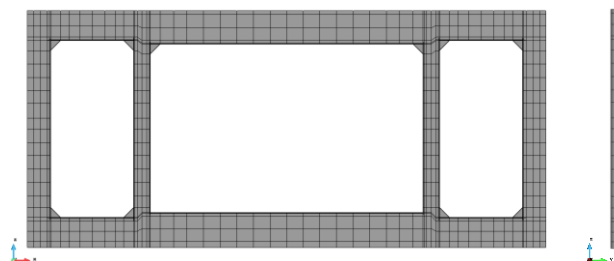


図-3 モデル断面

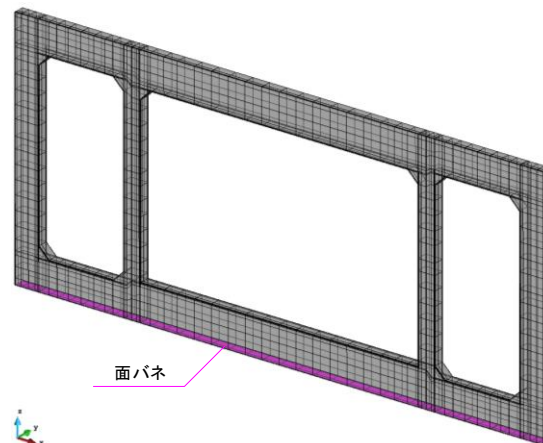


図-4 面バネ設定位置

表-2 コンクリート配合

W/C (%)	air (%)	単位量 (kg/m ³)			
		セメント	水	細骨材	粗骨材
58	4.5	---	---	972	837

表-3 セメント鉱物組成

C ₃ S (%)	C ₂ S (%)	C ₃ A (%)	C ₄ AF (%)	石膏 (%)
8.8	49.7	9.4	23.9	3.4

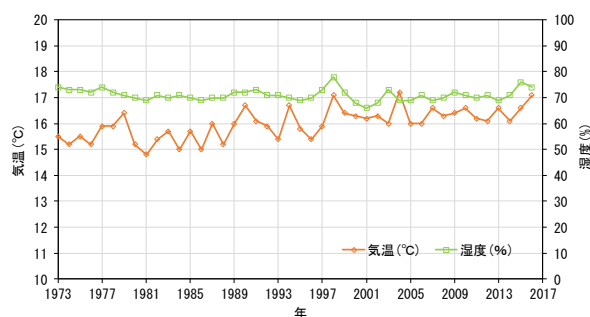


図-5 温度・湿度履歴（気象庁より）

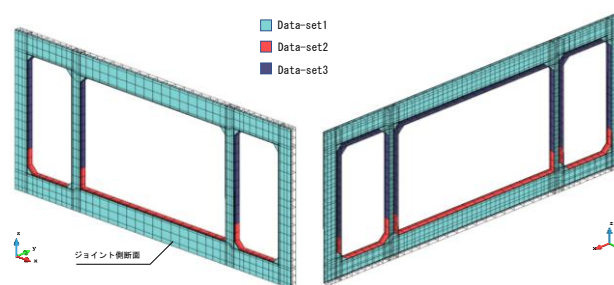


図-6 境界条件データセット概要図

については、対象構造物近傍の気象庁のデータベースを参照し、環境条件の変動を設定した（図-5）。

コンクリート内部への塩化物イオン侵入経路としては、トンネル内面とジョイント部が考えられる。対象区間が沈埋部であることから、トンネル内面に飛来する塩分量に比べてジョイント部から侵入する塩分量の方が多いと推測した。さらに、トンネル内部では車両のタイヤに付着した塩分の跳ね返り等を考慮し、解析モデルにおける侵入する塩分量を3パターンに分類した（図-6、表-4）。ジョイント部からの侵入量を海水中の塩分量と同等（Data-set1）とし、トンネル内面の下部はジョイント部の1/10（Data-set2）、トンネル内面の上部の侵入量は0（Data-set3）とした。本検討では、塩化物イオンの侵入を施工開始から3ヶ月後とした。また、二酸化炭素および酸素については、空気と接するトンネル内面からのみ供給されると仮定し（Data-set2, Data-set3）、空気中に存在する濃度の割合から入力値を設定した（図-6、表-4）。

