

マスコンクリートのひび割れ対策の現状と問題点

本社 鈴木 雅博
 本社 桐川 潔
 本社 酒井 博士

概要：構造物の耐久性の確保が必要不可欠となってきた。耐久性を向上させる方法の1つに、コンクリートの圧縮強度を高強度化して組織を緻密にする方法が考えられる。また、施工技術の進歩に伴い、 $35 \sim 50\text{N/mm}^2$ の圧縮強度を有するコンクリート構造物の大型化が可能となっている。しかし、コンクリートの高強度化やマスコンクリート化から、セメントの水和熱に起因した温度応力により、構造物にひび割れが発生する可能性が高くなり、耐久性を維持する観点から設計時と施工時との両方で温度応力に対する検討がいままで以上に必要となると考えられる。ここでは、事前検討の方法の提案、温度ひび割れ発生の可能性を予測するために必要となる材料定数が解析結果におよぼす影響、温度応力解析例などを記述する。

キ - ワ - ド：温度応力，事前検討，材料特性

1. はじめに

土木構造物は耐荷性能の他に構造物の耐久性の確保が必要不可欠となっている。耐久性を向上させる方法としてPC鋼材あるいは鉄筋の腐食をできるだけ防止するためにコンクリート組織を緻密にする方法が考えられ、その方策として、 60N/mm^2 を超える高強度コンクリートの使用が考えられる。

また、施工技術の進歩にとともに、 $35 \sim 50\text{N/mm}^2$ のコンクリート構造物においても大型化が可能となってきた。

こうしたコンクリートの高強度化やマスコンクリート化から、これまでも増してセメントの水和熱に起因した温度応力が、構造物にひび割れを発生させる可能性が考えられる。耐久性を維持する観点からひび割れを防止するか、または、ひび割れ幅を抑制することが必要である。そのため、耐久性を維持するためにはひび割れに対する抑制策を検討する必要がある。そこで、土木学会のコンクリート標準示方書(施工編)¹⁾に施工前の検討として抑制対策が示されているが、特にPC構造物のような施工を考慮した設計を行う必要がある場合、例えばリフト高さ、ブロック長の設定及びコンクリート強度発現を考慮した工程など、施工前の検討ばかりでなく、設計段階においても検討が必要である。

検討は明らかに必要な場合だけでなく、過去の実績で温度ひび割れ発生がない類似構造物についてもひび割れ対策の実施の有無、打設時期、セメントの種類などを調査し、施工する構造物への適用性を事前に行う必要がある。

ひび割れ発生の確率は、コンクリートの引張強度と発生する温度応力との比であるひび割れ指数で表されるため、ひび割れ指数は温度応力と引張強度との両者を精度良く評価する必要がある。温度応力の検討は(単体の物性試験+温度応力解析)がもっとも実用的である。

ここでは、事前検討の方法の提案、精度良い温度応力解析を実施するために必要な物性の知見を列記するとともに、解析事例により材料定数が解析結果におよぼす影響を示す。



鈴木雅博
技術本部
開発技術
第一部



桐川 潔
技術本部
開発技術
第一部



酒井博士
技術本部
技術推進部

られる使用性、安全性、耐久性、環境などに決まる。したがって、どの構造物に対しても事前にひび割れ発生への検討の必要性を吟味し、検討が必要な場合には設計と施工前にそれぞれ検討する必要がある。図に示すように検討は設計段階においても、セメントの種類の変更、1回の打設のブロック長あるいはリフト高さなどを変更する場合があるので、設計者と施工者との両者で十分に協議し、ひび割れ対策を講じる必要があると考える。設計ではひび割れ抑制策の方針を決定することが重要であると考えられる。ここで、留意すべき点は設計段階では温度応力解析に必要なコンクリートの熱特性、強度発現、引張強度などの物性がほとんどの場合で決まっておらず、示方書、セメントメカニカ技術資料などの既存データに依存しなくてはならない点である。コンクリートの強度発現や熱特性は骨材種類、セメントの種類、外気温などで異なる。したがって、特に重要構造物と判断される場合には明らかにすべき物性の項目を整理し、使用するコンクリートが決定した段階で試験によりこれらを明らかにし、施工前に最終検討を実施する必要がある。ただし、フロ-図に示すように、どの構造物に対しても必ずしも温度応力解析を実施する必要はなく、過去の実績を調査した場合に無対策あるいは対策後にひび割れが発生しないことが判明している場合と同様な対策を講じることができる場合には解析を省略できるものとする。ただし、施工計画書には解析を省略した理由として、過去実績における部材寸法、養生方法、施工時期、セメント種類、外気温を調査した結果、適用基準などを記録に残す必要がある。また、施工後のひび割れ発生の有無を記録することが重要である。また、こうしたデータベース化を実施することにより、今後の類似構造物の検討の参考になると思われる。

3. 温度応力発生確率の算定方法

温度応力解析を実施して温度応力発生を評価する方法は温度ひび割れ指数により判断するものとする。温度ひび割れ指数は式(1)より算出し、安全係数(c_r)以上とする。安全係数 c_r は一般的に、1.0~1.8 とする。

$$\text{ひび割れ指数} = \frac{\text{コンクリートの引張強度}}{\text{発生温度応力}} \quad c_r \quad \text{式(1)}$$

