

論文 温度ひび割れに影響を及ぼす要因に関する一考察

芦澤 良一*1・溝淵 利明*2

要旨：温度ひび割れの確率的な評価手法である S-R モデルと実構造物のひび割れ発生状況を対比し、引張応力と引張強度の変動係数やひび割れ指数の修正係数を評価した。また、実験的な検討によりコンクリート材料の変動や部材内における均質性を評価した。その結果、本検討の範囲では、引張応力および引張強度の変動係数は既往の知見と同程度であり、ひび割れ指数の修正係数は 0.83～1.25 程度であった。また、ひび割れ指数に影響を及ぼす要因の一つとして部材の不均質性が考えられ、同一部材内であっても場所ごとに品質が異なり、これはコンクリートの材料自体の品質変動の影響よりも大きくなる事が確認された。

キーワード：温度応力、ひび割れ発生確率、ひび割れ指数、均質性、変動係数

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に大きな影響を及ぼす。このため、温度ひび割れの危険性を事前に精度よく評価し、適切な対策を施して制御することが必要である。

最近では、温度ひび割れの評価として3次元の有限要素法が用いられる場合がほとんどであり、解析精度が向上している。しかしながら、温度ひび割れの発生には様々な不確定要因が複雑に作用し、温度応力解析に用いられる物性値も実際にはばらつきがあるため、確率的な評価が取り入れられている。「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016」¹⁾ (以下、マスコン指針とする) では、65 件の実構造物における 728 部材を対象として、3 次元有限要素法による温度応力解析から算出された最小ひび割れ指数と実際のひび割れ発生確率を関係付け、ワイブル分布により回帰した図を示している。同図は、「2017 年制定コンクリート標準示方書 [設計編]」²⁾ (以下、示方書とする) にも反映されており、広く用いられている。

一方で、これは材料や施工などのばらつきを考慮した本来の確率論的な観点に基づくものではない。中村ら³⁾ は、ばらつきを考慮したひび割れ発生確率の算出方法として S-R モデル (Stress-Resistance model) を提案している。S-R モデルは引張応力が引張強度を超過した時にひび割れが生じると考え、図-1 に示すように引張応力および引張強度の確率分布が重なり合う領域をひび割れ発生確率としたものである。杉橋ら⁴⁾ は、この S-R モデルをひび割れ指数とひび割れ発生確率の関係式に展開し、より汎用的にひび割れ発生確率を算出する方法を提案している。同方法によれば、ひび割れ発生確率はひび割れ指数のみによって一義的に決まらず、引張応力および引張強度について、変動係数や推定精度を考慮した修正係数を設定することで決定される。このため、従来のひび

割れ指数の向上だけでなく、ばらつきを抑えるような管理手法や施工方法も対策として取り入れて評価することが可能となる。

しかしながら、引張応力と引張強度の変動係数や修正係数の具体的な値については、十分に明らかとなっていない。本検討ではコンクリートの配合条件や基本的な施工方法が同じ複数の壁状構造物を対象として実際のひび割れ発生状況と S-R モデルを対比し、引張応力および引張強度の変動係数やひび割れ指数の修正係数を評価するとともに、ひび割れ指数の精度に影響を及ぼした要因について考察した。また、検討の第一段階として、大型試験体を用いた実験により、同一部材に打ち込まれるコンクリートの材料自体の変動と部材内における均質性について評価を行った。

2. 実構造物のひび割れ発生状況に基づくひび割れ指数とひび割れ発生確率の関係

2.1 対象とした構造物の概要

本検討では、同じボックスカルバート工事において構築された複数の壁状構造物 (以下、側壁とする) を評価対象とした。側壁は全 108 部材あり、図-2 に示すように高さが約 4.0～5.0m、厚さが 1.0～2.2m、1 ブロックあたりの延長が 5～20m である。各側壁の延長方向には、5.0m 間隔でひび割れ誘発目地が設置されている。

