

論文 実構造物の計測結果に基づくクリープの影響を考慮したヤング係数の補正係数に関する評価

芦澤 良一^{*1}・横関 康祐^{*2}・藤岡 彩永佳^{*3}・溝渕 利明^{*4}

要旨: 温度ひび割れを精度良く評価するためには、実施工に則した入力条件を用いて温度応力解析を行うことが必要である。その一つとして、クリープの影響を考慮したヤング係数の補正係数を適切に設定することが重要であるが、データの蓄積が少ないのが実情である。ここでは、実構造物における温度やひずみ、応力の計測結果からクリープの影響を考慮したヤング係数の補正係数を求め、温度応力解析に及ぼす影響を評価した。その結果、クリープの影響を考慮した有効ヤング係数はマスコン指針よりも小さくなる場合があること、ヤング係数の補正係数は材齢に伴う変化を考慮して設定する必要があることが分かった。

キーワード: マスコンクリート, 温度応力, 有効ヤング係数, クリープ

1. はじめに

温度ひび割れは、コンクリート構造物の耐久性や水密性、美観などに影響を及ぼすことから、対象構造物の要求性能に応じて適切かつ合理的な対策を講じることが重要である。そのためには、できるだけ精度良く温度ひび割れを評価することが必要となる。

温度ひび割れの評価手法として、最近では2次元や3次元の有限要素法が用いられるケースが多い。これらの手法では、実施工に則した入力条件を用いることで精度が向上し、より信頼性の高い結果が得られる¹⁾。温度解析においては、断熱温度上昇特性や熱伝導率などの熱特性、表面熱伝達率などを適切に設定することで比較的高い精度で予測が可能である。一方で、応力解析では、強度特性、線膨張係数およびクリープ特性などが解析精度に影響を及ぼすが、必ずしも高い精度で評価できない場合がある。例えば、図-1は、実構造物における有効応力の計測値と解析値を比較したものである。解析値は実構造物の温度履歴を反映した上で、強度特性や線膨張係数を事前試験の結果に基づき設定したにも関わらず計測値との乖離が認められる。こうした乖離は、適切なひび割れ抑制対策を講じる上で合理性に欠けるものであるが、その一因としてクリープの影響が挙げられる。

クリープ特性については、一般にヤング係数に補正係数を乗じた有効ヤング係数を用いて評価される場合が多い。クリープの影響を考慮したヤング係数の補正係数については、日本コンクリート工学会「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」²⁾ (以下、マスコン指針と称する) に示されているとともに、これまでに幾つかの研究もなされている^{3) 4)}。しかしながら、この補正係数の

値や温度応力解析への設定方法などに関しては、データの蓄積が少ないのが実情である。

本報では、実構造物で計測した温度、ひずみおよび応力を基にクリープの影響を考慮したヤング係数の補正係数を算出するとともに、得られた補正係数を温度応力解析に反映した結果について示す。

2. 実構造物における計測

本研究では、構造物 A, B および C の3つの実構造物を対象とした。いずれの構造物においても、それぞれ同一箇所において、温度(熱電対)、全ひずみ(埋込み型ひずみ計)、無応力ひずみ(埋込み型ひずみ計および無応力容器)、有効応力(コンクリート有効応力計)を計測した。各構造物の具体的な計測位置については、後述する。

2.1 構造物 A (壁状構造物)

(1) 計測概要

構造物 A は、厚さ 0.6m、長さ 20m、高さ 6.0m の壁状構造物であり、高さ 3.0m ずつの 2 リフトで打ち込んだ。また、長さ方向に 5.0m 間隔でひび割れ誘発目地が設置

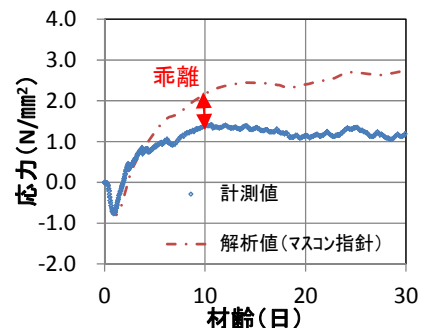


図-1 有効応力の比較の一例

*1 鹿島建設(株) 技術研究所 土木材料グループ 主任研究員 修士(工学) (正会員)

