覆工コンクリートのひびわれ抑制による 長期健全性向上に向けた実験的検証

水野 希典¹・八木 弘²・岩尾 哲也³・松岡 茂⁴・西村 和夫⁵

¹正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)
E-mail:m.mizuno.aa@ri-nexco.co.jp

²正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)
E-mail:h.yagi.aa@ri-nexco.co.jp

³正会員 株式会社高速道路総合技術研究所 道路研究部 (〒194-8508 東京都町田市忠生1-4-1)
E-mail:t.iwao.aa@ri-nexco.co.jp

⁴正会員 鉄建建設株式会社 土木本部 (〒101-8366 東京都千代田区三崎町二丁目五番三号)
E-mail:Shigeru-matsuoka@tekken.co.jp

⁵正会員 公立大学法人 首都大学東京 都市環境学部 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail:knishi@tmu.ac.jp

本研究では、コンクリート片のはく落防止によるトンネル覆工の長期健全性向上を目的に、ひびわれ発生の原因となる養生環境や施工方法について室内実験と数値解析で検証を行った。検証の結果、養生環境については、7日間湿潤状態に保つ養生を行えばコンクリート表面の緻密性等の品質を確保できる。施工方法については、締固めエネルギーが過剰となってもコンクリートの品質には大きな影響がなかった。室内試験結果から得られた物性値をもとに、ひびわれ進展解析を行ったところ、短期的(50日)には有害なひびわれは発生しなかった。また、長期的(50年)には、コンクリートの収縮ひずみに起因するひびわれの発生、進展は養生環境に関係しないことがわかった。これらの結果から、中流動覆工コンクリートの施工管理基準の提案を行う。

Key Words : Lining concrete, cracks, Semi Self-compacting Concrete for Tunnel Lining, curing method, compaction method

1. はじめに

覆工コンクリートのひびわれの原因として考えられるのが、養生、坑内環境や施工方法である。養生環境は、養生方法や養生期間および型枠脱型時期等(以下「養生環境」という。)があり、一方、施工方法としては、覆工コンクリートの締固めによるものがある。

一般的な覆工コンクリートは、これまで工程を確保するために打込み翌日に脱型されるサイクルで施工され、トンネル坑内温度が安定し、かつ湿度が一定で高い状態であったことから特別な養生の必要がなかった。しかしながら、坑内環境に着目した馬場らの研究報告¹⁾によると、トンネル施工環境の改善を目的とした換気設備の充実により、坑内温度、湿度は屋外と同様に季節変動することが明らかになった。したがって、坑内環境によっては、脱型直後のコンクリート表面からの水分蒸発により、

乾燥収縮の促進や水和反応の阻害等、コンクリートのひびわれを引き起こすおそれがある。これらのことから、覆工コンクリートの品質向上を目的に現場では、給水や水分逸散抑制により覆工表面を湿潤状態に保つ養生方法等の提案がされている。ただし、養生によるひびわれ抑制効果については定量的な評価は行っていない。

また、高山²⁾は、覆工コンクリート打設初期に生じるひびわれ発生メカニズムに着目した研究を行っている。この研究報告では、初期ひび割れ発生を抑制するために坑内温度、坑内湿度を指標とした蒸気圧の概念を用いた評価手法を提案している。

養生効果については、主に耐久性の観点から調査研究が行われており、代表的な事例としては郭ら³⁾が報告しているように中性化速度等の鉄筋腐食因子の浸透抑制に着目した研究が多い。

覆工の大部分は、無筋コンクリート構造物であるため、

鉄筋腐食に関連する中性化速度や透水係数等で長期耐久性を評価することは、困難である。また、覆工の維持管理では、ひびわれ発生、進展によるコンクリート片の剥落防止が第三者事故防止という観点から重要な課題であるが、養生、施工条件および坑内環境までを考慮したひびわれ発生、進展を検討した事例が少ない。そこで、実際に養生環境によるコンクリートの品質向上を、実際の養生環境をモデル化した室内実験より物性値を得たうえで短期間における評価を行い、その結果にもとづいて実環境下を想定した数値解析により、長期間の覆工コンクリートのひびわれ発生、進展を解析した。

一方、覆工コンクリート施工では、東日本、中日本、西日本高速道路株式会社「以下（NEXCO）という。」は、中流動覆工コンクリートと型枠パイプレータを採用することで、材料分離や未充填部の発生を防止してきた。しかし、中流動覆工コンクリートの締固め方法によっては、過剰な締固めとなることが懸念される。

そこで、大型試験体を使った打設実験により、過剰な締固めによる粗骨材の含有率を把握したうえで、数値解析により、粗骨材の含有率による長期間のひびわれ発生、進展を解析し、過剰な締固めによる影響を把握した。

本論文は、養生環境や施工方法が覆工コンクリートのひびわれ発生、進展に及ぼす影響を把握し、覆工コンクリート表面からのコンクリート片のはく落を予防することで、覆工の長期健全性の向上につながると考え、中流動覆工コンクリートの品質向上に向けた施工方法の提案を行ったものである。

2. 養生効果確認実験

NEXCOで施工中のトンネルで実施されている養生環境の効果を確認する目的で、養生環境をパラメータとして室内実験を実施した。また、実験結果をもとに、覆工

の長期健全性を評価するための解析モデルの妥当性を確認した。

(1) コンクリートの配合と使用材料

NEXCOの標準仕様である中流動覆工コンクリートの施工管理要領⁴⁾にもとづいて、実験に使用する配合を決定した。表-1に実験に使用したコンクリート配合と使用材料の一覧を示す。また、比較対象として中流動覆工コンクリートを採用する前の配合（表中のT1（在来）と表記したもの）についても実験を行った。

中流動覆工コンクリートの配合については、石炭灰（FA）または石粉（LS）を混和材としたもの以外に、高性能AE減水剤（増粘剤一液タイプ）（Ad）を用いた3種類とした。