安全係数は温度ひび割れの発生確率を示すものである。図-2に土木学会施工編(平成14年)¹⁾の安全係数と温度ひび割れ発生確率を示す。ひび割れ発生確率を5%、25%および85%とする場合、安全係数 c_r をそれぞれ1.75、1.45および1.00となる。一般的な配筋の構造物における安全係数 c_r の参考値は下記である。参考として、土木学会施工編(平成8年)では、ひび割れ発生確率を5%、25%および85%とする場合、ひび割れ指数をそれぞれ1.5、1.2および0.7となる。このことから、それぞれの場合での発生確率は変更しないものの、平成8年版から平成14年版になる際に、ひび割れ指数から安全係数に名称を変更し、かつ、実質的に数値を約1.2倍としている。ただし、コンクリートの引張強度は平成8年版では $0.35f_c(t)$ に対して、平成14年版では $0.44f_c(t)$ となっており、平成14年版では平成8年版の約1.2倍となっている。これは、平成8年版では引張強度の応力速度の影響を加味した推定式になっているのに対して、平成14年版では応力速度の影響を安全係数として取り入れているものと推定される。なお、応力速度が引張強度におよぼす影響について6章で述べる。

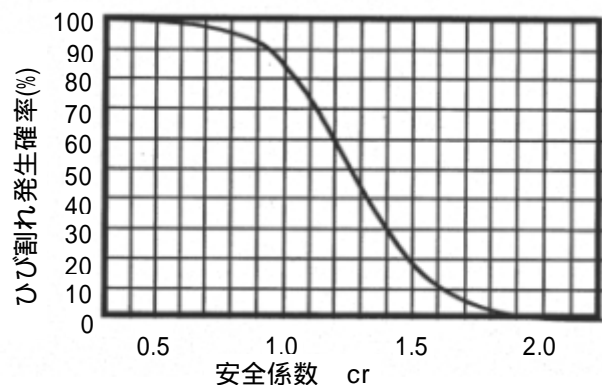


図-2 安全係数とひび割れ発生確率の関係

ひび割れを防止したい場合	1.75(1.5)以上
ひび割れの発生をできるだけ制限したい場合	1.45(1.2)以上
ひび割れの発生を許容するがひび割れ幅が過大とならないように制限した場合	1.00(0.7)以上

*()内は平成8年版の数値

4. 温度応力発生確率の算定の影響要因

図-3に温度ひび割れ発生の可能性を評価する影響要因を示す。引張強度および温度応力に影響をおよぼす要因は多岐にわたる。温度ひび割れ発生の評価の精度向上は、温度ひび割れ指数を算出する引張強度と温度応力との両者を的確に把握する必要がある。温度応力はまず温度解析を実施し、この解析結果からコンクリートの体積変化を算出し、構造物の拘束条件とコンクリートの力学特性との条件から温度応力を算出する。このことから、コンクリート温度の算出では、外気温、コンクリートの熱特性、施工方法、構造物の寸法が影響し、コンクリート温度応力では、拘束条件、コンクリートの強度発現などが影響をおよぼす。また、コンクリートの引張強度は応力速度が特に影響をおよぼすものと考えられる。6章ではコンクリートの引張強度を示し、7章ではコンクリートの温度応力におよぼす影響要因として、コンクリートの温度推定では断熱温度上昇量を、温度応力推定ではコンクリートの強度発現についてこれまでに発表されている知見をそれぞれ列記する。

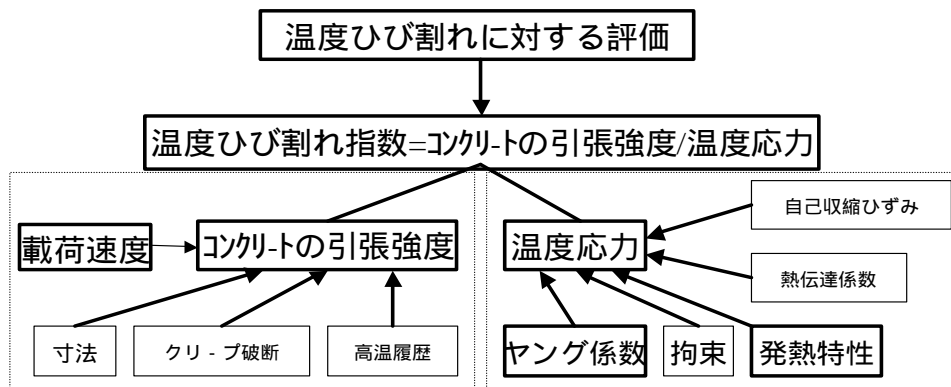


図-3 温度ひび割れ発生の可能性を評価する影響要因²⁾

5. コンクリートの引張強度

コンクリートの温度ひび割れの可能性は発生する温度応力と、コンクリートの引張強度との大小関係で決まる。コンクリートの引張強度は、通常は JIS A 1113 に従って割裂引張強度から求めるのが一般的である。しかし、割裂引張強度は荷重作用によって生じる引張応力に対するひび割れ発生の目安となる強度を与えるものであり、温度応力に起因したひび割れ発生を予測するための引張強度ではない。図-4に温度応力解析例による温度応力の経時変化を示す。解析例の場合の温度応力による引張応力速度は約 0.002 ~ 0.003N/(mm²min)程度である。図に示すように、温度応力による引張応力速度は JIS の応力速度と比較してかなり遅いことがわかる。温度応力進展速度が遅い場合に、JIS の応力速度で求めた引張強度が適用できるか明確ではない。仮に引張強度が応力速度に影響を及ぼす場合には割裂引張強度に補正する必要がある。こうした背景から、独立行政法人と PC 建協との共同研究²⁾により、载荷速度が引張強度におよぼす影響を調査した。以下では、その概要を述べる。なお、1999年に JIS の改訂が行われ、引張応力度の増加率が毎秒 0.02N/mm² から 0.10N/mm² と引張応力