*2 鹿島建設(株) 技術研究所 土木構造グループ グループ長 博士(工学) (正会員)

*3 鹿島建設(株) 技術研究所 土木材料グループ 研究員 (正会員)

*4 法政大学 デザイン工学部 都市環境デザイン工学科 教授 博士(工学) (正会員)

されている。

計測位置は、2リフト目の下端から0.25mの高さにおいて、厚さ方向の中心とした。長さ方向については、5.0mのひび割れ誘発目地間の中央とした。また、各計測器は、長さ方向と平行に設置した。

1リフト目と2リフト目の打継間隔は約2カ月であり、2リフト目の打込み時における1リフト目の圧縮強度は24N/mm²以上であった。

表-1に、使用したコンクリートの配合を示す。高炉セメントB種（以下、BBと称する）を使用した水セメント比54.4%、目標スランプ12±2.5cmの普通コンクリートである。打込み時期は5月下旬であり、外気温17℃、コンクリート温度20℃であった。

(2) 計測結果

図-2に、構造物Aの温度、有効ひずみおよび有効応力の計測結果を示す。ここで、有効ひずみは、全ひずみから無応力ひずみを差し引いたものとした。

コンクリート温度は、材齢1日で約35℃に達した後、材齢10日までに温度降下して外気温に追従した。

有効ひずみは、圧縮ひずみが生じた後、引張ひずみに転じ、温度が降下した材齢10日以降はごく緩やかに低下する傾向を示した。

有効応力については、約0.1N/mm²の圧縮応力が生じた後、圧縮応力が減少していき引張応力に転じた。引張応力の最大値は、温度が降下した材齢10日において1.0N/mm²程度と比較的小さい結果であった。最大値以降は、有効ひずみと同様にごく緩やかに応力が緩和していく傾向を示した。ひび割れは、発生時期が不明であるもののひび割れ誘発目地に発生し、計測箇所としたひび割れ誘発目地間には生じなかった。

2.2 構造物B（壁状構造物）

(1) 計測概要

構造物Bは厚さ1.4m、長さ10m、高さ4.5mの壁状構造物であり、厚さ1.5m、幅10m、長さ26mの底版コンクリート上に1リフトで打ち込んだ。底版と壁の打継間隔は約6カ月であり、底版コンクリートの圧縮強度は30N/mm²以上であった。構造物Aと同様に、長さ方向に5.0m間隔でひび割れ誘発目地が設置されている。

表-1 コンクリート配合

構造物	セメントの種類	Gmax (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
							水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 A
A	BB	20	12.0	54.4	4.5	45.8	171	315	812	982	3.15
B	BB	20	8.0	50.0	4.5	44.0	150	300	833	1048	3.00
C	L	20	12.0	47.2	4.5	45.5	160	339	822	1015	4.75