(2) 実験概要

養生環境の違いによるコンクリートの物性データの相違を確認することとした。

表-2に実験を行った養生環境の一覧を示す。一般的な覆工コンクリートの施工では、コンクリートの自重に耐えられる強度が発現した時点で脱型されており、脱型時期は打設後18時間程度である。そこで、実験では打設後18時間で脱型し無養生としたものを、基準とした（表-2の養生A）。表-2の養生B～養生Iについては、実際にトンネルで施工されている覆工の養生環境をモデル化した。ただし、養生Eについては、コンクリート自体の強度特性等を確認する目的で28日間水中養生（標準養生）を行った。

養生環境によるコンクリートの品質への影響を確認する目的で表-3に示す物性試験を実施した。水分拡散係数および細孔径分布については、実際のトンネル覆工厚と同等の300mm角の試験体を用いた。この試験体は、乾燥面を1面のみに限定し、その他の面を完全にシールすることで実際のトンネル覆工に近い水分移動の状況を再現

表-1 コンクリートの配合と使用材料一覧

配合	スランプ (cm)	空気量 (%)	水結合材 比 W/C(%)	細骨材 s/a(%)	単位量(kg/m ³)				
					水 W	結合材		細骨材 S	粗骨材 G
						セメント	混和材		
T1(在来)	15±2.5	4.5±1.5	63	49	170	270	—	888	950
T1(FA)	21±2.5	4.5±1.5	48.6	49.4	170	270	80(FA)	847	902
T1(LS)	21±2.5	4.5±1.5	48.6	49.4	170	270	80(LS)	847	902
T1(Ad)	21±2.5	4.5±1.5	53.1	50.4	170	320	—	894	902

注：T1(FA)、T1(LS)、T1(Ad)は中流動覆工コンクリートでスランプフロー35～50cm、

セメント：普通ポルトランドセメント

粗骨材：碎石（表乾密度：2.66g/cm³吸水率：0.5%）最大粗骨材径 20mm

細骨材：陸砂（表乾密度：2.59g/cm³吸水率：2.07%）

石炭灰（FA）：JIS II種（密度：2.32g/cm³）、石粉（LS）：炭酸カルシウム（密度：2.71g/cm³）

表-2 養生環境の一覧

養生	養生種別	養生環境
A	無養生	18時間脱型後 20℃湿度 60%養生 (坑内環境)
B	脱型時期	48時間脱型後 20℃湿度 60%養生
C		72時間脱型後 20℃湿度 60%養生
D	湿度 80%	18時間脱型後→8時間後に湿度 80%養生→7日間で養生終了
E	水中養生	18時間脱型後→直後水中養生 (28日間)
F	水中養生 (8hr 後)	18時間脱型後→8時間後に養生開始→7日間で養生終了
G		18時間脱型後→8時間後に養生開始→28日間で養生終了
H	封緘養生	18時間脱型後 封緘養生→7日間で養生終了
I	膜養生	乾燥収縮低減剤 18時間脱型後塗布→塗布後→養生終了

表-3 物性試験一覧

物性値	試験方法	試験体寸法 (mm)
圧縮試験	JIS A 1108	φ100×200
長さ変化試験	JIS A 1129-3 埋め込みゲージ	100×100×400
透気性試験 (透気係数)	トレント法	100×100×400
透水性試験 (水分拡散係数)	インプット法	300×300×300

し、乾燥面から内部にかけての水分拡散係数、細孔径分布の変化を養生終了の経過日数ごとに把握した。なお、養生終了後は、室温20℃、湿度60%の恒温恒湿室で試験体を保管した。

水分拡散係数、細孔径分布の試験は、養生終了後、恒温恒湿室に1, 3, 28日保管した時点で行った。脱型後に養生を実施しない養生A, B, Cは、脱型時点を養生終了として取り扱っている。

実トンネルでは、脱型後に覆工全体を養生する設備を設置する作業を行っている。この作業の間は、養生を実施できない状態であり、脱型直後はコンクリート表面からの水分発散が多い時期であることから、養生D, F, G, Hについては脱型後8時間放置 (室温20℃、湿度60%) した。

(3) 実験結果

コンクリートの物性値は、各配合とも同様であったことから、本論文では代表的な配合の試験結果を示す。

a) 圧縮強度

養生方法の違いによる圧縮強度への影響を整理したものを図-1に示す。この図では、コンクリートのポテンシャルとして供試体養生Eの圧縮強度 σ_{28} に対する各養生の圧縮強度 σ_{28} との比で整理した。

 $\sigma_{28}/E(\sigma_{28})$

図-1 養生Eに対する各養生の圧縮強度比

表-4 養生方法による28日圧縮強度(N/mm²)一覧

養生方法	T1(在来)	T1(Ad)	T1(FA)	T1(LS)
A	28.0	37.8	32.3	27.0
B	30.1	39.3	33.9	32.6
C	31.8	42.7	35.0	36.3
D	23.7	30.1	25.9	25.5
E	33.8	45.4	41.7	37.6
F	36.6	49.2	41.9	41.6
G	36.0	47.3	41.9	39.3
H	32.5	44.0	38.3	37.9
I	32.0	36.6	35.2	32.9

トンネル覆工の施工では、脱型後にコンクリートを湿潤状態に保持するために、コンクリート表面をシートで覆うなどの養生設備を設置する事例が多い。養生設備を設置後は、コンクリート表面は湿潤状態に保持されるが、脱型から養生設備を設置する間は、コンクリート表面から水分逸散が継続する。脱型直後は、コンクリート中の水分量が多く、とくに水分逸散が多い時期に相当する。そこで、脱型直後の水分発散による影響を確認するために、脱型後に実トンネルにおける養生設備設置までの時間とほぼ同じ8時間放置し、その後28日間水中養生を実施した養生Gと養生Eの圧縮強度を比較した。表-4に示すように、配合に関係なくほぼ等価であった。また、養生F, Hについても脱型後に8時間放置したにも係らず、圧縮強度については養生Eの90%程度の値を示しており、8時間程度の養生設備構築時間による強度への影響はないものと推定される。なお、最も強度が低い値を示したT1(在来)の養生Aでも28N/mm²の圧縮強度であり、その他のケースでは30N/mm²以上の強度であり、養生D以外のケースで設計基準強度(24N/mm²)を満足した。養生Dについても、設計基準強度をほぼ同等の値を示している。この結果から、圧縮強度については、特別

