

論文 若材齢に着目した加温養生時における覆工コンクリートの内部温度推移と強度発現性状

松本 隆太郎*1・齋藤 隆弘*2・遠藤 宏朗*3・稲垣 太浩*4

要旨：覆工コンクリートは打設後 12～20 時間程度で脱型されることが一般的で、脱型に必要な圧縮強度を確保するために加温養生が検討される。若材齢時のコンクリート圧縮強度は温度履歴の影響を大きく受けることから、脱型時の圧縮強度管理にはコンクリートの内部温度を的確に把握することが重要である。本研究では、コンクリートの練上がり温度、加温養生、環境温度が、若材齢時のコンクリートの内部温度推移とそれに伴う圧縮強度の発現に及ぼす影響を把握することを目的とした。加温養生を行ったコンクリート供試体内部の温度を測定し、積算温度から圧縮強度の発現性状を把握した。また、FEM 解析によりコンクリート温度推移の再現を試みた。

キーワード：山岳トンネル、覆工コンクリート、若材齢、加温養生、積算温度、面状発熱体、FEM 解析

1. はじめに

山岳トンネルにおける覆工コンクリートは打設後 12～20 時間程度の若材齢で脱型されることが多く、脱型に必要な圧縮強度は、表面剥離等が無く荷重や自重に耐えられる圧縮強度として、 $2\sim 3\text{N/mm}^2$ が目安¹⁾とされる。

セメントの水和反応は特に若材齢時に温度依存性が高く、打設終了から脱型までのコンクリート温度は、コンクリートの練上がり温度、坑内温度の変動、施工中のトンネルの貫通の有無による通風状況等により影響を受け変動する。そのため実施工では、脱型に必要とされる圧縮強度を確保するため、脱型前の養生において、鋼製型枠を面状発熱体等で加温し、熱伝導とそれに伴う水和促進によりコンクリート温度を高める加温養生が行われる場合がある。この際、脱型時の圧縮強度の不足やコンクリート温度の過度な上昇により、脱型後に剥落や温度ひび割れ等覆工コンクリートの不具合を招く恐れがあることを考慮すると、各種の環境条件に応じて過不足なく脱型時の圧縮強度を確保するための適切な加温方法を検討する必要があるといえる。

本研究では、加温養生によるコンクリート温度の推移および圧縮強度状況の把握を目的に、覆工コンクリートを模擬した 300mm 角の供試体を用い、鋼製型枠面を面状発熱体により加温し、供試体の内部温度分布を測定した。パラメータは、コンクリートの練上がり温度、面状発熱体の加温設定温度、加温時間とした。これにより加温した鋼製型枠面から覆工コンクリートの厚さ方向の若

材齢時の温度分布の履歴を把握した。圧縮強度は、筆者らが提案した若材齢時に着目した積算温度と圧縮強度の関係から得られる圧縮強度推定式に基づき推定した²⁾。

また、面状発熱体は、覆工コンクリートの鋼製型枠全面に設置するのではなく、一定の間隔で設置する。ここでは、発熱体の無い箇所での覆工コンクリートへの加温を、鋼製型枠の熱伝導に期待している。しかしながら、実際に鋼製型枠の熱伝導により覆工コンクリート全体を加温できるかは不明であり、これを確認するため、縦 300mm、横 300mm、高さ 1010mm の供試体の側面の 1 面に鋼製型枠面を模擬した鉄板を設置し、その最下部のみを面状発熱体により加温する実験を実施した。

さらに、これらの 2 種類の実験における供試体の内部温度履歴が、3 次元 FEM 解析により再現可能であるかについての検討を行った。

2. 実験概要

2.1 300mm 角の供試体を用いた加温養生実験

(1) 供試体および測定方法

写真-1 にコンクリート打込み前の供試体の状況を示す。供試体の寸法は一般的な覆工コンクリートの設計厚さを考慮して 1 辺 300mm の立方体とし、型枠の 1 面は鋼製型枠面を模擬した鋼板 ($t=9\text{mm}$)、他の 5 面は断熱材 ($t=45\text{mm}$) を配置した。面状発熱体は鋼板の外側に設置した。また、防水シートを介して地山側へ熱移動する影響を検討するため、一部のケースでは供試体背面にコン