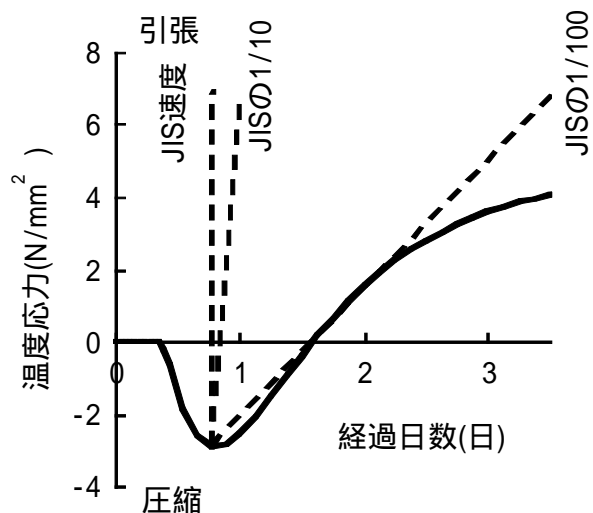


図-4 温度応力の速度と JIS 引張強度応力速度との関係

度も増加率が約 10 倍となっている点を考慮しなくてはならない。応力速度が引張強度におよぼす影響について、国土交通省土木研究所(現独立行政法人)とプレレストコンクリート協会との共同研究で得られた結果を図 - 5 に示す。図は配合強度 20 と 100N/mm² の荷材齢 28 日の応力速度と直接引張強度の関係をそれぞれ示す。図中の実線は供試体 9 本の平均値である。また、()内の数値は JIS 応力速度の直接引張強度を基準としたときの比率である。ただし、この時の JIS 応力速度は旧 JIS の値である。図に示すように、高強度域では、応力速度の影響はほとんど認められず、低強度においては応力速度が遅いほど引張強度が低くなる傾向が認められた。以上のことから、コンクリートの引張強度はコンクリートの圧縮強度と荷重速度との両者の影響を受けることがわかる。応力速度が引張強度に及ぼす影響を定式化した例として、CEB-FIP MC90(以下 MC90)がある。MC90 では、コンクリートの引張強度に及ぼす応力速度の影響の関係式において、コンクリートの圧縮強度をパラメータとしたものを提案している。CEB-FIP MC90 式を式(2)と式(3)に示す。

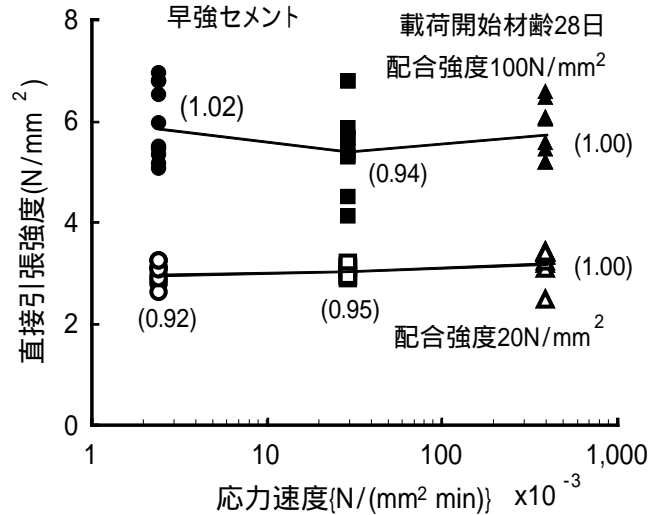


図 - 5 経過日数と温度応力の関係

$$f_t = f_{t0} \left(\frac{\dot{t}}{\dot{t}_0} \right)$$

式(2)

$$= 1 / [10 + 6 \{ f'_c / f'_{co} (= 10 \text{MPa}) \}]$$

式(3)

ここで、 f_{t0} : 基準となる応力速度 \dot{t}_0 での引張強度、 f_t : 応力速度 \dot{t} での引張強度、 \dot{t} : 圧縮強度の影響を表す係数で、この値が大きいほど荷重速度の影響は大きくなる

図 - 6 に MC90 にしたがって算出されるコンクリートの引張応力速度と引張強度の関係をコンクリートの圧縮強度ごとに示したものである。縦軸は、JIS 引張強度試験で規定されている応力速度での引張強度を 1 とし、応力速度の低下にともなう引張強度の低下を示している。ここでの計算結果は、JIS 引張強度試験で得られる引張強度を圧縮強度によらず、3N/mm² と仮定したものである。温度応力の進展速度にもよるが、仮に、0.003N/(mm²min)とし、構造物の