図-2 T1(Ad)配合における収縮ひずみと材齢との関係

な養生を実施しない場合でも設計基準強度を確保できるものと考えられる。

養生Dは、脱型後に湿度80%の室内に7日間放置したにも係らず、脱型後に湿度60%の室内に放置した養生Aの結果よりも小さい値を示している。この原因については、今回の試験結果のみでは推定することが困難であるが、今回の結果からは、湿度80%では養生効果がないことを示唆していると判断できる。

b) 長さ変化試験

図-2に埋め込みゲージで得られた長さ変化試験の結果を示す。長さ変化試験については、養生終了後に乾燥状態（室温20℃、湿度60%）に放置した乾燥材齢と収縮ひずみとの関係で整理する事例が多いが、本論文では収縮ひずみ等の影響を検討するため、打設日からの材齢で整理した。したがって、材齢28日まで水中養生している養生E、Gについては養生期間中は収縮ひずみが発生していない。乾燥収縮低減剤を塗布した養生I以外は、養生終了後の収縮ひずみの発現は、ほぼ同様であり、乾燥材齢180日での収縮ひずみ量に大きな差異はなかった。これは、コンクリートの最終的な収縮ひずみは、水セメント比に依存するという既存論文⁵⁾と一致している。また、養生Iは、収縮ひずみの発現を抑制する効果があることが判明した。

c) 透気係数

コンクリート表面で測定した透気係数の一覧表を表-5に示す。表には、かぶりコンクリートの品質を判定する目的で設定されたグレード⁶⁾と各グレードの評価を記載した。なお、透気係数はコンクリートの含水率に影響を受けることが知られている。そこで、透気性試験のみは、コンクリート表面の乾燥状態を同一条件で実施するため

表-5 透気性試験結果

養生	項目	透気係数 $kT(10^{-16} \frac{m^2}{m \cdot s})$			
		配合種別			
		T ₁₋₁ (従来)	T ₁₋₄ (Ad)	T ₁₋₄ (FA)	T ₁₋₄ (LS)
		28	28	28	28
A	透気係数	13	2.7	4.7	6.5
	グレード	5	4	4	4
	評価	極劣	劣	劣	劣
B	透気係数	1.6	0.69	1.1	2.1
	グレード	4	3	4	4
	評価	劣	一般	劣	劣
C	透気係数	0.78	0.43	0.78	1.0
	グレード	3	3	3	4
	評価	一般	一般	一般	劣
D	透気係数	13	4.8	6.0	11
	グレード	5	4	4	5
	評価	極劣	劣	劣	極劣
E	透気係数	0.042	0.023	0.032	0.041
	グレード	2	2	2	2
	評価	良	良	良	良
F	透気係数	0.091	0.055	0.095	0.087
	グレード	2	2	2	2
	評価	良	良	良	良
G	透気係数	0.051	0.018	0.022	0.026
	グレード	2	2	2	2
	評価	良	良	良	良
H	透気係数	0.36	0.24	0.75	0.69
	グレード	3	3	3	3
	評価	一般	一般	一般	一般
I	透気係数	1.2	0.42	0.060	0.43
	グレード	4	3	2	3
	評価	劣	一般	良	一般

注): 試験材齢は、所定の養生終了後からの材齢を示す。

に、乾燥材齢（養生後の材齢）28日で実施した。

養生をまったく実施しない養生Aの透気係数は、グレード分けの評価では「劣」となっており、二酸化炭素等の鉄筋腐食因子がコンクリート内部へ浸入しやすいと判断される。脱型時間を72時間に延長した養生Cおよび何らかの養生を7日以上実施した養生F、G、H、Iは、グレード分けの評価で「一般」以上と判定され、鉄筋コンクリートで施工される坑口部等については、脱型時間を延長するか、脱型後に養生を実施することが望ましい。

脱型後、湿度80%で養生を行った養生Dの透気係数は、養生Aと同様に「劣」と判定されている。また、図-1に示す圧縮強度の結果についても養生Dは、養生Aと同程度であり養生によるコンクリートの品質向上が見られない。この原因については、脱型直後のコンクリートの含水量は飽和状態に近いため、湿度80%の環境下でもコンクリート表面からの水分発散を防止できないためであると想定される。したがって、脱型直後の養生としては、コンクリート表面を湿潤状態に保持するか、コンクリート表面を被膜等で覆い水分発散を抑制する方法が良い。

d) 水分拡散係数

代表的な水分拡散係数の試験結果としてT1(Ad)を図-3に示す。水分拡散係数に用いた試験体は、トンネル覆工厚と同じ300mmの厚さを有しており、乾燥面となる1面以外をエポキシ樹脂でシールしている。材齢28日を経過した時点で、試験体をカットして乾燥面から内部の水分拡散係数を測定した。その結果、図-3に示すように養生Aでは、乾燥面から120mm程度までは水分拡散係数が変

化しているが、それ以深ではほぼ一定の値を示している。この傾向は、水中養生した養生E、F以外はほぼ同一である。一方、水中養生を行った養生E、Fについては120mm以深の水分拡散係数を測定していないが、乾燥面から120mm程度までは拡散係数が小さく、ほぼ一致している。120mm以深の拡散係数は、養生ケースに関係なく配合ごとに、ほぼ一定の値を示した。今回の試験結果では、養生条件により、表面から120mmまでの拡散係数は変動する。また、養生E（標準養生）と7日間水中養生した養生Fの表面から120mmまでの拡散係数は、すべての配合で同等であった。この結果から、水分拡散係数の評価では、養生期間としては7日程度で十分であることを示している。

e) 養生効果確認実験結果のまとめ

養生効果確認実験の結果を簡単に整理すると以下のようになる。

- 1) 脱型後の養生としては、コンクリート表面を湿潤状態に保持するか、被膜等でコンクリート表面を覆うことで水分発散を抑制する養生方法が有効である。
- 2) 脱型時間を72時間まで延長するか、養生期間を7日実施すると強度は養生Eの90%程度を確保でき、かつコンクリートの緻密性を示す透気係数も、グレード分けの評価で「一般」以上の値を確保できる。
- 3) 打設後180日後の収縮ひずみ量については、養生方法による影響はほとんどない。ただし、収縮ひずみは、養生終了時点から生じるため、若材齢での収縮ひずみには養生の影響を受ける。