*1 (株) 奥村組 技術本部 技術研究所 土木研究グループ 主任研究員 (正会員)

*2 (株) 奥村組 技術本部 技術研究所 土木研究グループ長 博士 (工学) (正会員)

*3 中日本高速道路 (株) 岐阜工事事務所

*4 中日本高速道路 (株) 岐阜工事事務所 副所長 博士 (工学)

クリート($t=45\text{mm}$)および防水シートを配した。

面状発熱体は、内蔵された熱電対から得られる温度に基づいて温度制御される。加温制御は、設定温度に達するまでは連続的に発熱体に電流が供給され、設定温度に到達後は電流の供給の停止と開始を繰り返すことで、設定温度を維持する。温度の測点は、コンクリート表面(鋼板とコンクリートの境界、鉄板からの離隔 0mm) および外側(鉄板と面状発熱体の境界)、コンクリート内部(写真-1 中の赤丸、鋼板からの離隔は 30, 150, 270mm)とし、各測点に熱電対を設置し、コンクリート打込み前から脱型の目安である打込み後 16 時間まで計測を行った。なお、実験は気中の温度が 20°C 一定の室内で行った。また、脱型後には、コンクリート表面のシュミットハンマー(PT 型)による強度推定を実施した。

(2) コンクリートの配合および実験ケース

コンクリートの計画配合と使用材料を表-1 に示す。コンクリートの配合は、トンネル施工管理要領³⁾に基づいた中流動コンクリートを用いた。実験ケースを表-2 に示す。コンクリートの練上がり温度の目標値は冬期および春秋期を想定し 10°C 、 15°C 、 20°C 、面状発熱体の設定温度は過去の加温養生の実績を参考に 20°C (加温無し)、 30°C 、 40°C 、 50°C とした。供試体は全面を断熱材もしくは発熱体により囲まれているため、季節ごとの温度の違いは、練上がり温度のみを変えることで検討した。また、練上がり温度 15°C 、面状発熱体の設定温度 40°C において、コンクリート打込みから加温終了までの時間を 10 時間、6 時間と早めたケースを設定した。これは、過度なコンクリート温度の上昇を防ぐための方法として、加温終了時間を早める方法の効果を検討する目的で実施した。

2.2 高さ 1010mm の供試体を用いた加温養生実験

(1) 供試体および温度測定方法

図-1 に供試体の概要を、写真-2 に供試体の写真を示す。供試体の寸法は奥行 300mm、幅 300mm とし、実験現場における面状発熱体の配置間隔を考慮し、面状発熱体からの離隔を 800mm 以上確保するために、供試体の高さを 1010mm とした。型枠の 1 面は鋼板($t=9\text{mm}$)とし、鋼板の最下端に幅 160mm の面状発熱体を設置した。他の 5 面には断熱材($t=45\text{mm}$)を配置した。温度の測点は、コンクリート表面および外側、コンクリート内部とし、各測点に熱電対を設置した。測点の高さは、供試体の最下面から 80mm の位置から 50~200mm の間隔で、図-1 に示すピッチで配置した。

(2) コンクリートの配合および実験条件

コンクリートの配合は、2.1 に示す実験と同様に、表-1 に示すものとした。コンクリートの練上がり温度の目標値を 15°C 、面状発熱体の設定温度は 30°C とし、コンクリート打込みから 16 時間まで加温を行った。なお、実験

は気中の温度が 20°C 一定の室内で行った。

3. 実験結果

3.1 300mm 角の供試体を用いた加温養生実験

(1) 練上がり温度の目標値 15°C の温度履歴

春秋期を想定し、コンクリートの練上がり温度の目標値を 15°C 、加温設定温度を 40°C 、 20°C (加温なし) としたケースの供試体の温度履歴を図-2 に示す。

加温なしのケースでは、コンクリート温度はセメントの水和熱により緩やかに上昇し 16 時間では $24^{\circ}\text{C}\sim 25^{\circ}\text{C}$ となり、厚さ方向の測点毎の温度は、経過時間によらず差はほぼ見られなかった。

加温ありのケースにおいて、測点 0mm の温度推移は、面状発熱体の加温の影響により打設直後に約 24°C まで急激に上昇した。その後は概ね同一の勾配で上昇し、練混ぜ後約 12 時間で設定温度の 40°C に達した。面状発熱