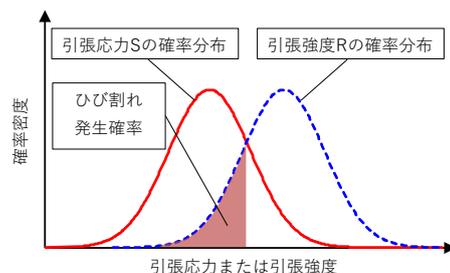


図-1 S-Rモデルの概要

*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 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)

コンクリートの打込みは年間を通じて行われ、コンクリートの配合や基本的な施工方法は各側壁で同一の条件である。表-1 および表-2 に、それぞれ使用材料およびコンクリート配合を示す。コンクリートは、高炉セメント B 種を用いた水セメント比 50%のものとした。夏期（6～10月）に AE 減水剤遅延形を使用した以外は、年間を通して同じ配合である。また、コンクリートの打込みや締固めなどの施工方法は、「2012 年制定コンクリート標準示方書 [施工編]」⁵⁾ に準じた。いずれの側壁も、鋼製型枠を用いており、打込み後 5 日程度で型枠を取り外し、材齢 14 日まで表面をシートで覆い養生を施した。また、底版が打ち込まれてから側壁が打ち込まれるまでの打継間隔は工事工程の影響によってブロックごとに異なり、40～280 日であった。打継間隔が 40 日以上であり、底版は十分に強度が発現しているため打継間隔の違いが側壁の拘束に及ぼす影響は小さいと考えられる。

2.2 評価方法

(1) ひび割れ指数の算定

全 108 部材の側壁に対して、3 次元有限要素法による温度応力解析を実施した。解析モデルは、各側壁の厚さや延長、高さ、5.0m のひび割れ誘発目地間隔を反映した 1/2 モデルを用いた。解析条件には、実際のリフトスケジュール、コンクリートの打込み温度および圧縮強度発現を入力した。ここで、圧縮強度発現は、実施工において品質管理として実施した材齢 7 日および 28 日（標準水中養生）の圧縮強度を用い、側壁ごとにマスコン指針に示される有効材齢との関係式に回帰して設定した。また、それ以外の熱物性や引張強度、静弾性係数の算定式などについては、マスコン指針に準拠した。外気温については、工事場所付近における気象庁の日別平均気温を用いた。同解析結果から、最小となるひび割れ指数を求めた。

(2) 側壁のひび割れ発生率の算定

側壁のひび割れ発生状況については、次のようにひび割れ発生率として整理した。5.0m 間隔のひび割れ誘発目地間を 1 区画と数え、あるひび割れ指数に該当する区画数のうち、実際に温度ひび割れが確認された区画数の割合として算出した。ひび割れ指数は、上述の温度応力解析から求めたものであり、0.05 刻みに区分した。区画数は合計 242 区画であった。

(3) S-R モデルによるひび割れ発生確率の算定

S-R モデルによるひび割れ発生確率は、式(1)から(3)により算出した⁶⁾。式(3)の ρ_S および ρ_R は、それぞれ引張応力と引張強度の推定精度を考慮して修正する係数である。引張強度の修正係数 ρ_R は、主には割裂引張強度を構造物中のコンクリートの引張強度に修正するための係数であるが、ここでは現行の示方書に従い引張強度を構造物中のコンクリートの引張強度として温度応力解析を行った

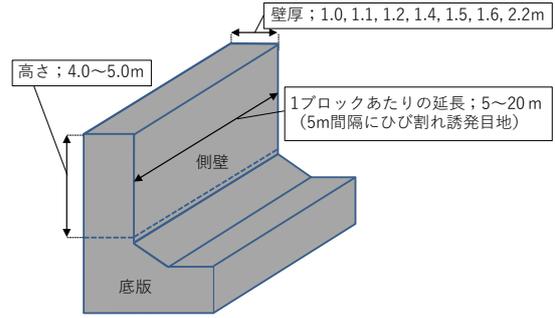


図-2 側壁の概要図

表-1 使用材料

項目	記号	摘要
水	W	上水道水, 密度1.00g/cm ³
セメント	C	高炉セメントB種, 密度3.04g/cm ³
細骨材	S1	山砂, 表乾密度2.62g/cm ³ , F.M.1.53
	S2	石灰砕砂, 表乾密度2.66g/cm ³ , F.M.3.91
粗骨材	G	石灰砕石, 表乾密度2.69g/cm ³ , 実積率63.5%
混和剤	Ad	AE減水剤 (標準形・遅延形)