図-3 水分拡散係数 (T1(Ad))

3. 過剰締固めに伴う材料分離実験

コンクリート標準示方書[施工編：施工標準]（土木学会編）の締固めに関する解説には、材料分離に注意して締固めを実施するとの記述がある。しかしながら、材料分離に関する定義については記述がない。これは、コンクリートの配合や構造物の特徴によって材料分離の考え方が違うためにいちがいに設定できないものと思われる。

一方、粗骨材がないモルタルの収縮ひずみは、コンクリートに比べて大きくなる傾向があることが報告⁷⁾されている。したがって、材料分離が発生した場合には、覆工コンクリートの収縮ひずみが不均一になり、ひびわれの発生を誘発する懸念がある。そこで、本論文ではトンネルの長期健全性を検討するための資料として、過剰な締固めに伴う材料分離による影響を定量的に把握するために実験を実施した。

(1) 材料分離実験および結果

材料分離によるコンクリート物性値への影響を定量的に把握する目的で、表-1に示す各配合に対して粗骨材の含有量を-100%、-80%、-40%、-20%、0%、+20%、+40%と変化させた。なお、-100%とは表-1に示す配合表から粗骨材を抜いたモルタルであり、-80%とは配合表の粗骨材の20%しか配合しないものである。この値を粗骨材の変動率として、本論文では記述する。材料分離によるコンクリート物性値への影響として、長さ変化試験(JIS A 1129-3)と圧縮強度試験(JIS A 1106)を実施した。

図-4にT1(Ad)における粗骨材変動率と最終収縮ひずみとの関係を示す。ここでの最終収縮ひずみは、コンクリート標準示方書⁹⁾で定義される乾燥収縮ひずみの最終値を示している。図中の縦軸は、表-1に示す配合のコンクリートの最終収縮ひずみを100%として、各粗骨材変動率の最終収縮ひずみの増減率を示している。実験結果によると粗骨材の変動率+20%、+40%の収縮ひずみは、適正な配合の収縮ひずみとほぼ同一の結果であった。一方、粗骨材変動率が-20%から-100%になるに従って、最

図-4 粗骨材変動率と収縮ひずみの関係 (T1(Ad))

終収縮ひずみは増加しており、最終収縮ひずみの増加率は粗骨材変動率と負の相関がある。粗骨材がまったく配合されない粗骨材変動率 - 100%では、適正な配合の約2倍の収縮ひずみが発生する。このような粗骨材変動率と最終収縮ひずみ比との関係は、試験を行ったすべての配合に共通している。

圧縮強度については、粗骨材の変動率に関係なく、各配合で一定であった。

以上の結果から、粗骨材の含有量が多くなった部分は、覆工コンクリートの長期健全性に与える影響は少ないものと推定される。一方、粗骨材の含有量が少ない部分については、その部分の収縮ひずみが増大するため、経時変化でひび割れの発生が懸念される。したがって、覆工コンクリートの長期健全性を担保するうえでは、有害なひびわれの発生を防止するために材料分離を回避する必要がある、粗骨材の変動率を設定することが必要である。

(2) 大型試験体による材料分離実験

覆工コンクリートの施工で材料分離が発生する原因としては、打設口が天端部の1箇所であるためにセトル内のコンクリート流動によるものと、過剰な締固めによるものが想定される。セトル内の流動による影響については、既往の研究⁹⁾によると在来配合では10.5m流動すると粗骨材変動率が - 80%以下、すなわち粗骨材量が配合の20%以下となるのに対して、中流動覆工コンクリートは粗骨材変動率が - 20%程度であったことが報告されている。一方、過剰締固めによる影響については、定量的な評価を行う研究が行われていない。そこで、中流動覆工コンクリートを対象に大型試験体を用いて、過剰締固めによる影響を把握する目的で実験を行った。

締固めと材料分離との関係が不明であることから、締固めによる材料分離への影響を把握し、大型試験体で加える締固めエネルギーを設定するための予備実験を実施した。

図-5 小型試験体による材料分離試験概要図

予備実験および大型試験体実験に用いた中流動覆工コンクリートの配合は、T1(Ad)とした。

a) 予備実験

予備実験では、図-5に示すように底面から振動を加え、振動エネルギーと粗骨材の沈降量との関係を把握した。加える振動エネルギーは、トンネル施工管理要領⁹⁾で示される最適な締固め振動エネルギー (3.7J/L) の整数倍とした。粗骨材の変動率は、予備実験試験体の硬化後に高さ方向に3分割して試料を採取し確認した。

予備実験による材料分離の結果を図-6に示す。振動エネルギーの加振回数が増加すると上部の粗骨材変動率が小さくなり、底面側の粗骨材変動率が大きくなる傾向があり、締固めにより粗骨材が沈降する傾向があることがわかった。この結果から、大型試験体の実験では、過剰な締固めによる影響を把握する目的で最適な振動エネルギーの20倍以上加えるものとした。

b) 大型試験体実験

実験に使用する大型試験体は、粗骨材の沈降が生じ易いと考えられる実トンネルの側壁部分を模式化して、図-7に示すように幅5000mm、高さ2000mm、厚さ300mmとした。また、図に示すように型枠パイプ側には加速度計を取付け振動エネルギー分布を計測した。

大型試験体では、型枠で最適な振動エネルギーの20倍以上の振動エネルギーを確保したために、図-8に示すように型枠パイプ側近傍では4000J/Lという非常に大きな振動エネルギーが局所的に導入されている。型枠の加速度および振動エネルギーは、図-8に示すように型枠パイプ側から離れるのに従って、低下しているが、補強材付近では極端に低下している。なお、振動エネルギーは、測定した加速度からトンネル施工管理要領⁹⁾にある式(1)で算定した。

図-6 加振回数と粗骨材変動率の関係

○：加速度計

図-7 大型試験体の概要図

図-8 大型試験体の加速度，振動エネルギー分布状況

$$E_B = \frac{m \cdot \alpha_{max}^2 \cdot t}{4\pi^2 \cdot f} \quad (1)$$

E_B ：振動エネルギー (J/L)

f ：振動数 (Hz)

t ：振動時間 (s)

m ：配合表から計算されるコンクリート密度 (kg/L)