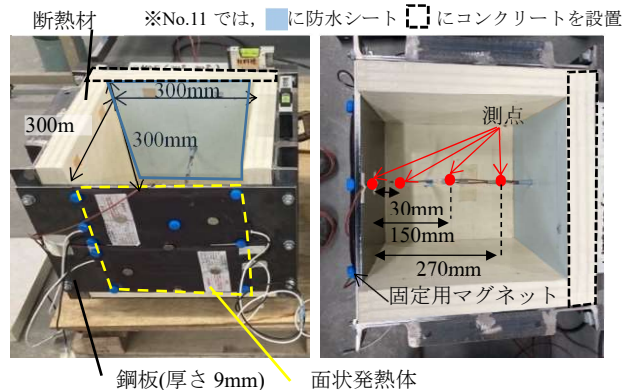


写真-1 供試体型枠の状況

表-1 コンクリートの計画配合・使用材料

Gmax mm	スランブ cm	空気量 %	W/C %	s/a %	単位量 (kg/m ³)				
					W	C	S	G	Ad C×%
25	21 (35~50)*	4.5	50	52.2	175	350	904	838	1.0

※スランブフロー 材齢 28 日における基準圧縮強度: 24N/mm^2
C: 普通ポルトランドセメント、密度 3.16g/cm^3 、比表面積 $3080\text{cm}^2/\text{g}$
S: 長良川水系 川砂、表乾密度 2.59g/cm^3 、粗粒率 2.83、吸水率 1.69%
G: 長良川水系 砂利、表乾密度 2.62g/cm^3 、吸水率 1.60%
Ad: 高性能 AE 減水剤、標準型 1 種、密度 1.06g/cm^3

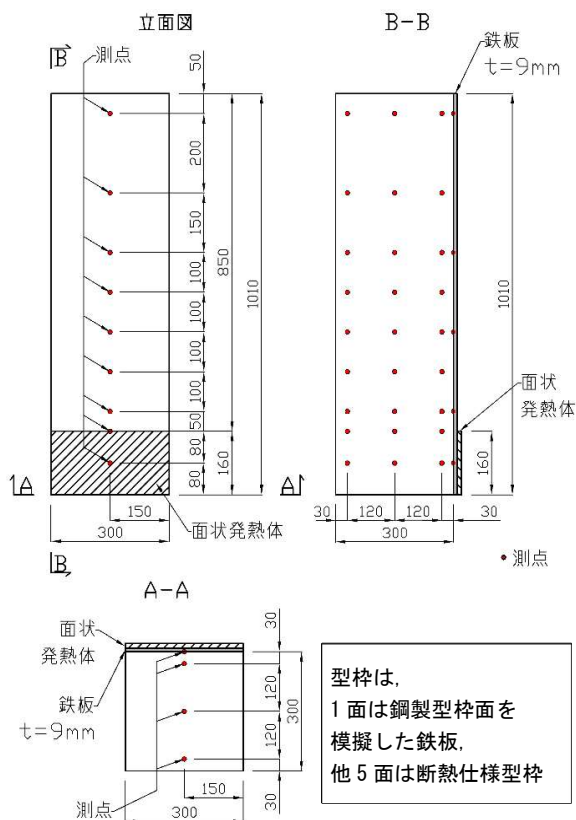
表-2 実験ケース

実験 No.	練上がり温度 の目標値($^{\circ}\text{C}$)	加温設定 温度($^{\circ}\text{C}$)	備考
1	10	50	
2	15	20	
3	15	30	
4	15	40	
5	15	50	
6	20	20	
7	20	30	
8	20	50	
9	15	40	打設後10時間で加温停止
10	15	40	打設後6時間で加温停止
11	15	30	発熱体の対面に防水シートと硬化後のコンクリート(45mm)配置