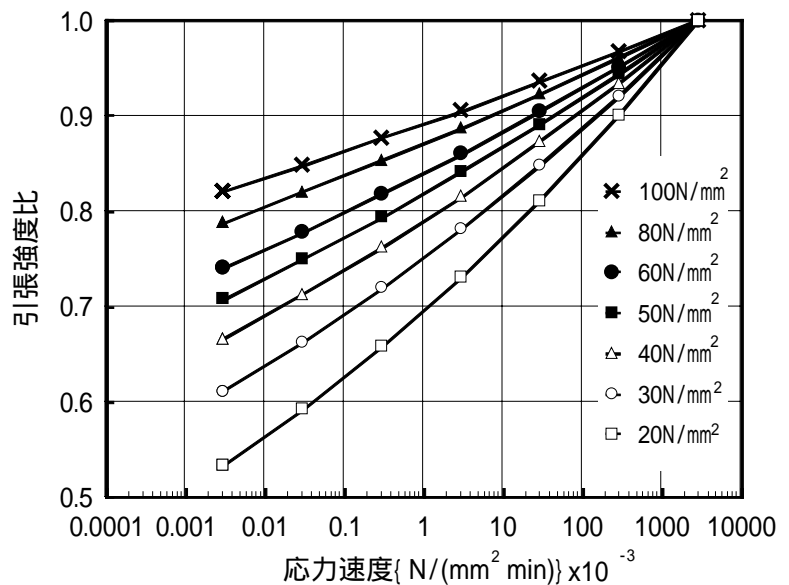


図 - 6 応力速度と引張強度の関係の試算

発生する温度応力最大時の圧縮強度が 30N/mm^2 程度とすれば，JIS 引張強度試験結果の約 75% を引張強度とする必要がある．このことから，構造物に発生する最大引張応力となる材齢の圧縮強度，温度応力進展速度を考慮して JIS 引張強度試験結果に低減係数を乗じて算出する必要がある．設計基準強度 $40 \sim 50\text{N/mm}^2$ の場合の目安は材齢約 3 日で温度応力最大値となり，そのときの圧縮強度は約 30N/mm^2 程度と推定されることから，試算結果によると JIS 割裂引張強度の 70～80% がコンクリートの引張強度であると考えられる．ただし，その影響度合いはコンクリートの圧縮強度が大きい程小さくなる傾向が認められた．

6. 温度応力解析

温度応力の予測は図 - 3 に示すようにヤング係数，発熱特性，熱伝達係数などが相互に影響をおよぼしあうためになりにくいのが現状である．ここでは，コンクリート温度の推定に必要なコンクリート物性で考慮すべき点と，温度応力推定に必要な材料定数で考慮すべき点を示す．

(1) コンクリート温度の推定に必要なコンクリート物性(断熱温度上昇)

図 - 7 にコンクリートの練り上がり温度 20 における各種セメントを用いたコンクリートの単位セメント量と断熱温度上昇量の関係を示す．同一単位セメント量とした場合には，材齢 7 日の断熱温度上昇量は早強セメント，普通セメント，中庸熱セメント，高ビーライトセメントの順で大きくなっている．図に示すように，単位セメント量を減少させるより，セメントの種類を変更した方が温度上昇量を抑制できるものと考えられる．この断熱温度上昇量の推定式は土木学会施工編では試験により求めることを標準としているが，試験によらない場合には式(4)としている．

$$Q(t) = Q\{1 - \exp(-rt)\} \quad \text{式(4)}$$

ここで， Q は終局断熱温度上昇量， r は温度上昇速度に関する定数で，いずれも実験により定まる定数， t は材齢(日)， $Q(t)$ は材齢 t 日における断熱温度上昇量() である．各種セメントの各係数は土木学会施工編に示されている．しかし，高性能減水剤を使用した場合には水和反応の遅延が考えられ，コンクリートの発熱時間の遅れがあるので留意する必要があると考えられるが，土木学会で提案されている断熱温度上昇式(4)ではこの遅延を認めない．こうした背景から，凝結遅延を考慮するため式(5)が提案されている．しかし，式(5)は未知数が 3 つあり非常に複雑となる．そこで，コンクリートの発熱開始点がほぼコンクリート凝結始発点であることから，コンクリートの断熱温度上昇開始時点に凝結始発時間を考慮して推定する式(6)を用いることが提案されている²⁾．図 - 8 に早強セメントを用いた配合強度 100N/mm^2 の断熱温度上昇量の実験値および各推定式との比較を