α_{max} ：型枠表面の最大加速度 (m/s^2)

大型試験体実験では，コンクリートが硬化したあとに，上部から約1800mmの深さ方向にコアを採取して粗骨材の変動率を調査した．その結果とコア採取位置を図-9に示す．コンクリートの打設位置（型枠左端）からのコン

クリートの流動による材料分離の影響を把握する目的でコアの採取位置を定めた．コアA～Dは大型試験体の厚さ300mmの中央部からφ100mmの試料を採取した．コアE，コアFは，コンクリートの打設位置から等距離の位置である．型枠パイプブレータによる厚さ方向の材料分離への影響を把握する目的で，コアEについては型枠パイプブレータを設置した型枠面側から，コアFは型枠パイプブレータを設置していない型枠面側からコアを採取した．

大型試験体実験では，加速度が最も小さくなる中央の補強材付近で最適な振動エネルギーの約30倍に相当する74.0J/Lを加振した．そのため，型枠パイプブレータによる加振時間は23分に達した．このように長時間締固めを行ったにも係らず，図-9に示す粗骨材変動率は±20%程度の変動であった．粗骨材の沈降の影響を受けると推定される試験体上部に着目すると，上面から200mmの範囲に粗骨材が少ない領域が見られる．

図-10にコアEとコアFの粗骨材変動率の高さ方向の分布を比較した．コアEとコアFの粗骨材変動率に大きな差異は見られず，材料分離を確認できなかった．

図-11に大型試験体を高さ方向に上部，中央，下部に3分割し，各ブロックの粗骨材変動率を平均したものを示す．粗骨材変動率は，コンクリートの打設位置から離れるのに従って減少する傾向を示している．とくに上部では，粗骨材変動率の低下傾向が大きく，-20%程度となった．粗骨材変動率が-20%程度であれば，図-4に示すように収縮ひずみに与える影響は，ほとんどないことから

図-9 大型試験体のコア採取位置と粗骨材変動率分布

図-10 コア E, F の粗骨材変動率分布

図-11 コア位置と平均粗骨材変動率の関係

施工上は問題ないと考えられる。

以上の実験結果から、中流動覆工コンクリートについては最適な振動エネルギー（3.7J/L）より、30倍程度の振動エネルギーを加えても、顕著な粗骨材の沈降が発生しなかった。今回の実験範囲では、粗骨材変動率は±20%程度であった。ただし、粗骨材の変動についてはコンクリートの流動による影響が含まれている可能性がある。今回の実験は、中流動覆工コンクリートの流動性が良好であるため、締固めを行う前のコンクリート上面がほぼ平滑で流動勾配がない状態で締固めを行った。過去の調査報告¹⁰⁾によると、流動勾配がある場合は締固めによる材料分離が発生しやすく、流動勾配がない場合には

過剰締固めによる材料分離は発生しにくいと報告されている。したがって、実施工で流動勾配がある場合については、本論文の結果を適用する場合には注意が必要である。

4. 実環境におけるひびわれ発生、進展解析

覆工コンクリートの長期間におけるひびわれ発生、進展の把握には、養生環境、施工条件およびトンネル坑内の環境条件を考慮した覆工コンクリートの長期間の経時変化を追跡する解析手法が求められる。そこで、本論文

では、脱型時期および養生の有無による覆工コンクリートのひびわれ発生、進展の解析を行った。さらに、材料分離による長期的な覆工コンクリートへの影響についても解析し、有害なひびわれを誘発する粗骨材変動率を把握した。

(1) 水分移動を考慮した解析モデル

実際のトンネル坑内の環境は、室内実験（温度20℃、湿度60%）のような一定な条件でなく、季節変動がある。したがって、室内実験で得られた結果のみで覆工の長期健全性を評価することができない。さらに、実際の覆工では、コンクリートの強度が十分に発現していない脱型直後に自重による応力が生じることから、この応力による影響も無視できない。

そこで、覆工コンクリートの長期健全性を評価するために覆工コンクリートの長期間経時変化を検討する解析モデルが必要となる。収縮ひずみ等のコンクリート物性の長期的な経時変化を解析的に求める手法としては、前川¹¹⁾、石田ら^{12) 13)}が提案している材料 - 構造連成応答解析システム（以下「解析手法」という。）がある。この解析手法は、セメントの水和反応を考慮した空隙の生成と、コンクリート中の水分状態にもとづいて自由水の移動等を考慮したものである。この解析手法の概要を下記に示す。

コンクリート中には、毛管空隙、ゲル空隙およびセメントゲルと呼ばれる空隙が形成されていると考えられる。毛管空隙とは、もともと水が占めていた部分でセメントゲル（水和物）によって空間が満たされなかったために空隙として残存したもので、連続性を有している。したがって、水セメント比が大きいと毛管空隙も多くなる。ゲル空隙とはセメントゲル（水和物）中に存在する間隙であり連続性がなく、この空隙に取り込まれた水分の移動は少ないと考えられる。セメントゲルとは、セメントの水和反応の結果、生成された微小な結晶体である。硬化したコンクリートの収縮ひずみは、主に毛管空隙に含まれる水分（自由水）が移動することにより引き起こ

される。したがって、収縮ひずみの経時変化を計算するためには、セメントゲルを生成するための水分、ゲル空隙に封じ込められるゲル水と毛管空隙の自由水を求め、さらに自由水の移動を考慮する必要がある。解析手法の解析モデルは、図-12に示すように入力条件として、配合、環境条件を入力することでセメントの水和反応を計算し、セメントゲルの形成および毛管空隙内の水分移動の経時変化を計算することができる。入力する配合条件は、配合表に記載される単位セメント量、単位水量、粗骨材量および細骨材量のほかに、セメントの比表面積値と骨材の密度、吸水率、含水率に伴う体積変化を入力することになっている。今回のケースでは、比表面積値、骨材の吸水率および体積変化に関する資料を得られなかったため、平均的な値を入力している。その結果、コンクリートの最終的な収縮ひずみ量には誤差が生じるが、収縮ひずみの経時変化を推定することが可能となる。また、水和反応で形成されるセメントゲルによる骨格構造も推定できるため、強度や剛性の発現も推定することが可能である。