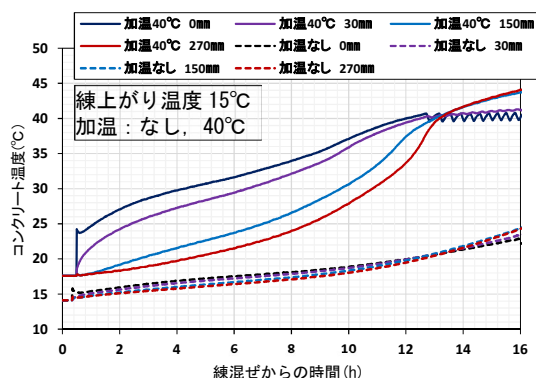
体は、温度制御により設定温度の 40℃前後を維持し、測点 0 mm の温度は面状発熱体の温度と同様の推移を示した。測点 30 mm での温度は、測点 0mm に追従するように比較的早期に上昇し、練混ぜ後約 12 時間で 40℃に達した。これに対して、測点 150mm, 270mm での温度は、比較的緩やかに上昇し、練混ぜ後約 13 時間で鋼板のコンクリート側を上回り 16 時間では 40～43℃程度となった。この結果、加温なしの場合と比べ 16 時間で 20℃程度内部温度が高くなった。面状発熱体による熱が鋼板を介してコンクリートに伝導するのに加え、コンクリートの水和反応が加熱により促進された結果と考える。

(2) 練上がり温度の目標値 10℃の温度履歴

冬期を想定し、コンクリートの練上がり温度の目標値



図－1 供試体の概要

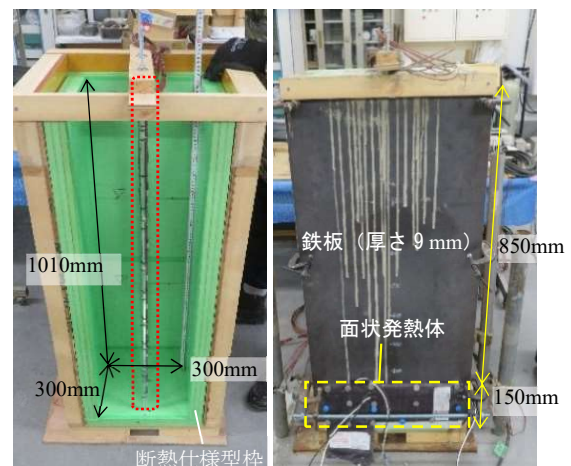


図－2 練上がり温度 15℃のコンクリート温度

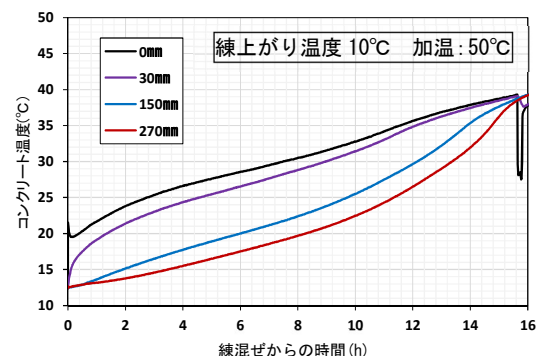
を 10℃，加温設定温度を 50℃とした場合の供試体の温度履歴を図－3 に示す。鋼板から 0 mm，30 mm の位置では、コンクリート打込み直後に温度が上昇し、その後も温度が上昇し続け、脱型時（打込みから 16 時間）では 38℃程度まで温度が上昇した。これに対して、鋼板から 150mm，270mm の位置では、温度の上昇は鋼板側より緩やかであるものの、脱型時には鋼板側と同様の温度となった。練上がり温度が 10℃と低いため、セメントの水和による温度上昇が緩やかになり、その影響で供試体内部の温度上昇が遅れたと考えられる。

(3) 加温終了までの時間を短縮した場合の温度履歴

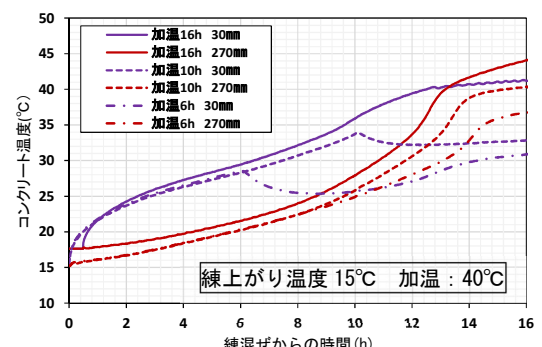
図－4 に加温設定温度を 40℃とし、コンクリート打込み後、6 時間、10 時間で加温を停止したケースでの供試