4.5 力学的境界条件と荷重条件

地盤はモデル化せずにモデル底面に面バネを設定することで、構造物ー地盤間の相互作用を考慮する。ここでは、面バネ定数（地盤反力係数）は道路橋示方書耐震設計編⁵⁾より算出し、開閉方向：4869.3 kN/m³、せん断方向：1623.1 kN/m³とした。

躯体自重は鉛直方向重力加速度により考慮する。土圧および水圧は式[1]、式[2]より算出し、節点荷重として与える（図-7）。自重および土水圧は躯体養生終了後（材齢5日）に作用させた。

$$P_s = K_0 \sum \rho g h \quad [1]$$

$$P_w = \gamma_w h_w \quad [2]$$

ここに、 P_s :土圧、 γ_s :土の単位体積重量、 h :地表面からの深さ、 K_0 :静止土圧係数(=0.5)、 P_s :水圧、 γ_w :水の単位体積重量、 h_w :地下水位からの深さである。

4.6 解析ステップ

二酸化炭素の移動を考慮する場合、収束の安定性を確保するためには、解析時間間隔を相対的に小さめに設定する必要がある。そこで、解析ステップは、表-5と表-6に示すように、二酸化炭素の考慮の有無に応じて暴露から30年後までの範囲について2パターンを設定した。

各ケースにおいて30年後に、静的加速度によるプッシュオーバー解析を実施し、入力加速度は0.5G/STEPで、2.5Gまで載荷した。

5. 解析結果

5.1 材齢30年後の変形図

材齢30年の変形図を図-8～図-12に示す。ここでは、

表-4 暴露後の環境条件

環境因子	ジョイント部 (Data-set1)	トンネル下部 (Data-set2)	トンネル上部 (Data-set3)
温度	15.5℃	年平均値（気象データ）	
湿度	考慮しない	年平均値（気象データ）	
塩化物イオン	0.558 mol/l	0.0558 mol/l	0.0 mol/l
二酸化炭素	考慮しない	$0.6 \times 10^{-3} \text{ kg/m}^3$	
酸素	考慮しない	$9.3 \times 10^{-6} \text{ g/cm}^3$	