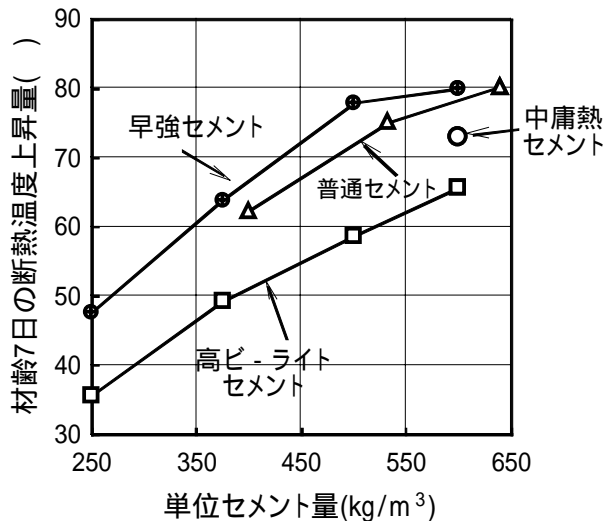


図 - 7 単位セメント量と断熱温度上昇量の関係

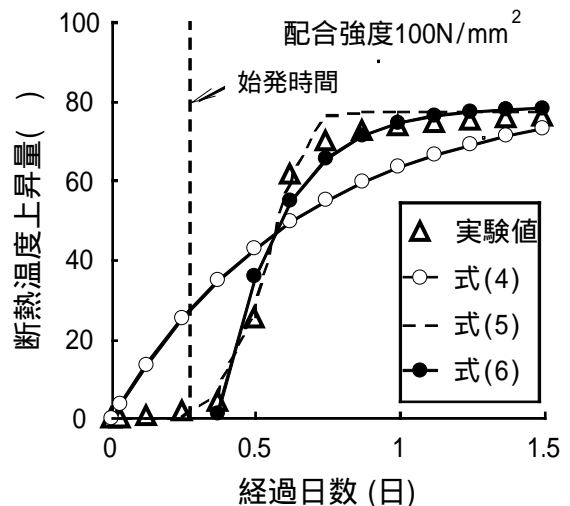


図 - 8 経過日数と断熱温度上昇量の関係

示す。式(6)は実験値とよく一致する。図に示すように終局断熱温度上昇量はほとんど変わらないが、発熱速度が凝結遅延を考慮した場合は考慮しない場合と比較して速い。この影響はコンクリートの温度を推定する場合に大きく、後述の図-9から考慮した場合は考慮しない場合と比較してコンクリート最大温度が高くなる傾向があると考えられる。

$$T=Q\{1-\exp(-rt)\} \quad \text{式(5)}$$

提案式

$$T=0 \quad t < t_1$$

$$T=Q[1-\exp\{-r(t-t_1)\}] \quad t \geq t_1 \quad \text{式(6)}$$

ここで、 Q_r は係数、 t は経過日数、 t_1 は凝結始発時間

(2)温度応力推定に必要な材料定数(コンクリートの圧縮強度)

図-9に早強セメントを用いた配合強度40, 70, 100N/mm²の材齢と圧縮強度の関係を示す。圧縮強度発現においても、水和反応の遅延が起こる場合がある。若材齢における圧縮強度試験を実施した結果、ほぼ、コンクリートの凝結終結時間以降に強度の発現が認められた。したがって、材齢と圧縮強度の回帰式を求める場合にはこれを考慮する必要がある。

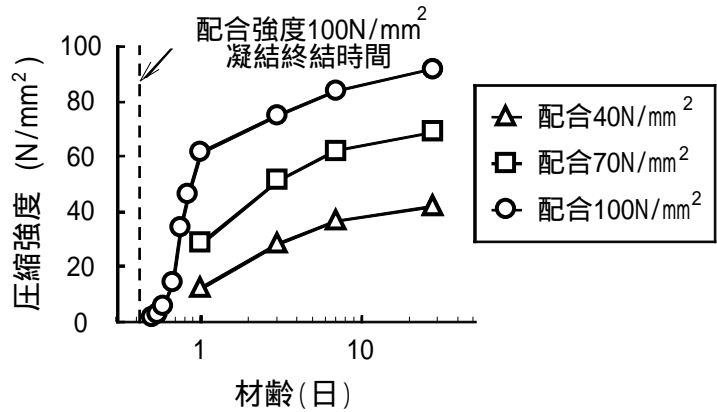


図-9 材齢と圧縮強度の関係

7. 温度応力解析結果に及ぼす影響要因

(1) 凝結遅延が解析結果におよぼす影響

耐久性の向上という観点から、コンクリートの高強度化が進み、ワーカビリティを確保するために高性能 AE 減水剤を使用する例が多くなっている。そのため、水和反応が遅延し、水和発熱開始点が遅れる可能性がある。ここでは、コンクリート柱を解析例として、凝結遅延の考慮の有無がコンクリート温度の推定におよぼす影響を示す。表-1に解析に用いる材料特性、図-10に経過日数と断熱温度上昇量の関係、図-11に解析モデルの断面をそれぞれ示す。桁長は10000mmとした。ケ-

表-1 解析に用いた材料定数

		ケ-ス1	ケ-ス2
熱伝達率		2.7W/m	
密度		2450kg/m ³	
比熱		1.15kJ/kg	
練り上がり温度		25	
断熱温度上昇量		$Q(t)=64.7\{1-\exp(-1.18t)\}$	$Q(t)=63\{1-\exp\{-3.5(t-0.2)\}\}$
圧縮強度(Fc)	材齢 0hour	0 N/mm ²	0 N/mm ²
	材齢 6hour	10.0 N/mm ²	0 N/mm ²
	材齢 24hour	30.6N/mm ²	30.6 N/mm ²
	材齢 48hour	47.2 N/mm ²	47.2 N/mm ²
	材齢 96hour	63.8 N/mm ²	63.8 N/mm ²
	材齢 168hour	81.7 N/mm ²	81.7 N/mm ²
ヤング係数		$4700 \times Fc(t)^{0.5}$ N/mm ²	
引張強度		$0.44 \times Fc(t)^{0.5}$ N/mm ²	