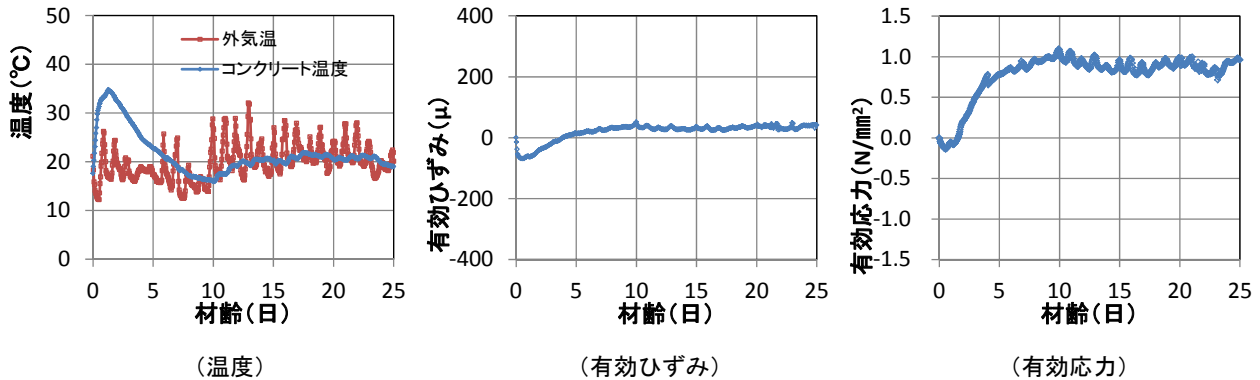


図-2 構造物Aの計測結果

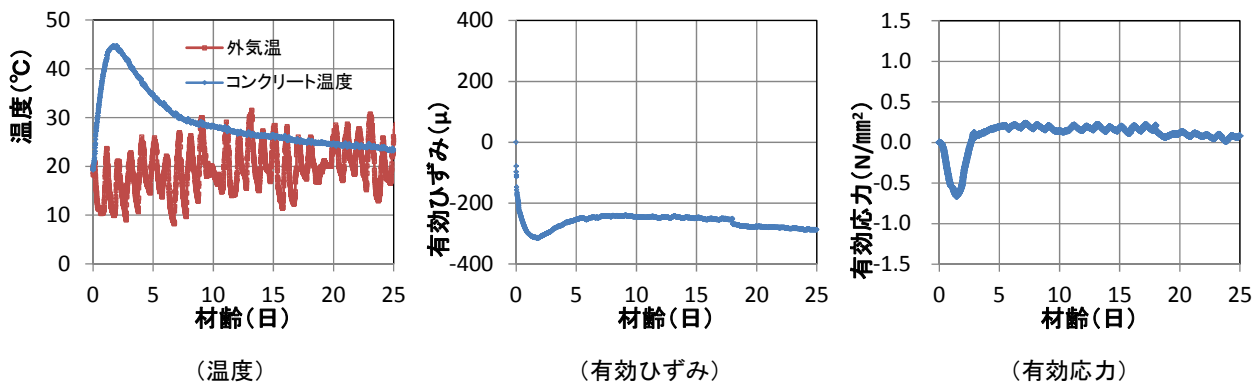


図-3 構造物Bの計測結果

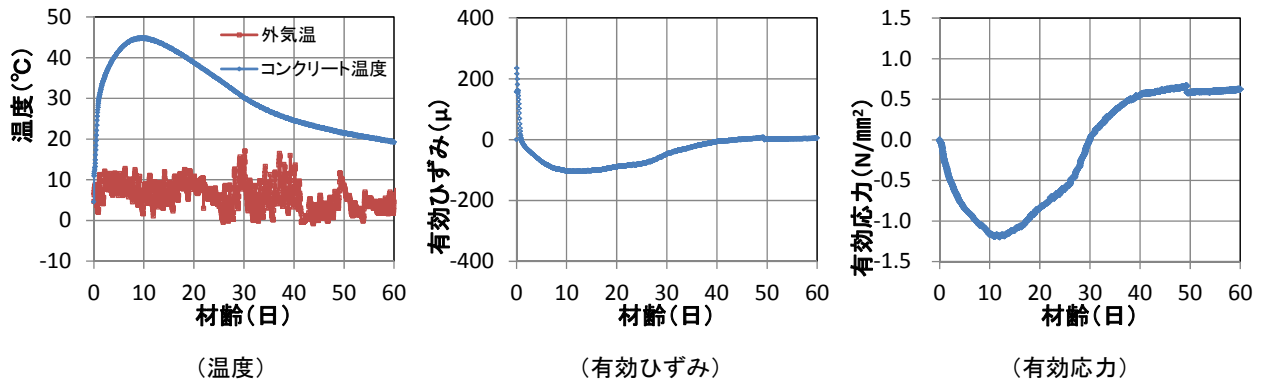


図-4 構造物 C の計測結果

計測位置は、1 リフト目の下端から 0.4m の高さにおいて、厚さ方向の中心とした。長さ方向については、5.0m のひび割れ誘発目地間の中央とした。また、各計測器は、長さ方向と平行に設置した。