表-2 コンクリート配合

Gmax (mm)	W/C (%)	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
					W	C	S1	S2	G	Ad
20	50	9.0 ±2.5	4.5 ±1.5	42	150	300	431	352	1100	3.0

ため 1.0 とした。また、引張応力の修正係数 ρ_S についても、明確な値が不明であるため 1.0 とした。引張応力と引張強度の変動係数は正規分布と仮定し、側壁のひび割れ発生率と S-R モデルのひび割れ発生確率曲線が適合するよう最小二乗法によって求めた。

$$Z = \frac{-Icr' + 1}{\sqrt{V_R^2 \cdot Icr'^2 + V_S^2}} \quad (1)$$

$$P(Z) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left(\frac{Z}{\sqrt{2}} \right) \right\} \quad (2)$$

$$Icr' = \frac{\rho_R f_{tk}}{\rho_S \sigma_t} = \frac{\rho_R}{\rho_S} Icr \quad (3)$$

ここに、 Icr' : 引張応力と引張強度の推定精度を考慮したひび割れ指数

$P(Z)$: ひび割れ発生確率

V_S : 引張応力の変動係数

V_R : 引張強度の変動係数

f_{tk} : 構造物中のコンクリートの引張強度

σ_t : コンクリートの最大主引張応力度

Icr : ひび割れ指数

ρ_R/ρ_S : ひび割れ指数の修正係数

2.3 評価結果

(1) 温度応力解析の結果

温度応力解析から求めた最小ひび割れ指数全体の平均値は、1.08 であった。また、実際に温度ひび割れが生じ

たのは、全 242 区画のうち 124 区画であり、全体のひび割れ発生率としては 51.2%であった。

図-3 に、ひび割れの有無に対してひび割れ指数のヒストグラムを示す。ひび割れ指数の平均値は、ひび割れ有りで 1.05、ひび割れ無しで 1.11 であった。また、ひび割れ有りでは 0.80~1.25 の範囲、ひび割れ無しでは 0.85~1.45 の範囲に分布しており、ひび割れ指数は全体的にひび割れ無しの方が大きい範囲にあった。

(2) ひび割れ指数とひび割れ発生確率の関係

図-4 に、ひび割れ指数とひび割れ発生率の関係を示す。同図には、マスコン指針および S-R モデルによるひび割れ指数とひび割れ発生率の関係を併記した。ここで、S-R モデルにおける引張応力および引張強度の変動係数は、前述したようにひび割れ発生率と適合するよう最小二乗法によって設定したものである。本結果では、引張応力の変動係数を 19.0%および引張強度の変動係数を 16.3%とした場合に、S-R モデルと側壁のひび割れ発生率の適合性が高い結果となった。杉橋らによれば、引張応力や引張強度の変動係数は 5~25%程度の範囲にあり、標準的には 15%程度としている⁵⁾。本検討においても概ね同程度の値であった。

側壁のひび割れ発生率は、ひび割れ指数が大きいほど小さくなる傾向にあった。しかし、マスコン指針や S-R モデルの曲線の左右にプロットされ、同程度のひび割れ発生率であってもひび割れ指数が異なることが認められた。図-5 に示すように、S-R モデルを左右のプロットに合わせてシフトすると、概ねひび割れ指数を 0.8~1.2 倍した範囲に入ることが確認された。これは、引張応力や引張強度が解析と実構造物で異なったことで、ひび割れ指数にも差異が生じたことを示す。本検討の範囲では、ひび割れ指数の修正係数は、これらの逆数の 0.83~1.25 程度と考えられる。なお、S-R モデルの左側の領域では、解析に比べて実構造物の方が引張応力が小さい、あるいは引張強度が大きい状態として構築されたこと、右側の領域はその逆であることを表す。