写真－2 供試体型枠および打設後の状況



図－3 練上がり温度 10℃のコンクリート温度



図－4 加温時間ごとのコンクリート温度

体の温度履歴を示す。ここでは、測点 30mm, 270mm の位置における結果を示している。

測点 30mm では、加温停止後一時的に温度が下降するものの、その後、セメントの水和熱により緩やかな上昇に転じる。測点 270mm では、加温を停止しても温度の低下は見られないものの、加温停止以降は停止が早いほど温度が低くなる傾向がみられた。脱型時の温度について、同一の温度条件で脱型まで加温したケース（図－2）と比較すると、脱型まで加温した場合の温度（44℃）よりも 4℃から 7℃低い温度となった。このことから、内部温度の過度な上昇を抑える方法として、加温終了までの時間を短縮することの有効性を確認した。

(4) 地山側への熱移動の影響検討

コンクリートの練上がり温度の目標値を 15℃、加温設定温度を 30℃とし、背面に断熱材を設置したケースとコンクリートおよび防水シートを配したケースの温度履歴を図－5 に示す。測点 270mm では、10 時間程度で差が生じはじめ、16 時間で 4℃程度の差となり測点 150mm より大きい差となる。この箇所での積算温度による推定圧縮強度の差は、16 時間で 0.2N/mm² であり、防水シートを介した熱移動は存在するものの、脱型時の強度推定においては、実務上では特別な考慮を要しないと考える。

(5) 積算温度および推定圧縮強度

脱型時（打込みから 16 時間）の積算温度と推定圧縮強度の最小値、加温面のシュミットハンマー試験結果を表－3 に示す。圧縮強度は、筆者らが提案した積算温度式（式(1)）と圧縮強度推定式（式(2)）により算出した²⁾。

$$M = \sum(\theta - 3) \cdot t \quad (1)$$

ここに、M：積算温度（℃・h）、t：時間（h）、
θ：コンクリート温度（℃）

$$\sigma(t) = 0.0177M - 2.4677 \quad (2)$$

ここに、σ(t)：時間 t での圧縮強度（N/mm²）、
M：積算温度（℃・h）

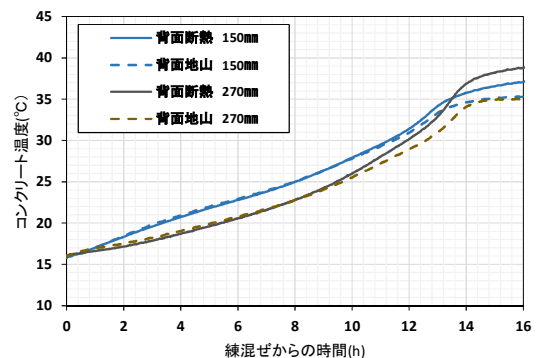
表－3 から、同一の加温条件では、コンクリートの練上がり温度が高いほど、脱型時の積算温度が増大し、また、同一の練上がり温度では、加温設定温度が高いほど、積算温度が増大している。コンクリートの温度は、練上がり温度、加温、それらに影響を受けるセメントの水和熱の相互作用の結果であるが、それらのパラメータの影

響が明確に表れていることを示す。また、No.2 以外の加温した全てのケースで 2N/mm² 以上の推定圧縮強度となり、脱型可能な圧縮強度を概ね満たした。シュミットハンマー試験の結果は、積算温度による推定圧縮強度より全ケースで高い値を示す。これは推定圧縮強度が最小値となる測定位置とシュミットハンマーの測定位置（表面）が異なること、PT 型シュミットハンマーの適用範囲は 5N/mm² 以下であり、それ以上の結果が含まれること、脱型作業に伴うタイムラグなどが考えられる。

3.2 高さ 1010mm の供試体を用いた加温養生実験

コンクリートの内部温度の推移を図－6 に示す。各図における縦方向の値は供試体底面からの高さ、横方向の値は鋼板からの水平方向の深さを示している。コンクリート打込みから 0～12 時間までは、発熱体のある供試体下部および鋼板側の温度が高くなり、高さ方向、深さ方向に発熱体から離れるほど温度が低くなる。しかしながら、鋼板近傍のコンクリート温度は、面状発熱体より上部であっても徐々に上昇しており、鋼板の熱伝達によりコンクリートを加温する効果が得られていると考えられる。12 時間以降は、高さ方向では上方ほど温度が低くなる傾向は変わらないものの、深さ方向では鋼板から離れるほど温度が高くなっており、12 時間までの傾向と逆転する。これは、12 時間以降では内部では加温に加え、セメントの水和熱が蓄積することで温度が上昇したのに対し、表面側では鋼板から放熱されたためと考えられる。