ス1は凝結遅延を考慮しない場合、ケ-ス2は凝結遅延を考慮した場合のコンクリ-ト物性である。ただし、材齢7日での断熱温度上昇量はほぼ同一としている。また、クリ-ブは有効弾性係数法により考慮し、収縮ひずみは考慮していない。熱伝導率は脱枠を36時間後に行うとして、0時間から36時間を $6W/m^2$ 、36時間以上を $13W/m^2$ とした。桁長中央の断面の図-11に示す接点1と接点2の温度および主応力解析結果を図-12にそれぞれ示す。図中の△印はケ-ス1を、○印はケ-ス2をそれぞれ示す。断熱温度上昇量がほぼ等しい場合にも、凝結遅延を考慮し、断熱温度上昇量の上昇速度を速めた場合(ケ-ス2)の接点1(中心温度)の推定値は、考慮しない場合(ケ-ス1)と比較して約15%高い結果となった。また、材齢1日での内外温度差はケ-ス1で約15℃、ケ-ス2で約20℃となっており、接点2での主応力を若干増加させる結果となった。温度応力は材齢7日で顕著となり、ケ-ス2の主応力(引張応力)はケ-ス1と比較して、約 $0.5N/mm^2$ 大きい引張応力になる結果となった。材齢7日での応力差が大きくなった理由として、材齢1日ではコンクリ-トの強度発現が小さく、かつ、クリ-ブ係数が大きいことから結果として応力差が小さくなるが、コンクリ-ト温度下降時にはコンクリ-トの強度発現がともなうため、コンクリ-ト表面と中心部の温度差によるコンクリ-トの体積変化の差が主応力として現れたものと考えられる。ただし、材齢1.5日での接点2の主応力の増加は脱枠時のコンクリ-ト表面の急冷によるものと推定される。以上のことから、コンクリ-トの材料定数の推定精度により、解析結果は異なり、ひび割れ指数算出精度の向上には材齢1日以前からの若材齢時からの把握が重要になるものと思われる。

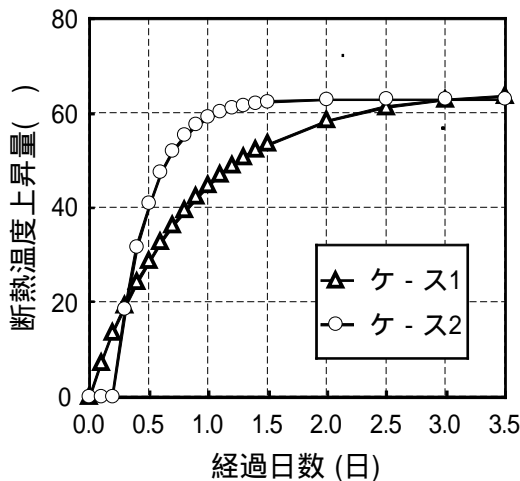


図-10 断熱温度上昇量の経時変

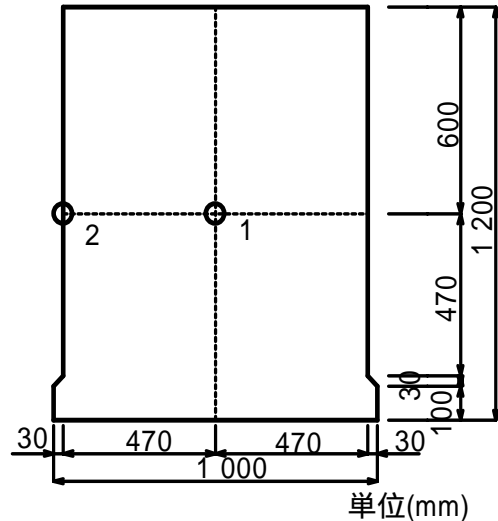


図-11 モデル断面

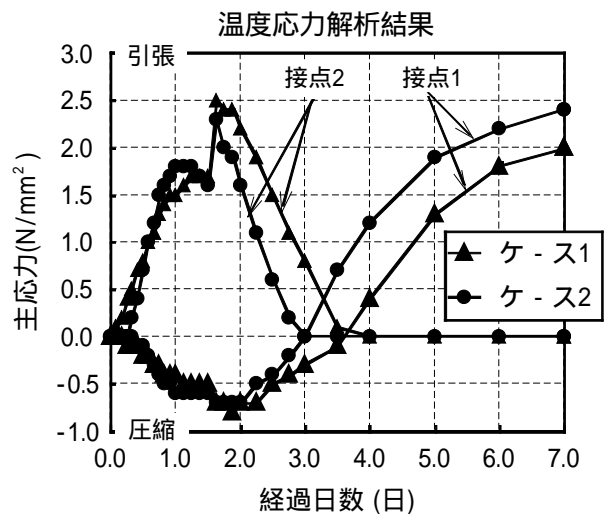
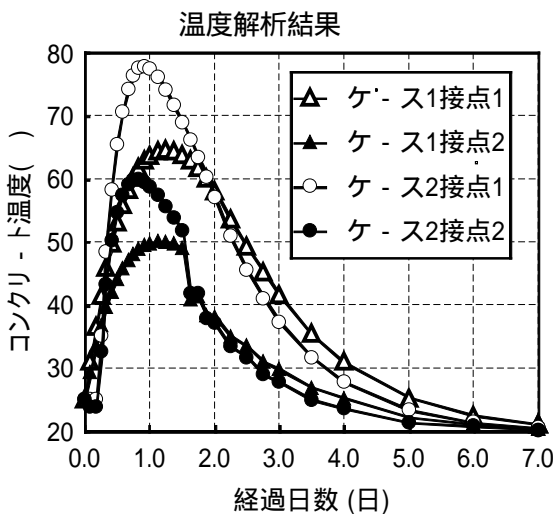