このように、同一の配合条件や施工方法で構築した側壁においても、解析と実構造物でひび割れ指数に大きな差異が生じることが確認された。この原因としては、熱膨張係数や熱伝達境界、外気温などの相違、水和熱、強度発現、静弾性係数、引張強度およびクリープの算定精度など、種々の要因が影響していると考えられる。例えば、打込み時のコンクリート温度は、S-R モデルにおいて左側の領域にプロットされた側壁群では平均値が 17.5℃、最大値が 26.5℃、右側の領域にプロットされた側壁群では平均値が 21.0℃、最大値が 30.5℃であり、後者の方が温度の高い時期に打込みが行われている傾向にあった。高炉スラグを含むコンクリートでは、高温履歴

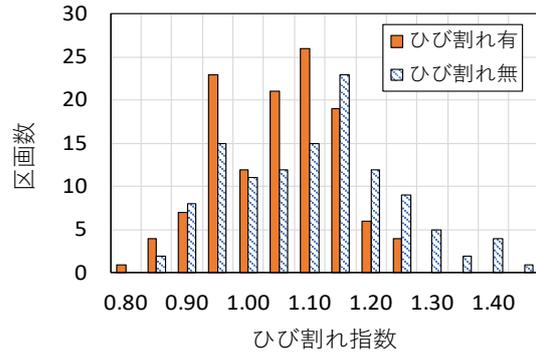


図-3 ひび割れ指数のヒストグラム

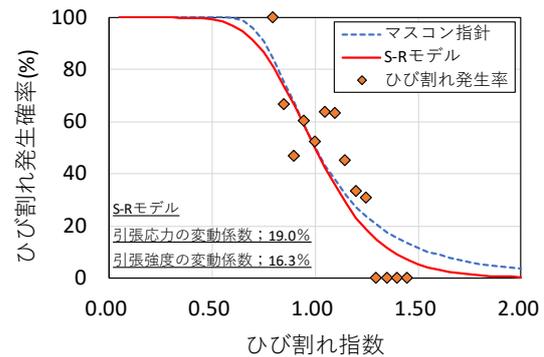


図-4 ひび割れ指数とひび割れ発生率の関係

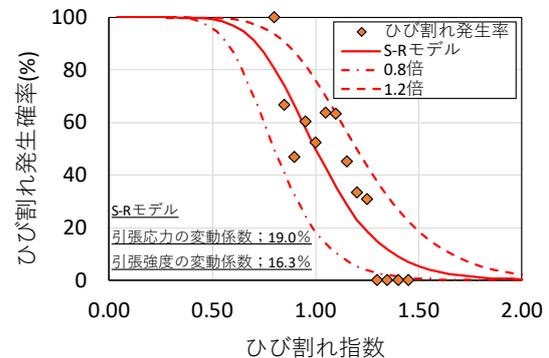


図-5 ひび割れ指数とひび割れ発生率の関係

を受けると引張強度が低下する可能性が指摘されている⁷⁾。本検討においても、右側の領域にプロットされた側壁群では解析に比べて実構造物の引張強度が小さくなり、そのためひび割れ発生率が大きくなった可能性が考えられる。

また、解析では部材全体を一様な物性として評価しているのに対して、実際にはコンクリートの品質変動や部材形状、施工方法などの影響によって部材内で物性が不均質になることも、解析と実際とでひび割れ指数に差異が生じた原因の一つとして考えられる。例えば、高さのある部材では、圧密などの影響によって下方ほど圧縮強度が大きくなる傾向にある⁸⁾。これは、静弾性係数や引張強度にも影響を及ぼすことになる。また、打込みや締