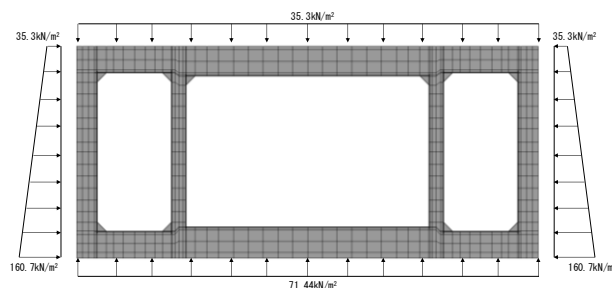


図-7 土水圧荷重分布

表-5 二酸化炭素の移動を考慮しないケース

STEP	イベント
1～210	打設～養生終了(材齢5日)
211～212	躯体自重(鉛直方向重力加速度)、土水圧(節点力)
213～1218	暴露～30年後

表-6 二酸化炭素の移動を考慮するケース

STEP	イベント
1～211	打設～養生終了(材齢5日)
211～212	躯体自重(鉛直方向重力加速度)、土水圧(節点力)
213～3346	暴露～30年後

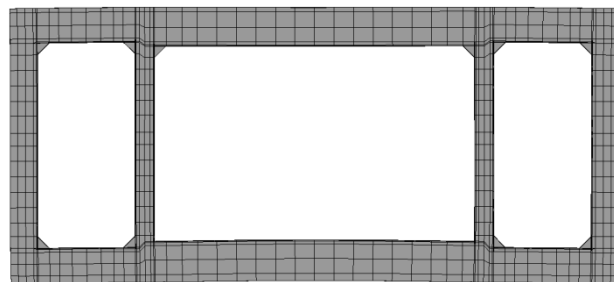


図-8 Case1の変形図

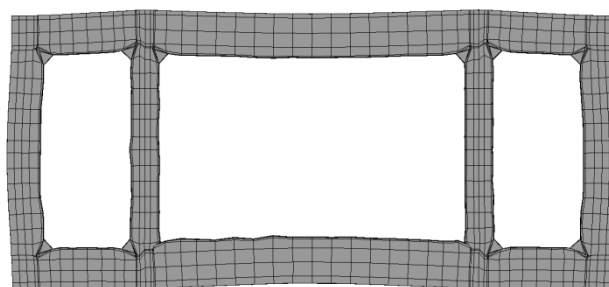


図-9 Case2の変形図

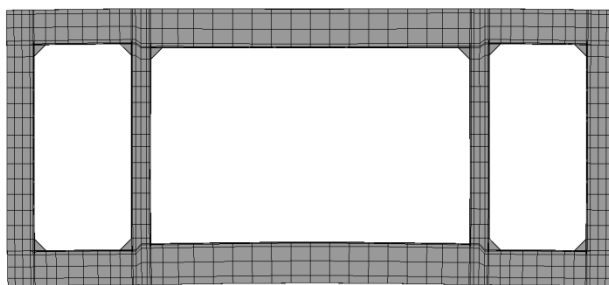


図-10 Case3の変形図

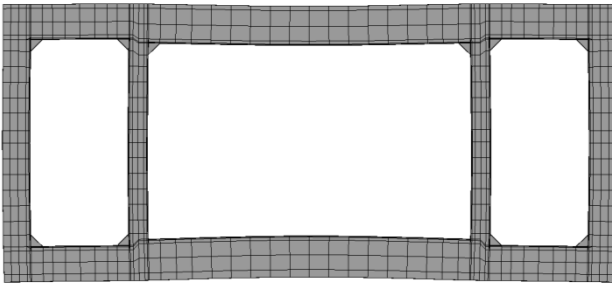


図-11 Case4 変形図

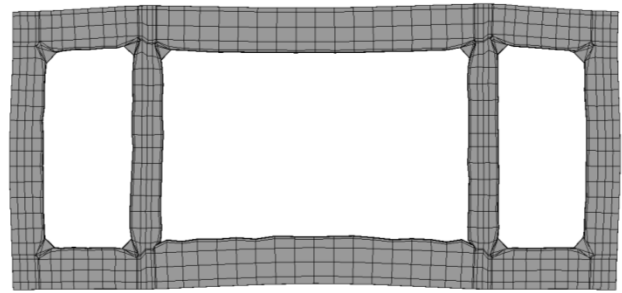


図-12 Case5 変形図

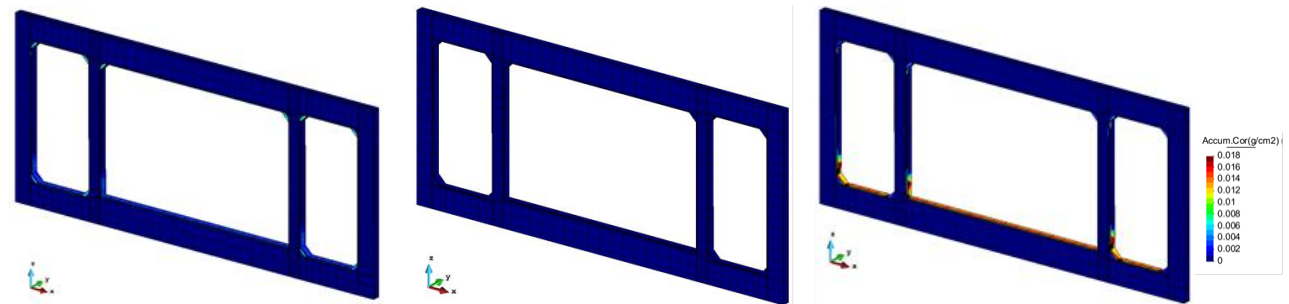


図-13 腐食量分布（左：Case2，中：Case3，右：Case5）

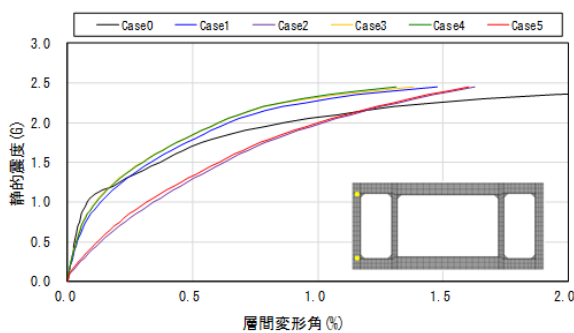


図-14 側壁左の層間変形角

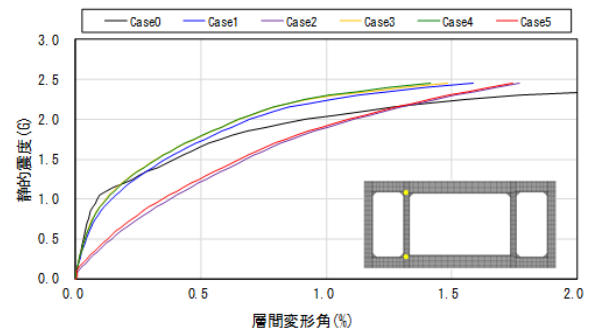


図-15 中壁左の層間変形角

変形倍率を 100 倍に拡大した図を表示している。Case1, Case3, Case4 では、常時荷重およびコンクリートの乾燥収縮による変形が確認できる。一方、塩化物イオンと酸素を考慮した Case2, 塩化物イオンと酸素と二酸化炭素を考慮した Case5 では、トンネル内側の要素の変形が大きくなっており、鉄筋の腐食により表層要素が膨張していることがわかる。