コンクリート打込み後 16 時間の積算温度を図－7 に示す。発熱体の近傍で積算温度が他の箇所より高いものの、いずれの測点でも 300℃・h 以上（推定圧縮強度 2.9N/mm² 以上）の積算温度となっており、場所による大きなばらつきは見られず、脱型時におけるコンクリートの



図－5 地山ありのコンクリート温度との比較

表－3 脱型時の積算温度および推定圧縮強度の最小値

実験No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
練上がり温度の目標値(℃)	10	15	15	15	15	20	20	20	15	15	15
加温設定温度(℃)	50	20	30	40	50	20	30	50	40	40	30
加温停止時間(h)	16	16	16	16	16	16	16	16	10	6	16
測定位置(mm)	270	270	270	270	270	0	0	270	270	270	270
積算温度(℃・h)	302	244	355	409	411	348	440	456	357	336	344
推定圧縮強度(N/mm ²)	2.9	1.9	3.8	4.8	4.8	3.7	5.3	5.6	3.9	3.5	3.6
シュミットハンマー試験(N/mm ²)	5.4	2.0	4.9	6.6	6.7	6.3	8.6	—	5.2	4.4	6.9

圧縮強度に大きな差はなかった。このことから、面状発熱体を鋼板に部分的に設置した場合でも、面状発熱体から 800mm 程度の範囲では鋼板の熱伝達により、一定の加温効果をコンクリートに付与できることが確認できた。

4. 3次元 FEM 解析による温度履歴の再現

4.1 解析の概要

実構造物における若材齢時の温度変化を予測するために、実験における温度変化を解析により再現可能とすることは有用である。本研究では、コンクリートの 3 次元温度応力解析専用プログラムである ASTEA MACS を用いて、実験の温度変化の再現を試みた。