固めの影響によって材料分離が生じるとモルタルや粗骨材が偏在し、部材内の場所によって発熱が異なり、それに伴い圧縮強度の発現も異なる。さらに、粗骨材が偏在することで圧縮強度や引張強度、静弾性係数にも影響を及ぼす。既往の知見⁹⁾では、試験体の上下部で粗骨材の分離する程度が大きいほど下部の圧縮強度や割裂引張強度が小さくなることが示されている。特に、温度応力は小さい応力領域で生じるため、構造的な性能に影響するような過大な材料分離でなくとも、温度ひび割れに対しては影響しやすいことが考えられる。

3. コンクリートの材料自体の品質変動および部材の均質性に関する検討

3.1 実験概要

ここでは、大型試験体によって、同一部材に打ち込まれるコンクリートの材料自体の品質変動と部材の均質性を評価した。

試験体は、高さ 3.0m、厚さ 1.5m および延長 9.0m の壁状構造物を模擬したものである。試験体の作製は、ポンプ車を用いて 1 層あたり 50cm ずつの 6 層でコンクリートを打ち込み、φ 50mm のパイプレータにより約 50cm 間隔で締め固めた。表-3 および表-4 に、それぞれ使用材料およびコンクリート配合を示す。コンクリートは、高炉セメント B 種を用いた水セメント比 52.2% のものとし、荷卸しの目標スランブを 12±2.5cm、目標空気を 4.5±1.5% とした。9:00 から 15:30 までの打込み時間において、実験場所に到着した各アジテータ車から合計 10 回の試料を採取し、表-5 に示す試験を実施した。また、打込みから約 7 カ月後に図-6 に示す位置において φ 100mm、長さが約 800mm のコアを採取した。1 本あたりのコアから長さ 200mm の試料を 3 本成形し、材齢 244 日において圧縮強度および静弾性係数を測定した。

3.2 実験結果

コンクリートの打込みは 7 月に実施し、コンクリート温度は終日 26°C 前後であった。材齢 9 日程度の時点において、図-6 に示すように試験体中央と両端に合計 3 本のコア採取位置が生じた。

まず、コンクリートの材料自体の品質変動について示す。図-7 に、スランブおよび空気量の変動を示す。スランブは、打込み開始当初は目標値の 12cm 程度であったが、それ以降は上限付近で推移する傾向にあった。最大値は 16.5cm と目標値を超過する場合も認められた。なお、実験であることから目標スランブを超過したコンクリートについても試験体に打ち込んだ。空気量は、3.0~4.4% と目標の範囲内であった。

図-8 に、圧縮強度の変動を示す。圧縮強度は材齢 7 日および材齢 28 日で同じ傾向を示した。材齢 28 日の圧縮

表-3 使用材料

項目	記号	摘要
水	W	地下水、密度 1.00g/cm ³
セメント	C	高炉セメント B 種、密度 3.04g/cm ³
細骨材	S1	山砂、表乾密度 2.59g/cm ³ 、F.M.1.70
	S2	砕砂、表乾密度 2.63g/cm ³ 、F.M.3.10
粗骨材	G	碎石、表乾密度 2.65g/cm ³ 、実積率 59.0%
混和剤	Ad	AE 減水剤 (遅延形)

表-4 コンクリート配合

Gmax (mm)	W/C (%)	目標スランブ (cm)	目標空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					
					W	C	S1	S2	G	Ad
20	52.2	12.0 ±2.5	4.5 ±1.5	47	168	322	293	546	960	3.2

表-5 試験項目および方法

試験項目	試験方法
スランブ	JIS A1101 に準拠
空気量	JIS A 1128 に準拠
圧縮強度	JIS A1108 に準拠 (材齢 7 日・28 日) コア試料は、材齢 244 日に JIS A 1107 に準拠して実施
静弾性係数	JIS A1149 に準拠 (材齢 7 日・28 日) コア試料は材齢 244 日に実施
割裂引張強度	JIS A1113 に準拠 (材齢 7 日・28 日)