コンクリートは、BB を使用した水セメント比 50%、目標スランプ 8 ± 2.5 cm の普通コンクリートである。配合を前掲の表-1 に併記する。打込み時期は 5 月上旬であり、外気温 15°C 、コンクリート温度 20°C であった。

(2) 計測結果

図-3 に、構造物 B の温度、有効ひずみおよび有効応力の計測結果を示す。

コンクリート温度は、材齢 2 日で約 45°C に達した後、材齢 25 日で 20°C 付近まで温度降下した。

有効ひずみは、圧縮ひずみが生じた後、僅かに引張側へ移行した。材齢 17 日付近でひずみ変動していることが確認される。

有効応力についても有効ひずみと同様の傾向を示し、引張応力の最大値は、材齢 9 日において $0.2\text{N}/\text{mm}^2$ 程度と小さい結果であった。有効ひずみと同様に、材齢 17 日付近で応力が緩和して $0\text{N}/\text{mm}^2$ に漸近している。ひび割れは、ひび割れ誘発目地のみに発生していることから、これは同箇所が生じたひび割れの影響と考えられる。

2.3 構造物 C (柱状構造物)

(1) 計測概要

構造物 C は、幅 4.0m、長さ 9.0m、高さ 20m の柱状構造物であり、高さ 5.0m ずつの 4 リフトで打ち込んだ。

計測位置は、フーチングの上に打ち込んだ 1 リフト目を対象とし、平面中央の下端から 0.4m の高さとした。また、各計測器は、長さ方向と平行に設置した。フーチングは幅 11m、長さ 11m、高さ 3.0m であり、1 リフト目との打継間隔は約 1 カ月であった。1 リフト目の打込み時におけるフーチングの圧縮強度は、 $24\text{N}/\text{mm}^2$ 以上であった。

コンクリートは、低熱ポルトランドセメントを使用した水セメント比 47.2%、目標スランプ 12 ± 2.5 cm の普通コ

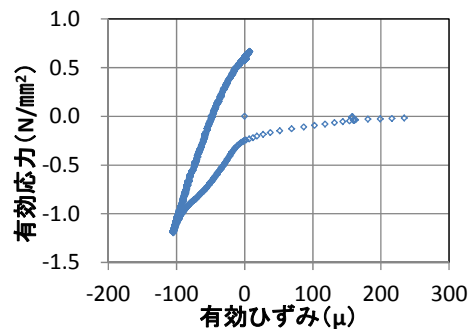


図-5 有効ひずみと有効応力の関係の一例 (構造物 C)

ンクリートである。配合を前掲の表-1 に併記する。打込み時期は 12 月下旬であり、外気温 7°C 、コンクリート温度 11°C であった。

(2) 計測結果

図-4 に、構造物 C の温度、有効ひずみおよび有効応力の計測結果を示す。

コンクリート温度は、材齢 10 日で約 45°C に達した後、材齢 60 日で 20°C 付近まで温度降下した。本構造物は、構造物 A および B と比べて部材断面が大きく、最高温度に達するまでの材齢や温度降下する材齢が異なることに特徴がある。

有効ひずみは、圧縮ひずみが生じた後、僅かに引張側へ移行した。

有効応力については、約 $1.2\text{N}/\text{mm}^2$ と構造物 A や B よりも大きな圧縮応力が生じた後、圧縮応力が減少していき引張応力に転じた。引張応力の最大値は、材齢 50 日において $0.6\text{N}/\text{mm}^2$ であった。なお、本構造物では、最終的にひび割れ発生の有無を確認できていない。

3. クリープの影響を考慮したヤング係数の補正係数

3.1 算出方法

上述した 3 つの構造物の計測結果より、有効ヤング係数を求めてクリープの影響を考慮したヤング係数の補正係数を算出した。以下に、その手順を示す。

まず、図-5 に示すような有効ひずみと有効応力の計

測結果の関係を作成した。ここで、前述したとおり、有効ひずみはひずみ計で測定された全ひずみから無応力計によって測定されたひずみを差し引いたものである。無応力計によって測定されたひずみは、自己収縮ひずみと温度ひずみが含まれていると考えられる。このひずみを全ひずみから差し引くことで、弾性ひずみとクリープひずみを含んだ有効ひずみとして表されると考えられる。