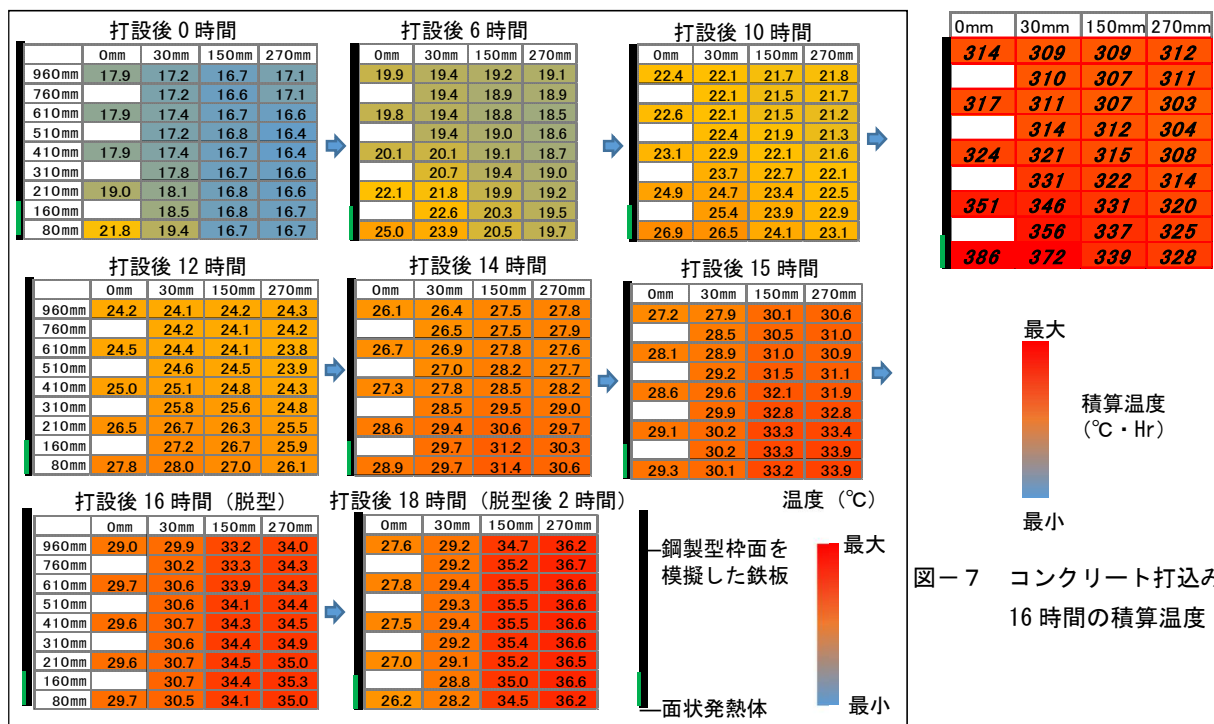
4.2 解析モデル・解析条件

解析モデルを図－8に、解析条件を表－4に示す。モ

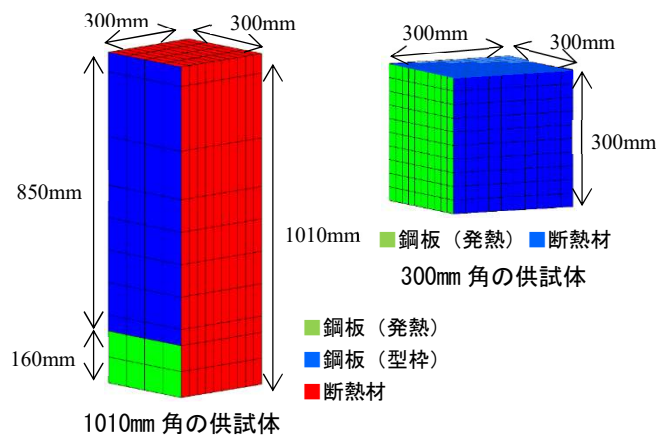
デルは、300mm 角の供試体、高さ 1010mm の供試体の 2 種類とした。実験と同様、供試体の外縁は、1 面のみを鉄板とし、他の 5 面は断熱材とし、外気に対しては表－4に示すように部材種毎の熱伝導率を設定した。加温の有無は、型枠部の外気の温度を変えることで表現し、加温する箇所の外気の設定は 30℃、それ以外の箇所の外気の設定は実験と同様に 20℃とした。コンクリートの練上がり温度は、15℃および 20℃とした。コンクリートの配合は、水セメント比と単位セメント量は実験の配合と同様としたが、セメント種には、実験に用いた普通ポルトランドセメントに加え、セメント種の違いによる水和特性の影響を確認するため高炉 B 種セメントを設定した。

4.3 解析結果

(1) 300mm 角の供試体モデルにおける解析結果



図－6 コンクリートの内部温度の推移



図－8 解析モデル

表－4 解析条件

水セメント比	50%
単位セメント量	350kg/m ³
セメント種	普通ポルトランドセメント 高炉 B 種セメント
鋼板(発熱)部の熱伝達率	200W/m ² ℃
鋼板(型枠)部の熱伝達率	14W/m ² ℃
断熱材部の熱伝達率	0.5W/m ² ℃
外気温度	20℃
コンクリートの練上がり温度	15℃(300mm,1010mm) 20℃(300mm)
鋼板(発熱)部の外気温度	30℃

コンクリートの温度履歴の解析結果を図-9、図-10に示す。同条件のケースにおける実測値も併記する。普通ポルトランドセメントを用いた解析結果では、いずれの練上がり温度においても練混ぜから4～6時間後から実測値より温度が高くなる結果となった。

高炉 B 種セメントを用いた解析結果と実験値を比較すると、部分的に解析値と実測値に差が生じる箇所はあるものの、いずれの練上がり温度においても両者の間で温度上昇傾向に大きな違いは見られず、設定したセメント種が異なっても結果的に若材齢時の温度変化が再現される形となった。普通ポルトランドセメントを用いた解析で実測値とコンクリート温度に差が見られた要因は、解析においてセメントの凝結後の発熱量が実験より大きかったことが想定されるが、この要因の詳細な分析は今後の課題としたい。