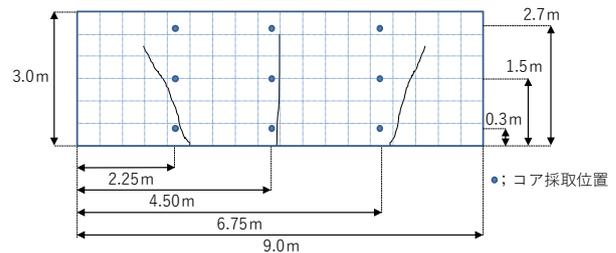


図-6 コア採取位置およびひび割れ発生状況

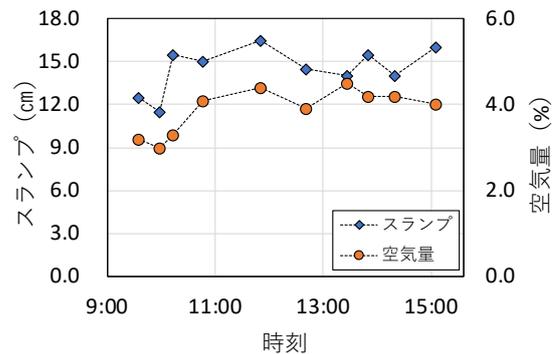


図-7 スランブおよび空気量の変動

強度は平均値が 34.7N/mm²、最小値が 32.9 N/mm² および最大値が 37.0N/mm² であり、同じ部材に打ち込まれるコンクリートでも最大値と最小値で約 4.0N/mm² 程度の差が生じ、これは平均値に対して約 10% に相当する。図示はしないものの、圧縮強度とエアメータ法による推定単位水量には相関が認められた。このことから、圧縮強度

の変動の要因は主として表面水率の変動によるものであり、実質的な水セメント比が異なることが考えられる。

図-9 に、静弾性係数の変動を示す。材齢 7 日および材齢 28 日ともに、圧縮強度の変動に比べて静弾性係数の変動は小さい傾向にあることが確認された。

図-10 に、割裂引張強度の変動を示す。割裂引張強度は、材齢 7 日では平均値が 2.10N/mm²、最小値が 1.87N/mm²および最大値が 2.23N/mm²、材齢 28 日では平均値が 2.93N/mm²、最小値が 2.53N/mm²および最大値が 3.20N/mm²であった。最大値と最小値の差は、材齢 7 日で 0.36N/mm²、材齢 28 日で 0.67N/mm²とそれぞれの平均値の 17%および 23%に相当し、材齢 7 日および 28 日ともに圧縮強度よりも割裂引張強度の方が変動が大きいことが確認された。

次に、部材内における均質性の評価として図-11 および図-12 に、試験体の各位置におけるコア試料の圧縮強度および静弾性係数を示す。コア試料の圧縮強度は、試験体の下段ほど大きくなる傾向にあった。これは、圧密などによる影響と考えられる⁸⁾。しかし、端部からの距離が 4.50m (中央) の位置では、中段の圧縮強度が最も小さく、上段と下段の圧縮強度は同程度となった。また、端部からの距離によっても圧縮強度に差異が認められた。コア試料の弾性係数についても、圧縮強度と同様に下段ほど大きくなる傾向を示したが、端部からの距離が 4.50 m (中央) および 6.75m の位置では中段よりも上段の静弾性係数が大きい値を示した。このように、同一部材内であっても場所ごとに圧縮強度や静弾性係数が異なることが確認された。

コア試料の圧縮強度は、全体の平均値が 43.4N/mm²、最小値が 39.8N/mm² および最大値が 47.5N/mm² であり、最大値と最小値の差は平均値の 18%に相当した。また、コア試料の静弾性係数は全体の平均値が 30.4kN/mm²、最小値が 28.7kN/mm² および最大値が 31.6kN/mm² であり、最大値と最小値の差は平均値の 9%に相当した。これらは、上述したコンクリートの材料自体の品質変動よりも大きい。これは、圧密のような部材の形状的な要因や打込み、締固めなど施工的な要因が加わったことで、部材内で品質のばらつきが大きくなったものと推察される。