最終収縮ひずみについては、前述したようにセメントおよび骨材に関する詳細なデータ不足があり、誤差を有している。そこで、最終収縮ひずみを100%とした収縮ひずみの経時変化で解析結果と実験結果を比較した。この解析結果の代表事例を図-13に示す。なお、図中の解析結果(CAL)および実験結果(A-T)は、各々の最終収縮ひずみを100%とした場合の収縮ひずみの割合を示してい

図 - 12 計算フローの概念図

図 - 13 収縮ひずみの発現曲線の比較
(養生 E T1 (FA))

図-14 打設温度とひびわれ発生確率の関係
(川又ら¹²⁾ から引用)

図-15 解析モデルの抽出イメージ図

表-6 経時変化を試算する計算条件

項目	内容
検討期間	コンクリート打設後50年間
温度	0 ～ 30℃
湿度	50 ～ 90%
力学的境界条件	地山側固定 周方向およびトンネル縦断方向に対し、対象条件となる節点拘束付与
水移動に関する境界条件	内空側でのみ水分の逸散と流入を考慮 (一面開放。地山側では水の出入なし)
温度に関する境界条件	内空側および地山側で熱の移動を考慮 地山外面での温度：年間を通じて15℃設定

る。解析結果 (CAL) は、実験結果 (A-T推定値) を近似することができ、養生環境の相違による収縮ひずみ等のコンクリート物性値の違いを評価できることを確認した。したがって、この解析手法を用いることで実際の養生の有無や坑内環境 (温度、湿度変化) を考慮したコンクリート物性値の長期間の経時変化を推定できるものと思われる。

(2) 覆工のひび割れ解析 計算条件

覆工コンクリートのひびわれ発生について、川又ら¹⁴⁾ がコンクリート打設温度とひび割れ発生確率との関係を報告している。この報告によると図-14に示すようにコンクリート温度が20℃以上になるとひびわれ発生確率が増加しており、その原因としては硬化時の温度ひずみとコンクリートの乾燥収縮ひずみの複合作用と想定されると報告されている。

コンクリート温度が高い場合には、セメントの水和反応が促進され、水和熱が短時間に生じるため硬化時の覆工コンクリートの内部温度の上昇が大きく、温度ひずみが増大すると想定される。そこで、本論文の解析では夏季にコンクリートを打設したものと設定した。また、坑内環境について調査した馬場らの報告¹¹⁾ によると坑内環境は、屋外の季節変動と連動していることが明らかになっている。以上のことから、覆工コンクリートの長期的

温度に関するモデルと境界条件

図-16 解析モデルと境界条件のイメージ図

な経時変化を試算する計算条件を表-6のように設定した。また、コンクリートの配合については、養生効果確認実験で使用した高性能AE減水剤 (増粘剤一液タイプ) を用いたT1 (Ad) とした。

(3) 脱型時期および養生の有無によるコンクリート物性値算定解析

a) 解析モデルの設定

覆工コンクリートは、一般的な構造物に比べて早期に脱型するため、コンクリート強度が低い段階で自重による応力が生じる。この応力の影響を把握するため、覆工コンクリートの標準的な脱型時間18時間 (養生A) と脱型時間を72時間 (養生C) とした場合のコンクリート物性値の経時変化を試算した。さらに、養生効果による影響を把握する目的で、7日間封緘養生 (養生H) のコンクリート物性値 (収縮ひずみ、圧縮強度、引張強度および弾性係数) の経時変化も試算した。

解析モデルは、図-15に示す覆工厚300mmとする覆工コンクリート断面から図-16にあるように辺長を20mmとする立方体のソリッド要素15個を一行に配置した一軸条件下でのモデルとし、解析自体は三次元で計算を行う。また、発熱/温度挙動を追跡するため地山部のモデルとし

養生A

養生C

養生H

図-17 覆工コンクリート部材の収縮ひずみの経年変化

て辺長20mmとする立方体のソリッド要素35個を接続させた。これは、地山側へのコンクリートの温度分布の影響がなくなるところまでの設定とした。以上の計算条件で、前川¹¹⁾、石田ら^{12), 13)}が提案している解析手法でコンクリートの物性値の経時変化を試算した。

b) 解析結果

収縮ひずみの経時変化の計算結果を図-17に示す。コンクリートの収縮ひずみ等の物性値の経時変化に起因するひびわれ発生、進展解析は、三次元モデルで計算する必要があることから、温度伝達および水分移動は一次元であるが、計算は三次元要素で計算を実施している。三次元モデルで計算しているため、収縮ひずみは地山方向の成分である半径方向と、それに直交するトンネル軸方向と周方向の3成分が得られる。この内、図-17には、もっとも収縮ひずみが大きい周方向の成分（軸方向もまったく同じ値を示している）を表示している。図-17の収縮ひずみは、コンクリート表面からの位置で示しており、ひずみat0mmと記載しているのは表面のひずみであり、ひずみat300mmは地山側のコンクリートのひずみである。

ひずみat0mmの表面の収縮ひずみは、打設後半年経過するまでに収縮ひずみが急激に増大し、その後は季節変動に応じて収縮ひずみ変動している。これに対して、ひずみat300mmの地山側のコンクリートの収縮ひずみは、季節変動の影響を多少は受けているが、全体としては収縮ひずみが増加する傾向を示しており、50年経過した時点でも収縮ひずみは微増する傾向を示している。この原因は、地山側のコンクリートの水分が徐々に内空側に移動していることに起因している。また、収縮ひずみの経時変化のみでは養生の有無による相違を確認することはできない。

なお、半径方向についても、最大値は異なるが、収縮ひずみの経時変化の傾向は図-17と同様である。

(4) 脱型時期および養生の有無によるひびわれ発生、進展解析

前項で脱型時期および養生の有無による収縮ひずみ等のコンクリート物性値の経時変化を推定できることが明らかになった。そこで、コンクリート物性値の経時変化にもとづいて、覆工コンクリートのひびわれ発生、進展を解析した。

a) ひびわれ解析の設定

ひびわれ解析は、各要素にひびわれが発生する分布ひびわれモデルを用い、ひびわれの局所化を考慮したものを使用した¹⁵⁾。また、ひびわれ発生後の引張応力は、コンクリート標準示方書に定められた引張軟化曲線に従う。