図-12 解析結果

(2) セメント種類, 単位水量, および打設量は解析結果におよぼす影響

温度応力によるひび割れ発生の抑制対策計画をたてる場合は各種要因を検討する必要がある。コンクリート橋脚の柱頭部を解析例として, セメントの種類, 単位水量, コンクリート打設のリフト割りを要因とし, 解析的な観点から温度応力に与える各種要因の影響を考える。図-13, 14に解析モデル(1/4モデル), 表-2に解析パラメータ, 表-3に解析に用いる材料定数をそれぞれ示す。

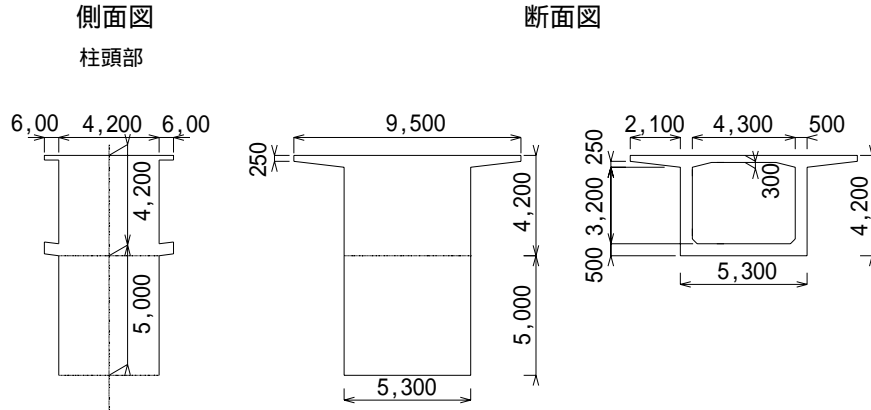


図-13 モデル詳細図

表-2 解析に用いた材料定数

設計基準強度	$f_{28}=40$ (N/mm ²)
熱伝導率	2.7 (W/m)
密度	2450 (kg/m ³)
比熱	1.15 (KJ/Kg)
断熱温度上昇	JSCE温度補正
初期温度	20()
ヤング率	$4700 \times F_c(t)^{0.5}$ (N/mm ²)
圧縮強度	JSCE 実験式
引張強度	$0.44 \times F_c(t)^{0.5}$ (N/mm ²)
ポアソン比	0.2
線膨張係数	10 (μ /)
クリープ構成則	有効弾性係数法
収縮ひずみ	考慮しない

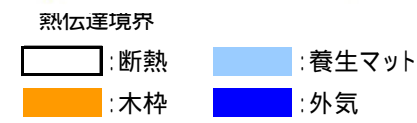
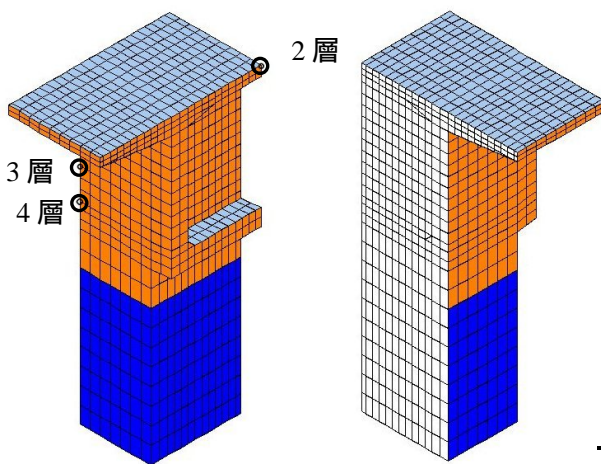


図-14 解析モデル(1/4モデル)

表-3 解析パラメータ

総リフト数	セメント種類	単位水量 (kg/m ³)
2層	普通セメント (N)	155
	早強セメント (H)	
3層	中庸熱セメント (M)	165
4層	高炉セメントB種 (BB)	175
	高ピーライト系セメント (L5)	