3.3 ひび割れ指数への影響

ここでは、コンクリートの材料自体の品質変動がひび割れ指数に及ぼす影響を評価するため、3次元の有限要素法により大型試験体の温度応力解析を行った。試験体の物性は通常解析と同じように一様とし、10回の抜き取り試験の結果をそれぞれ反映した解析によりひび割れ指数の違いを確認するものとした。

解析条件には、試験結果として強度特性およびコンクリート温度を用い、それ以外はマスコン指針に準拠した。

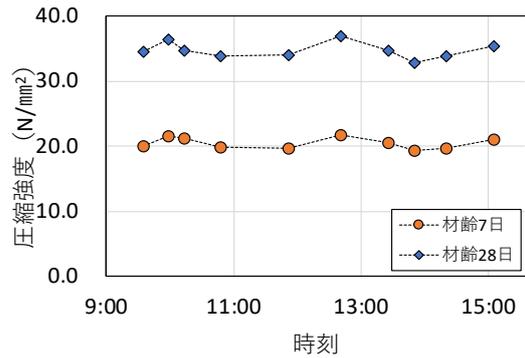


図-8 圧縮強度の変動

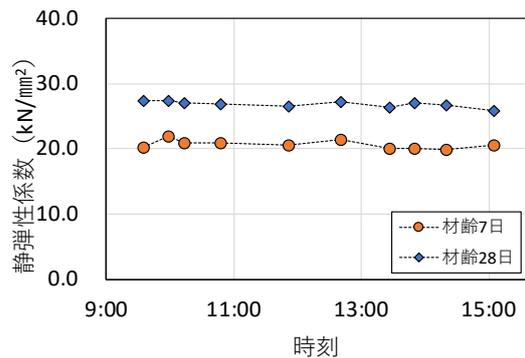


図-9 静弾性係数の変動

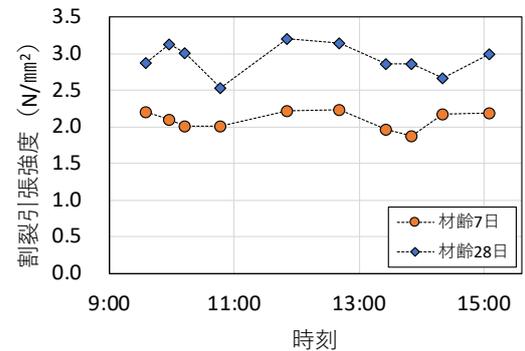


図-10 割裂引張強度の変動

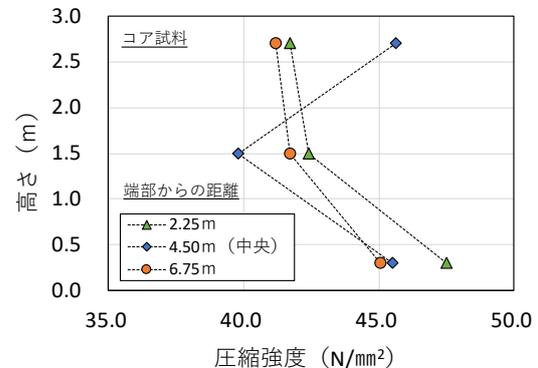


図-11 試験体におけるコア試料の圧縮強度

外気温は、実験場所付近における気象庁の月別平均気温を用いた。強度発現の算定式については、10回の圧縮強度試験の結果をそれぞれマスコン指針の有効材齢に基づ

く強度発現式で回帰した。また、圧縮強度と静弾性係数および引張強度の関係についても、各試験結果をマスコン指針に示される関係式で回帰した。なお、引張強度については、構造物中のコンクリートの引張強度とするため割裂引張強度を 0.8 倍した値を用いた²⁾。さらに、比較としてマスコン指針に示される強度式を用いた場合についても解析を行った。