次に、有効応力を有効ひずみで除することで有効ヤング係数が算出されるが、計測プロットごとに算出するとかなりのばらつきが生じた。このため、有効ひずみと有効応力の関係図から線形となる区間ごとに傾きを求めて有効ヤング係数を算出した。算出した有効ヤング係数は、温度計測結果を基にマスコン指針に示される有効材齢との関係で整理した。

さらに、対象部位で採取した供試体の圧縮強度と実構造物の温度計測結果を基に、マスコン指針に示される圧縮強度とヤング係数の関係式からヤング係数を算出した。このヤング係数を静ヤング係数として有効材齢との関係で整理した。

最後に、同じ有効材齢において有効ヤング係数を静ヤング係数で除することでクリープの影響を考慮したヤング係数の補正係数を算出した。

3.2 算出結果および考察

(1) 有効ヤング係数

図-6 に、有効材齢と有効ヤング係数および静ヤング

係数の関係を示す。図中には、静ヤング係数にマスコン指針に示される補正係数（最高温度に達する有効材齢；0.42，最高温度に達する有効材齢+1 有効材齢以降；0.65）を考慮した結果も有効ヤング係数（マスコン指針）として併記した。

いずれの構造物の有効ヤング係数についても、ある有効材齢まではマスコン指針の補正係数を考慮した有効ヤング係数と同程度か大きい値を示すが、それ以降は小さくなる傾向であった。この有効材齢は、構造物 A で約 4 日（実材齢では約 2 日）、構造物 B では約 6 日（実材齢では約 3 日）、構造物 C では約 70 日（実材齢では約 30 日）であり、計測した有効応力が圧縮力から引張力に転じた時と概ね合致している。これは、マスコン指針の有効ヤング係数を用いた温度応力解析よりも実際にはひび割れ指数が大きくなると考えられるものであり、本結果の範囲においてはマスコン指針の条件が安全側の評価となることを示唆している。

(2) ヤング係数の補正係数

図-7 に、有効材齢とクリープの影響を考慮したヤング係数の補正係数の関係を示す。ヤング係数の補正係数は、いずれも有効材齢 1 日程度のごく初期では約 0.5 以下の小さい値を示した。そして、一旦 1.0 程度かそれ以上に増加した後、低下する傾向を示した。その後、構造物 A および B についてはわずかに漸増することが確認される。これは、作用する応力状態やその材齢によってク