図-18に前項の覆工コンクリート部材の物性値の経時変化で算定された解析結果から、ひびわれ発生、進展解析に用いた圧縮強度等の強度特性の経時変化を示す。圧縮強度については、脱型時間を延長した養生Cが養生A、養生Hと比較して打設後3日で20N/mm²程度と初期強度が高くなっている。ひびわれ発生、進展解析では、脱型した段階で覆工コンクリート自重が作用するものとして解析を行っている。また、境界条件としては、アーチ脚部はインバートコンクリートで完全に拘束されているものと想定し、完全固定とした。側壁からアーチ部については、覆工コンクリート部材は地山側へ変形しないものとして解析を行った。また、モデル化の範囲は対称条件を考慮して、天端部からの半分の領域とした。

b) ひびわれ発生、進展解析結果

図-19にひびわれ発生状況を示す。計算結果によるとコンクリート打設後50日経過した時点で覆工コンクリートにひびわれが発生する。ただし、ひびわれ幅は、計算上は0.02mm以下のマイクロクラックと呼ばれるもので目視での確認が困難なものと判断される。このマイクロクラック領域では、骨材とモルタルとの界面はく離やモルタル中に微細な亀裂が複数発生しているが、この界面はく離や微細な亀裂は連続していない状態で引張応力の

養生A

養生C

養生H

図-18 ひびわれ発生、進展解析に用いたコンクリートの物性値

図-19 脱型時期および養生環境の有無によるひびわれ発生、進展の相違

図-20 型枠パイププレート配置図

伝達も期待できるとされている。したがって、図中の0.02mm以下のひびわれ幅の領域は、計算上のひびわれ発生であり実際には引張応力が伝達されていることから、一般的にいわれているひびわれ領域と異なることに注意が必要である。計算上、完全に引張応力の伝達がなくなり、ひびわれが局所化して連続する領域は図中の赤色以上の部分であり、その時のひびわれ幅は0.06mm以上である。養生A、養生C、養生Hでひびわれ発生、進展に大きな差異はなく、インバートで拘束された側壁部にひびわれが発生している。天端部には、ひびわれ幅が0.05mm以下のマイクロクラックが軸方向に局部的に生じている。脱型時の影響については、脱型した直後に天端沈下が0.5mm前後発生するが、その後のコンクリートの収縮ひずみの影響で天端沈下は5～6mm程度となっており、自重による影響は軽微であると判断される。覆工コンクリートの収縮ひずみ量は、前述で示したようにコンクリートの配合で決定され、養生の影響はない。また、収縮ひずみの発現速度は、坑内環境に依存しており、自重の影響も収縮ひずみに比べると軽微であるために、長期的なひびわれ発生、進展には大きな影響を与えなかったものと推定される。ただし、材齢50日におけるひびわれ発生状況が多少違うことから、ひびわれが発生する時期については、脱型時期や養生の有無が影響を与えているものと推定される。

(5) 材料分離によるひびわれ発生、進展解析

大型試験体の実験で、中流動覆工コンクリートは締固めによる材料分離が発生しにくいことが明らかになったが、コンクリートの流動や締固めにより粗骨材変動率が±20%変化することが確認された。そこで、本項目では粗骨材変動率と覆工コンクリートのひびわれ発生、進展との関係を把握する目的で、材料分離が生じたことを想定したひびわれ発生、進展解析を実施した。

想定した材料分離領域(高さ 50cm)

図-21 想定した材料分離範囲

a) ひびわれ解析の設定

中流動覆工コンクリートでは、型枠パイププレートで打設高さ50cmごとに締固めることが標準的な施工方法とされている。そのため、図-20に示すようにアーチ肩部分では、型枠パイププレートAの作動回数が他の箇所より多くなる傾向がある。また、アーチ肩部では粗骨材が側壁方向へ沈降する可能性も想定される。以上のことから、図-21に示すようにアーチ肩部分にトンネル軸方向に連続して材料分離領域が生じたと仮定して解析を行った。

解析では、粗骨材変動率を-50%、-100%とし、配合はT1(Ad)とした。なお、粗骨材変動率を-50%と設定したのは、事前に解析を実施し、ひびわれが顕在化する領域をトライアルし定めたものである。また、材料分離の解析は、打設後18時間で脱型してまったく養生を実施しない養生Aのみを行った。材料分離領域の収縮ひずみの増加率は、図-4に示す粗骨材変動率と収縮ひずみ比の関係にもとづいて算定した。

b) ひびわれ解析結果

図-22に粗骨材変動率をパラメータとしたひびわれ発生、進展の解析結果を示す。粗骨材変動率を-50%と設定した解析結果では、材料分離領域に0.06mm程度のひびわれが複数発生しており、材料分離による収縮ひずみの増加により、引張応力の伝達がない完全に開口したひびわれが新たに形成される。粗骨材変動率が-50%に達しない場合には、完全に開口したひびわれの発生はない（図-22 養生A（自重あり）参照）。粗骨材がまったくない状態を想定した粗骨材変動率-100%では、材料分離領域で多くのひびわれが発生しており、ひびわれ幅は最大で0.16mmを越えており、材料分離がひびわれを引起す要因となっていることが明らかになった。

図-22 材料分離によるひびわれ発生、進展への影響

5. まとめ

中流動覆工コンクリートを用いた覆工コンクリートの長期健全性を評価する目的で、本論文では養生環境によるコンクリートの物性値への影響を室内実験で確認し、さらにコンクリートの物性値の経時変化を数値解析で検討した。その結果をまとめると次のようになる。

(1) 養生効果確認実験

長さ変化試験結果では、乾燥材齢180日における収縮ひずみ量に対して養生の影響はない。ただし、乾燥収縮は、養生が終了しコンクリート表面から水分が発散する時点から生じるため、初期材齢では養生による収縮ひずみ量に違いが見られる。

材齢28日の圧縮強度は、一般的には養生期間が長くなると増加する傾向にあるが、水中養生を7日間実施すれば28日間水中養生を行ったものと同等となった。

脱型後の膜養生、封緘養生の7日間実施および脱型時間の72時間存置で、28日間水中養生した圧縮強度の90%程度以上の強度を概ね確保でき、かつ表面の緻密性を示す透気係数も概ね良好な値を示す。