図-13に、各ケースの最小ひび割れ指数を示す。ここで、ケース No.は、強度特性の算定に用いた試験結果の時系列順に No.1~No.10とした。同図より、最小ひび割れ指数は、強度特性が異なることによって 0.61 から 0.81 まで幅広い結果を示した。これらは、マスコン指針から求めた最小ひび割れ指数 0.67 に対して 0.91~1.21 倍となり、ひび割れ指数に大きく影響することが確認された。前章で示した実構造物の側壁を対象とした検討では、ひび割れ指数の修正係数は 0.83~1.25 の範囲であり、本解析結果よりも修正係数の範囲が大きいことが確認される。これは、一概に比較はできないものの、部材の形状的な要因や施工的な要因の影響を含むためと推察される。

4. まとめ

本検討により得られた知見を以下に示す。

- (1) 本検討の範囲では、実構造物から求めたひび割れ発生率と S-R モデルが適合する引張応力と引張強度の変動係数は 19.0%、16.3%であり、概ね既往の知見に示される範囲にあった。また、ひび割れ指数の修正係数は 0.83~1.25 程度の範囲にあった。
- (2) 同一部材内であっても場所ごとに圧縮強度や静弾性係数が異なり、この変動は材料自体の品質変動の影響よりも大きくなることを確認した。

今後は、引張強度なども含めた部材の均質性と打込みや締固めなどの施工方法の関連を詳細に評価し、温度ひび割れに及ぼす影響を検討していく予定である。

参考文献

- 1) 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 2016, 2016.11.
- 2) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕, 2018.3.
- 3) 中村秀明, 浜田純夫：材料の不確定性を考慮したマスコンクリートのひび割れ発生確率, 土木学会論文

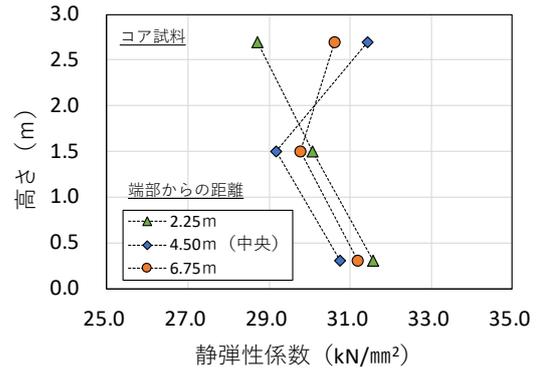


図-12 試験体におけるコア試料の静弾性係数

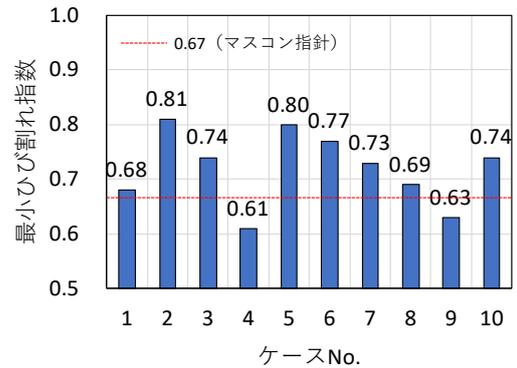


図-13 各ケースのひび割れ指数

- 集, No.514/V-27, pp.59-40, 1995.5.
- 4) 杉橋直行, 岸利治：温度ひび割れ発生確率の直接算定法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp.1333-1338, 2017.7.
- 5) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕, 2013.3.
- 6) 杉橋直行：温度ひび割れ照査方法の変遷から見た現状の課題とその改善方法に関する研究, 博士論文, 2017.9.
- 7) 土木学会：混和材料を使用したコンクリートの物性変化と性能評価研究員会小委員会 (333 委員会) No.2, コンクリート技術シリーズ, No.89, 2010.
- 8) 日本建築学会：構造体コンクリート強度に関する研究の動向と問題点, 1987.11.
- 9) 加賀谷誠, 徳田弘, 川上洵：各種混和剤を用いたコンクリートの振動締固めによる材料分離現象, 材料, Vol.32, No.353, pp.161-167, 1983.2.