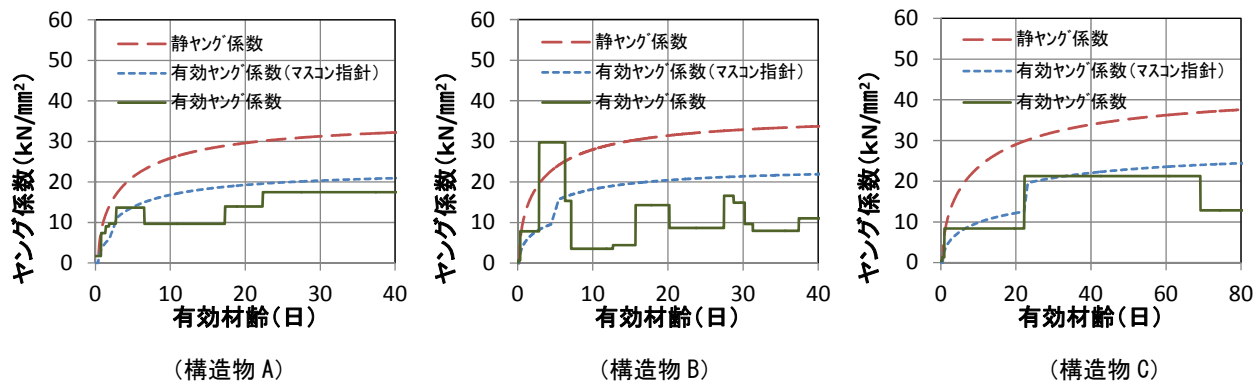


図-6 有効材齢とヤング係数の関係

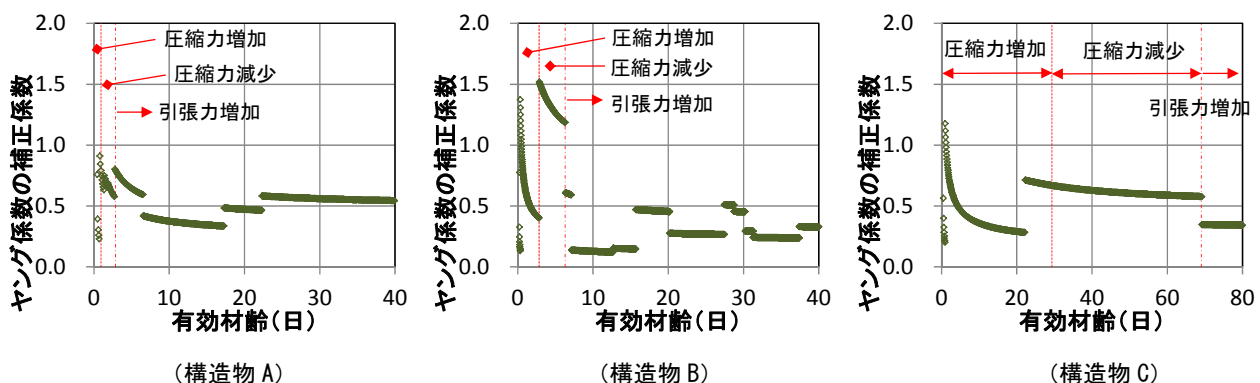


図-7 有効材齢とヤング係数の補正係数の関係

リープの影響が異なることに起因していると考えられる。

既往の文献⁵⁾⁶⁾では応力状態に応じたクリープの影響を評価している。本報においても、有効応力の計測結果に基づき圧縮力が増加する区間、圧縮力が減少する区間および引張力が増加する区間に分類し、各区間におけるヤング係数の補正係数を平均化した。同結果を表-2 および図-8 に示す。比較として既往の文献³⁾に示される値も示す。

圧縮力の増加区間におけるヤング係数の補正係数は、構造物 A で 0.56、構造物 B で 0.59、構造物 C で 0.48 であった。各構造物で概ね同程度の値であるが、柱状構造物である構造物 C でやや小さくなる傾向を示した。これは、使用材料や配合が異なる影響とともに、構造物 C の方が壁状構造物である構造物 A や B に比べて圧縮力が作用している期間が長いこと、クリープの影響が大きくなったのではないかと推察される。

圧縮力の減少区間におけるヤング係数の補正係数は、構造物 A で 0.67、構造物 B で 1.31、構造物 C で 0.61 であった。これに対し、既往の文献³⁾に示される補正係数は 1.0 程度であり、本結果の方が構造物 B を除いて小さい結果となった。圧縮応力が除荷される過程においてはクリープの影響が小さいこと⁷⁾を考慮すると、構造物 A および C の値は小さいと思われる。ただし、いずれの補正係数も圧縮力や引張力の増加区間よりも圧縮力の減少区間の方が大きく、クリープの影響が小さいことが表されていると考えられる。

引張力の増加区間におけるヤング係数の補正係数は、構造物 A で 0.47、構造物 B で 0.28、構造物 C で 0.34 であり、既往の文献³⁾に比べて小さい結果であった。既往の文献⁶⁾によれば、引張クリープは、応力作用時の温度が高いほど大きくなる一方で、与えられた温度履歴が高いほど水和が進行して小さくなることを示されている。既往の文献³⁾の補正係数は、コンクリートの最高温度が 40~75℃の範囲における結果であり、本報の 35~45℃よりも高い温度履歴を受けている。このことから、既往の文献³⁾では、水和の進行に伴うクリープの減少が卓越したことで本報の結果よりもクリープの影響が小さくなり、補正係数が大きい傾向を示したものと推察される。一方で、本結果における圧縮力の減少および引張力の増加区間の補正係数を平均すると 0.62 となり、マスコン指針とあまり変わらない結果となる。このことから、引張力の増加区間におけるクリープの影響を反映するためには、材齢に伴う応力状態の変化を考慮して補正係数を設定することが重要であると考えられる。