実トンネルで想定される養生設備を構築する時間（脱型後8時間）にコンクリートを乾燥状態（室温20℃、湿度60%）に放置しても、その後、水分逸散防止あるいは水分供給等の養生を実施すれば品質に大きな影響を与えない。

(2) 材料分離実験

粗骨材量が配合より小さくなる粗骨材変動率が0%以下の範囲では、粗骨材変動率の低下率と収縮ひずみの増加率とは比例関係にある。まったく粗骨材が含まれない場合の収縮ひずみは、配合どおりのコンクリートの2倍となる。

中流動覆工コンクリートを対象に実施した実験結果では、最適な振動エネルギーの30倍程度の振動エネルギーを締固め時に与えても、粗骨材変動率が-20%程度であった。

(3) 実環境におけるひび割れ発生、進展解析

コンクリートの水分移動を考慮した解析手法で、コンクリートの収縮ひずみや強度発現等の物性値の経時変化を追跡することができる。

トンネルの実環境下を想定した解析結果から、コンクリートの収縮ひずみに起因するひび割れの発生、進展は、脱型時期および養生の有無に関係していないことが明らかになった。

中流動覆工コンクリートで施工されたトンネルを対象に材料分離による影響を検討した結果、粗骨材変動率が-

50%以下になると材料分離に起因したひび割れ発生、進展が顕著になる。

(4) 施工管理基準の提案

本論文における実験および解析の検討結果から、中流動覆工コンクリートの養生等に関する施工管理基準としては、型枠を取り外す時間を3日（72時間）程度とするか、型枠取り外し後（8時間程度の養生構築時間含む）から給水、水分逸散防止、封緘および膜養生等で覆工コンクリート表面を7日間湿潤状態に保つ養生を標準とする提案を行った。また、中流動覆工コンクリートの締固め時に想定される振動エネルギー程度では、コンクリートの収縮ひずみ差によるひび割れの発生には影響を与えない結果であったことから、今回確認した最適な振動エネルギーの30倍程度の振動エネルギーを上限として、中流動覆工コンクリートで採用している型枠パイプレータの配置を検討する内容の提案を行った。

謝辞：本論文の核であるひびわれ進展、解析について、石田哲也東大教授、土屋智史博士の両氏にはコンクリートの収縮ひずみの経時変化に関する解析手法を御指導頂きました。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 馬場弘二, 伊藤哲男, 城間博通, 宮野一也, 中島浩, 谷口裕史: 施工中のトンネル坑内環境と覆工コンクリートの湿度変化に関する研究, 土木学会論文集 No. 742/VI-60, pp. 27-35, 2003.9
- 2) 高山博文: トンネル覆工コンクリートの初期ひび割れ抑制に関する研究, 京都大学学位論文, 2009
- 3) 郭度連, 宇治公隆, 国府勝郎, 上野敦: 養生条件によるコンクリートの組織変化と中性化を支配する細孔径の評価, 土木学会論文集 No. 718/V-57, pp. 59-68, 2002.11
- 4) 東日本・中日本・西日本高速道路(株): トンネル施工管理要領, 2015.7
- 5) セメント協会: コンクリート専門委員会委員会報告ダイジェスト版, pp. 37-39, 2011.3
- 6) 土木学会「構造物表面のコンクリート品質と耐久性能検証システム研究小委員会（335 委員会）成果報告書およびシンポジウム講演概要集」
- 7) 松下文明, 柴田純夫, 張文艶, 濱幸雄: モルタル・コンクリートの乾燥収縮特性に及ぼす骨材種別の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.107-112, 2011
- 8) 土木学会: コンクリート標準示方書〔設計編: 本編〕, p. 40, 2012
- 9) 坂井吾郎, 安齋勝, 近藤啓二, 菅俣匠: 特殊な混和剤を用いたトンネル覆工中流動コンクリートの開発, セメント・コンクリート, No.787, 2012.9
- 10) 梁俊, 丸屋剛, 坂本淳, 松元淳一, 下村泰造, 滝沢正徳: 締固め完了エネルギーに基づくコンクリートの締固め完了範囲の評価方法に関する研究, 土木学会論文集 E2 (材料・コンクリート構造), Vol. 69, No. 4, pp. 438-449,

2013

- 11) Maekawa, K., Chaube, R. and Kishi, T. : Modelling of Concrete Performance Hydration, Microstructure Formation and Transport, E & FN SPON, 1999.
- 12) Maekawa, K., Ishida, T. and Kishi, T. : Multi-Scale Modeling of Structural, Taylor and Francis, 2008.
- 13) 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.
- 14) 川又篤, 松岡茂, 窪田賢司 : 山岳トンネル覆工コンクリートのひび割れ発生パターン, 土木学会年次学術講演会概要集, III-086, pp.171-172, 2012.9
- 15) 渡辺忠朋, 松岡茂, 武田康司 : 破壊力学に基づくRC 部材のせん断耐力の研究, 土木学会論文集 V, 592 巻, V-39, pp.25-36, 1998.5

(2015. 5. 18 受付)

EXPERIMENTAL VERIFICATION ON IMPROVING LONG-TERM HEALTH OF LINING CONCRETE BY CONTROLLING CRACKS

Maresuke MIZUNO, Hiroshi YAGI, Tetsuya IWAO , Shigeru MATSUOKA and Kazuo NISHIMURA

In the study, we carried out laboratory experiments and numerical analysis to verify how the curing environment and construction method of lining concrete cause cracks, so that we may prevent concrete pieces from falling and improve the long-term health of lining concrete. As a result, we found that the necessary compactness of concrete surface can be secured, if the concrete is cured in a wet condition for 7 days. As for the construction method, applying excessive compaction energy did not have a major impact on the quality of concrete. We also analyzed the crack propagation based on the physical properties obtained from laboratory tests. It was found that harmful cracks were not generated in the short-term (50 days), and in the long-term (50 years), occurrence and crack propagation caused by shrinkage strain of the concrete were not influenced by the curing environment. Based on these findings, we will propose construction management guidelines for medium-fluidity lining concrete.