5.2 材齢 30 年後の腐食量分布

酸素の移動を考慮した Case2, Case3, Case5 において、材齢 30 年の累積腐食量分布を図-13 に示す。なお、コンター図は表面積あたりの鉄筋の腐食量 Ω として描画しているが、一般的に腐食を表す指標として用いられる腐食率 γ と Ω は式[3]の関係を持つ。

$$\gamma = \frac{4\Omega}{D \cdot \rho_{steel}} \quad [3]$$

ここで、 γ ：腐食率(無次元)、 Ω ：表面積あたりの鉄筋腐食量(g/cm²)、 D ：鉄筋径(cm)、 ρ_{steel} ：鉄筋の単位体積重量

(g/cm³)である。

30 年後の腐食量分布より、3 つのケースの腐食量の関係は Case5 > Case2 > Case3 となった。塩化物イオン、酸素および二酸化炭素を考慮した Case5 では、30 年後の腐食量の最大値は 0.018g/cm² 程度であった。塩化物イオン、酸素を考慮した Case2 は 0.006g/cm² 程度であり、Case5 と比較すると、二酸化炭素に起因する腐食量の差が確認できる。二酸化炭素と酸素を考慮した Case3 は、他 2 ケースに比べて腐食量最大値は 0.001g/cm² 程度と、Case5 と比較して 1/10 以下となり、二酸化炭素の考慮のみによる腐食量は小さい結果となった。以上より、鉄筋の腐食量は、塩害と中性化が複合作用する場合、中性化単体による腐食量と塩害単体による腐食量の単純な足し合わせではないことがわかる。また、腐食位置については、トンネル内側でみられ、図示していないがジョイント部から浸透してくる塩化物イオンについては酸素の供給がないため、腐食が進行しない結果となっている。