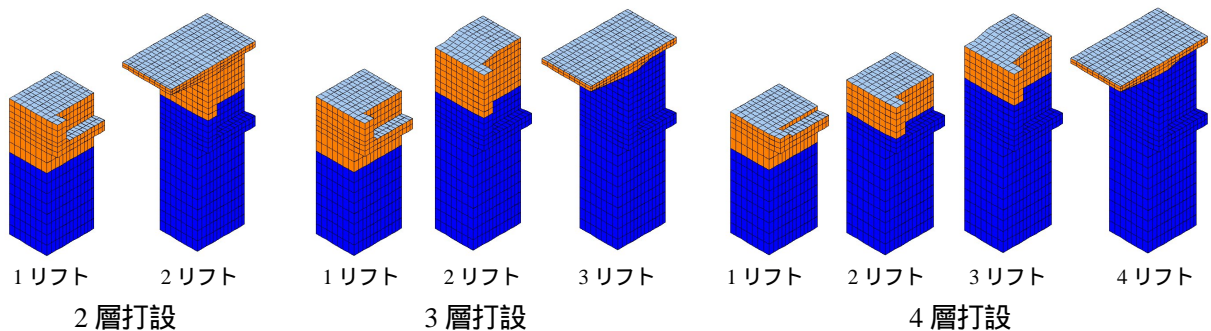


図-15 各種リフト割り

解析結果は「普通セメント使用，総リフト数3，単位水量 $165\text{kg}/\text{m}^3$ 」のひび割れ指数を1とした場合の各種要因のひび割れ指数の比率を用いて検討を実施した．図-16，17に解析結果をそれぞれ示す．また，図-14に示す～は各種リフト割りにおいて最小のひび割れ指数を示した場所である．

ここで解析結果を要因毎に検討すると，以下に示す順番で温度ひび割れの抑制効果がある．

- 1) セメント種類 : $M > N = BB = L5 > H$ (+15% ~ -10%)
- 2) 単位水量 : $155\text{kg}/\text{m}^3 > 165\text{kg}/\text{m}^3 > 175\text{kg}/\text{m}^3$ (+4% ~ -4%)
ただし， $\sigma_{28} = 40\text{N}/\text{mm}^2$ としているため，W/Cは一定となり，単位水量の増減がセメント量の増減となる．
- 3) リフト割り : 4層 > 3層 > 2層 (+10% ~ -27%)

次に解析結果を各要因で検討すると，セメント種類の変更，リフト数の変更，単位水量の変更の順に抑制効果が認められた．しかし，単位水量の変更による抑制効果は，セメントの種類やリフト割りの変更と比較して，抑制効果が小さくなる傾向が認められた．本モデルの範囲内においては，セメント種類の変更やリフト数割りの変更が抑制策として妥当であると思われる．

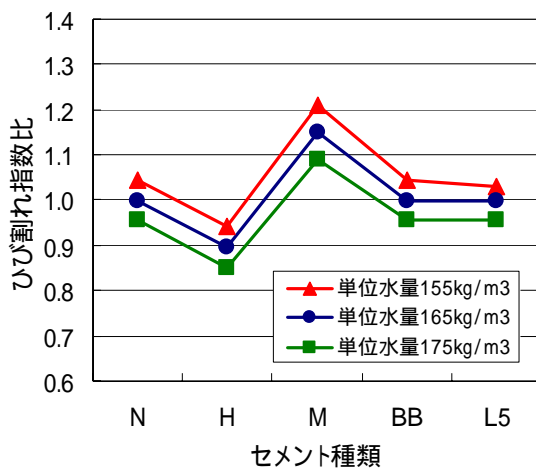


図-16 セメント種類及び単位水量がひび割れ指数に与える影響

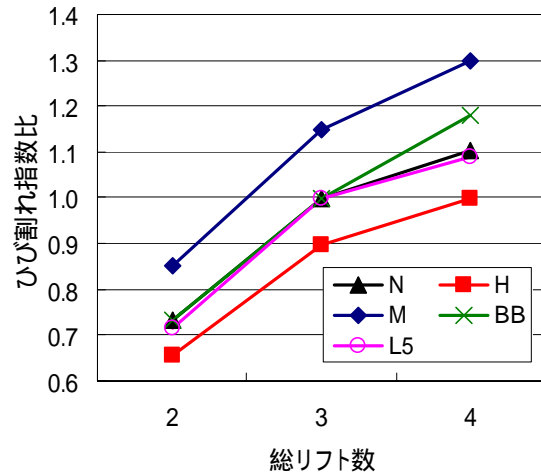


図-17 リフト割りがひび割れ指数に与える影響

9. おわりに

コンクリート構造物の耐久性の確保は必要不可欠となってきた。耐久性を確保するためには，温度ひび割れの検討は設計時と施工時の事前解析が必要であり，その対策案を施工計画書に明記していくことが重要となる．本検討では，温度応力に起因したひび割れ発生推定の観点から推定に必要なコンクリートの引張強度，発熱特性，強度発現について述べてきた．しかし，これ以外にも収縮特性，コンクリート温度の履歴が各物性におよぼす影響，引張クリップの評価など解決していない問題も多々あり，今後のさらなる研究成果が待たれるところである．また，特に温度ひび割れの検討精度を向上させる場合には示方書の数値を参考とするものの，極力試験により決定することが推定精度の向上につながると考えられる．

謝辞

本論文の作成にあたり，開発技術第一部員各位に多大なご助言を頂き，感謝いたします．

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書(施工編)，4章および6章，2002
- 2) 国土交通省，PC建協：現場打ち高強度コンクリート部材の設計施工法の開発に関する共同研究報告書第266号，2001