(2) 高さ 1010mm の供試体モデルにおける解析結果

高炉 B 種セメントを用いた解析における供試体の温度コンターを図-10に示す。注水後 12 時間程度までは、発熱体近傍の温度が最も高く、供試体の奥行方向の深部、上部となるのに従い温度が低下する。12 時間を超えると、発熱体のある最下部において供試体深部の温度が高くなり、16 時間では温度の高い領域が上方にも広がる。これは、実験と一致した傾向であり、実験と解析における温度差は 1、2℃程度の範囲に収まっている。注水後 12 時間程度までは、発熱体による加熱の影響が大きく、それ以降はセメントの水和の影響が大きくなるといえる。12 時間以降でも発熱体のある下部ほど温度が高いことから、発熱体による加温によりセメントの水和反応が促進されていると考えられる。

5. まとめ

覆工コンクリートの加温養生を模擬した、要素実験および解析により、脱型までの温度推移と圧縮強度の発現性状を文献 3)に記載されたコンクリートの仕様の範囲で確認した。主な結果を下記に示す。

- (1) 300mm 角の供試体を用いた加温養生実験により、様々な温度条件下での加温時の温度履歴および圧縮強度の発現性状を、コンクリート表面から背面まで把握できた。また、加温養生により、材齢 16 時間において積算温度による推定値で 2N/mm^2 以上の圧縮強度を温度条件に関わらず確保できることを確認した。
- (2) 高さ 1010mm の供試体を用いた加温養生実験により、発熱体を設置した箇所から鋼製型枠を通じた熱伝導により、コンクリートが加温され、セメントの水和反応を促進して温度上昇し、圧縮強度が発現する状況を 3 次元的に把握できた。また、打込み後 16 時間において、発熱体からの距離に関わらず、積算温度による

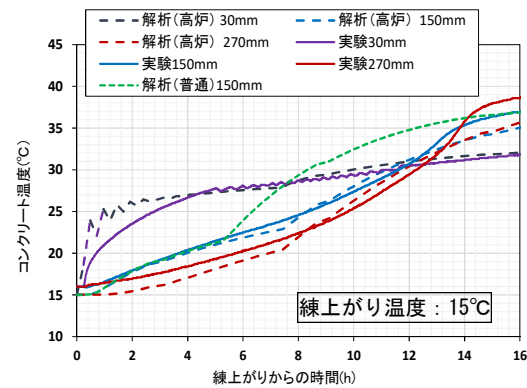


図-9 コンクリートの温度の解析結果
(練上がり温度 15℃)

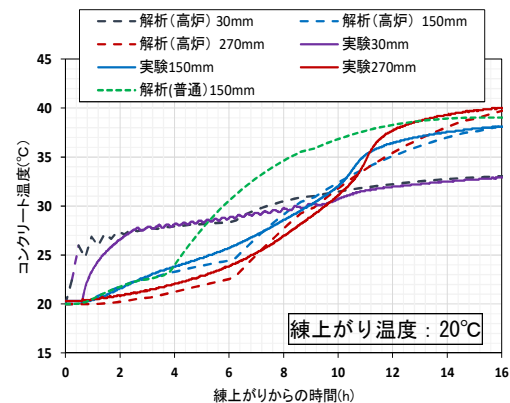


図-10 コンクリートの温度の解析結果
(練上がり温度 20℃)

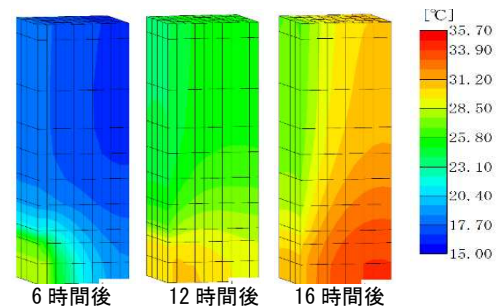


図-11 供試体の温度コンター (解析)

推定値で 2.9N/mm^2 の圧縮強度を確保できた。

- (3) 2 パターンの実験を 3 次元 FEM 解析による再現を試みた。この結果、実験における温度履歴を 3 次元的に再現できることを確認した。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準施工方書 [共通編]・同解説 / [山岳工法編]・同解説, p.193, 2016
- 2) 遠藤 宏朗ほか：積算温度を用いた覆工コンクリート脱型時の圧縮強度推定に関する検討, 第 77 回土木学会年次学術講演会, VI-251, 2022.8
- 3) 中日本高速道路株式会社ほか：トンネル施工管理要領, p.45, 2020.7