5.3 プッシュオーバー解析結果

施工から 30 年後、コンクリートの劣化が進行した状態で静的震度によるプッシュオーバー解析を実施した。静的震度は 0.05G 刻みで 2.5G まで載荷した。

側壁および中壁の層間変形角を図-14 と図-15 に示す。各部材ともに、コンクリートの劣化を考慮しない Case0 と比較して、載荷初期の剛性の低下がみられる。腐食量の大きい Case2, Case5 では剛性の低下が、より顕著になる。Case2 と Case5 では腐食量に 3 倍程度の差があるものの、層間変形角の推移はほぼ一致している。また、腐食量の少ない Case3 は、腐食が生じないケースと同様の曲線となった。材齢 30 年後のいずれのケースにおいてもせん断破壊は生じておらず、また耐力の大きな低下も見られない結果となった。

6. まとめ

既設コンクリート構造物の中性化や塩害といった材料の複合的な劣化から構造性能の変化までを、解析を用いて統一的に評価することを目的に、温度、湿度、塩化物イオン、二酸化炭素、酸素の各影響因子の組合せで沈埋トンネルの解析を実施した。本検討のまとめを以下に示す。

- ① 適切な要素分割および解析ステップの設定により、コンクリートの乾燥収縮、塩害、中性化が生じる環境下においても、所定のステップまで安定した収束解を得られることが確認できた。塩害、中性化による鉄筋の腐食と構造性能の連成についても解析的に評価することができた。
- ② 塩化物イオンと酸素の侵入を考慮した Case2 では 0.006g/cm³ 程度、二酸化炭素と酸素の侵入を考慮した Case3 では、0.001g/cm³ 程度の腐食量となった。一方、塩化物イオンと酸素と二酸化炭素をすべて考慮した Case5 では、30 年後の腐食量の最大値は 0.018g/cm³ 程度となり、単純な足し合せとはならない結果が得られた。従って、塩害による鉄筋腐食が懸念される構造物においては、塩化物イオンと二酸化炭素の両方を連成した上で、腐食検討を実施する必要性が示唆される。
- ③ ジョイント側断面より浸透する塩化物イオンを相対的に多く設定したが、腐食が進行する位置はトンネル内側の表層のみとなった。これはジョイント部からは塩化物イオンのみを与えており、酸素の供給はしていないため、鉄と酸素の腐食反応が起こらない

ためであると考えられる。Case4 の塩化物イオンと二酸化炭素のみを環境条件として与えた結果が腐食していない原因と同様である。海に近い地中トンネルの環境条件にふさわしい条件を設定することが重要であり、解析の精度向上に繋がるものと考えられる。

- ④ 施工から 30 年後に静的加速度によるプッシュオーバー解析を実施した。各壁部材の静的震度一層間変形角関係より、構造解析のみの結果に比べて剛性が低下する傾向が得られた。さらに、腐食量の大きい Case2, Case5 については剛性低下がより顕著であることが示された。一方、静的震度 2.5G 時の層間変形角は各ケースともに 1.3~1.6%程度となり、劣化による差異はほとんどない。これは、腐食により劣化が進展した箇所が、トンネル内部コンクリート表面のジョイント側と限定的であるためだと考えられる。劣化箇所が限定的であれば、耐荷性能への影響は小さくなる可能性が示された。

本検討では、長期材齢における塩害と中性化の複合劣化と構造性能の連成解析に関する動作検証に主眼を置いた。解析労力の制約からトンネル奥行方向はわずかに 3 分割としたが、材料的な複合劣化と構造性能を連成して評価する見込みが得られたことから、今後はスパコンの活用を念頭に、周辺地盤を含めた構造物全体での評価、さらに、50, 100 年後といった長期的な劣化挙動の将来予測解析や動的解析までの実施を検討している。

謝辞：本検討に際し、東京大学大学院の石田哲也教授より貴重なご意見を頂きました。また、DuCOM-COM3 を使用させて頂きました。ここに、深謝の意を表します。

参考文献

- 1) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T.: Multi-Scale Modeling of Structural Concrete, Taylor & Francis, 2009.
- 2) Maekawa, K., Chaube, R. and Kishi, T.: Modeling of Concrete Performance, E & FN Spon, 1999.
- 3) Maekawa, K. and Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, 1999.
- 4) 岡村甫, 前川宏一: 鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則, 技報堂出版, 1991.5.
- 5) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 (V 耐震設計編), 平成 24 年