4. ヤング係数の補正係数が温度応力解析に及ぼす影響

ここでは、構造物 A~C とは異なる構造物を事例とし、

表-2 ヤング係数の補正係数

応力状態	構造物 A	構造物 B	構造物 C	構造物 A~C 平均	マスコン指針	既往文献 ³⁾
圧縮力増加	0.56	0.59	0.48	0.54	0.42	0.63
圧縮力減少	0.67	1.31	0.61	0.86	0.65	1.02
引張力増加	0.47	0.28	0.34	0.36		0.61

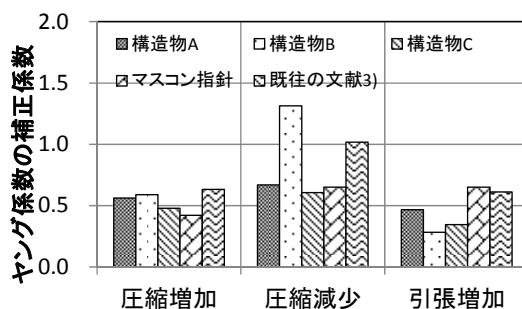


図-8 ヤング係数の補正係数

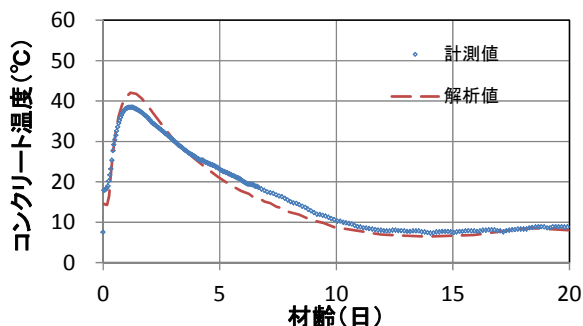


図-9 コンクリート温度の計測値および解析値

これまでに得られたヤング係数の補正係数を温度応力解析に反映した。

本構造物は、厚さ 0.8m、高さ 6.4m の壁状構造物であり、高さ 3.2m ずつの 2 リフトで打込みを行った。長さ方向には、5.0m 間隔でひび割れ誘発目地が設置されている。コンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比 53.0%、目標スランプ 12±2.5cm の普通コンクリートである。

本構造物の温度解析は、事前に実施した断熱温度上昇試験の結果、コンクリートの打込み温度や外気温の計測値を反映したものである。その他は、マスコン指針に基づく条件設定を行った。図-9 に示すように、最高温度は計測値よりも解析値の方が若干高いものの、実施工に則した条件を反映することで比較的精度の良い解析結果が得られている。

この温度解析結果を使用して、応力解析を実施した。応力解析には、圧縮強度試験によって得られた積算温度に基づく強度発現式および無応力計による計測結果から得られた線膨張係数を反映した。また、クリープの影響

によるヤング係数の補正係数は、マスコン指針、表-2に示す構造物A~Cの平均値、構造物Aおよび既往の文献³⁾の結果を与え、その影響を確認するものとした。その他は、マスコン指針に基づく条件設定とした。

図-10に、応力の計測値と解析値の比較を示す。同図より、圧縮応力については、マスコン指針以外のケースで計測値よりも解析値の方が大きい結果を示した。これは、いずれもヤング係数の補正係数がマスコン指針の値よりも大きいことによる。引張応力については、計測値に比べてマスコン指針のケースの方が大きく、計測値が最大となる材齢10日の引張応力で比較すると約1.65倍となる。既往の文献³⁾のケースについても、マスコン指針と同程度の約1.55倍であった。一方で、(構造物A~Cの平均値を用いたケースでは0.92倍、構造物Aのケースでは1.19倍であり、計測値と比較的良く一致した。本構造物においては、構造物A~Cの平均値の補正係数を用いた場合にはやや危険側の評価となるため、構造物Aの補正係数に見合う程度のクリープが影響しているものと考えられる。

図-11に、最小ひび割れ指数の結果を示す。ここで、図中の計測値は、温度の計測結果から積算温度により圧縮強度を推定し、マスコン指針に示される圧縮強度と引張強度の関係から引張強度を求めて有効応力の計測値で除したものである。ひび割れ指数は、計測値で1.65であるのに対し、マスコン指針や既往の文献³⁾のケースでは1.0程度と安全側の評価となった。一方で、構造物A~Cの平均値を用いたケースでは1.77、構造物Aのケースでは1.35と計測値に近づく結果となった。なお、ひび割れは、ひび割れ誘発目地以外には確認されなかった。このように、ヤング係数の補正係数がひび割れの評価結果に及ぼす影響は大きく、ひび割れ抑制対策の方針や合理性に対しても大きく影響することが確認された。

ただし、本研究では、材齢に伴う変動が大きい補正係数を平均化して求めていること、限られた実構造物データに基づく結果であることから、補正係数の数値自体については今後のデータ蓄積によりさらなる検討が必要と思われる。

5. まとめ

本研究により得られた知見を以下に示す。

- (1) 本研究で求めたクリープの影響を考慮した有効ヤング係数は、マスコン指針の補正係数を考慮した場合よりも小さくなる場合がある。
- (2) 本研究で求めたクリープの影響を考慮したヤング係数の補正係数は、応力状態によって異なることが確認された。このため、温度応力解析には材齢に伴う応力状態の変化を考慮して補正係数を設定すること

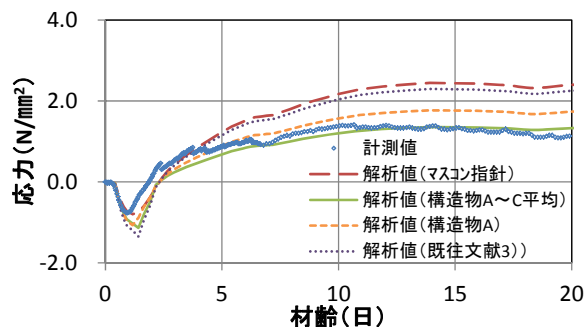


図-10 応力の計測値および解析値

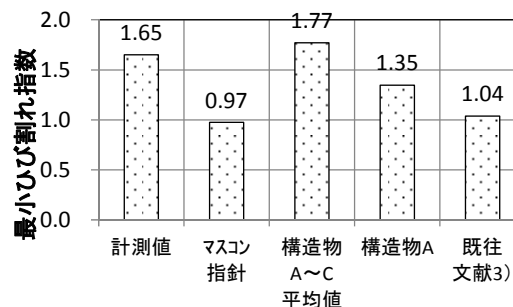


図-11 最小ひび割れ指数の比較

が重要になると考えられた。

参考文献

- 1) 関健吾, 横関康祐, 坂田昇, 芦澤良一: 実構造物の計測結果に基づく温度応力解析の精度向上方法, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1492-1497, 2014.7
- 2) 日本コンクリート工学会: マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, 2008.11
- 3) 徳永法夫, 鈴木威, 江渡正満, 安本礼持: 開削トンネルマスコンクリートの温度ひび割れ制御に関する実験および解析的検討, コンクリート工学論文集, 第13巻, 第2号, pp.79-88, 2002.5
- 4) 江渡正満, 丸山久一, 野添秀昭: マスコンクリートの温度応力推定に用いる有効ヤング係数の評価に関する検討, 構造工学論文集, Vol.45-A1, pp.27-34, 1999.3
- 5) 江渡正満: マスコンクリートの温度応力低減技術の開発に関する研究, 長岡技術科学大学, 学位論文, 1999
- 6) 入矢桂史郎: 若材齢コンクリートのクリープに関する研究, 名古屋工業大学, 学位論文, 1999
- 7) 入矢桂史郎, 服部達也, 根木崇文, 梅原秀哲: 若材齢コンクリートの除荷過程におけるクリープ挙動のモデル化に関する研究, 土木学会論文集, No.613, V-42, pp.165-174, 1992.2