

論文 中空円筒構造物の温度ひび割れの制御

小西一寛*¹・伊藤 洋*²・藤原 愛*³・辻 幸和*⁴

要旨：温度ひび割れの制御水準が異なる外径7.25m, 側壁厚1.25m で高さ5.25m, 底版と頂版厚1.5mの中空円筒形構造物を2体作製し、施工時のセメントの水和熱および施工後の外気温変動による温度ひび割れの発生状況を比較し、その原因を推定した結果、以下の知見が得られた。①温度ひび割れを制御する中空円筒コンクリート構造物の施工時のひび割れの判定には、温度応力のほか、セメントの種類によっては自己収縮や伸び能力を考慮する必要がある。②施工後のひび割れの判定には、外的荷重のほか、自己拘束の大きさによっては、外気温変動による温度応力等の内的荷重を考慮する必要がある。

キーワード：ひび割れ制御, 温度ひび割れ指数, ひび割れ誘発目地, 外気温変動

1. まえがき

コンクリート構造物の透水性を評価するには、施工時のみならず施工後の止水欠陥を適切に評価するとともに、その透水性を定量的に評価する必要がある。大型コンクリート構造物では、配筋・打設・型枠支保工の施工性から打継目を設けることが多く、新コンクリートには打設後の温度上昇・降下に伴う膨張・収縮により温度ひび割れが発生し、打継目が引張力およびせん断力を受けると剥離やずれを生じる場合がある。また、これらを抑制したとしても、コンクリート構造物には、施工後の温度荷重によってひび割れが発生する可能性がある。

コンクリート標準示方書によると、温度ひび割れ指数と発生確率の関係から $I_{cr}=2.0$ 以上では温度ひび割れはほとんど発生しないのに対し、 $I_{cr}=0.8$ では温度ひび割れが発生する確率は70%以上とされていた[1]。そこで、自己拘束の大きい中空円筒形の鉄筋コンクリート構造物を温度ひび割れ指数が上記の2水準となるように作製し、コンクリート構造物の透水性を評価することにした。そのうち本文では、試験体施工時のひび割れの発生状況と温度ひび割れ指数との対応性と、施工後の透水試験中の外気温変動によると推定されるひび割れの発生状況について報告する。

2. コンクリート構造物試験体の概要

2. 1 温度ひび割れ対策

試験体は、止水欠陥の発生を抑制するため温度ひび割れ指数の目標を2.0以上とするひび割れ制御試験体と、止水欠陥の発生を誘発するため温度ひび割れ指数の目標を0.8以下とするひび割れ誘発試験体とした。試験体施工時の温度ひび割れ対策を、表-1に示す。

表-1 試験体施工時の温度ひび割れ対策

		ひび割れ制御試験体	ひび割れ誘発試験体
温度ひび割れの制御目標		温度ひび割れの抑制	温度ひび割れの誘発
構造	側壁下部の底版同時打設	嵩上げ高さ0.5m	—
	底版下面の拘束低減	スリップ材	スリップ材
	(ひび割れ誘発目地)	—	(断面欠損率19.2%)
配合	プレクーリング	液体窒素で打設温度を 8 ± 2 ℃に冷却	(常温打設)
施工	パイプクーリング	頂版のみ実施	—
	初期養生	保温湿潤養生	(断熱養生後冷却)

* 1 (株)大林組土木技術本部設計第二部課長 (正会員)

* 2 (株)熊谷組技術研究所土木系研究開発部土木グループ課長 工博(正会員)

* 3 (財)原子力環境整備センター研究第二部次長 工修

* 4 群馬大学教授 工学部建設工学科 工博(正会員)

2. 2 試験体の構造

ひび割れ制御試験体およびひび割れ誘発試験体は、外径7.25m、側壁厚1.25m で高さ5.25m、底版と頂版厚1.5mの中空円筒形の鉄筋コンクリート構造物であり、構造概要を図-1と図-2に示す。試験体の頂版中央には、頂版コンクリートの下型枠支保工の撤去および透水試験の準備のため、直径812mmのマンホールを設置した。なお、断面鉄筋比は、ひび割れが発生しても主鉄筋が降伏しないように、0.6%以上とし、純かぶりは12cmとした。

ひび割れ制御試験体の基礎には、コンクリート打設時の外部拘束の緩和のため碎石を敷いた。また、ひび割れ誘発試験体の側壁対角方向2カ所の両側面には、鉛直方向に深さ12cmの溝状欠損によるひび割れ誘発目地（断面欠損率19.2%）を設け、その断面を横切る円周方向鉄筋を1本おきに切断した。

2. 3 コンクリートの品質

$f'_{ck}=40\text{N/mm}^2$ の試験体コンクリートに要求した品質条件および試し練りにより定めた配合を表-2に示す。材齢約1年までの圧縮強度、静弾性係数、ポアソン比および割裂引張強度の試験結果を、表-3に示す。

セメントは事前に各種の試験を行い、ひび割れ制御試験体では中庸熱ポルトランドセメント45%、高炉スラグ微粉末55%からなる2成分系低発熱セメントを選定したが、底版・側壁コンクリート打設後の温度上昇は、事前解析と比較して10ないし13℃程度高くなった。このため、断熱温度上昇試験の再試験を行ったところ、図-3に示すように事前の断熱温度上昇量を上回った。この原因は、セメントの製造ロットの違いによる品質変動と推定された。

表-2 コンクリートの品質条件および標準配合

	セメントの種類	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (cm)	空気量 (％)	水セメント比 (％)	打込み度 (℃)	グリーディング率 (％)	細骨材率 (％)	単位量 (kg/m ³)						
									水 W	セメント C	粗骨材 S	粗骨材 G	石灰石粉	高性能AE減水剤	空気量調整剤
ひび割れ制御試験体	2成分系低発熱セメント	20	12±2.5	4±1	40	10以下	2以下	40.0	154	385	741	1023	30	5.585 (1.45%)	0.84 (6.5A)
ひび割れ誘発試験体	普通ポルトランドセメント	20	12±2.5	4±1	40	—	—	44.0	168	420	748	993	—	5.46 (1.3%)	0.84 (2.0A)

注) 1. 2成分系低発熱セメントは、中庸熱ポルトランドセメントを45%、高炉スラグ微粉末を55%含む

2. 粗骨材：両神産硬質砂岩砕石2005と横瀬産石灰砕石2005を5：5で混合
3. 石灰石粉：炭酸カルシウム粉末で比表面積5000cm²/g

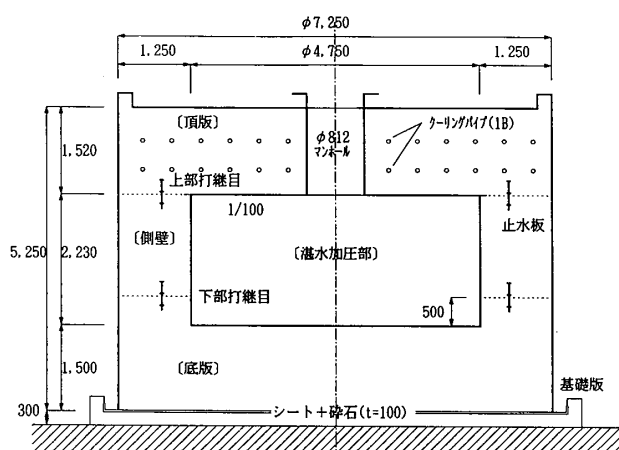


図-1 ひび割れ制御試験体の構造概要

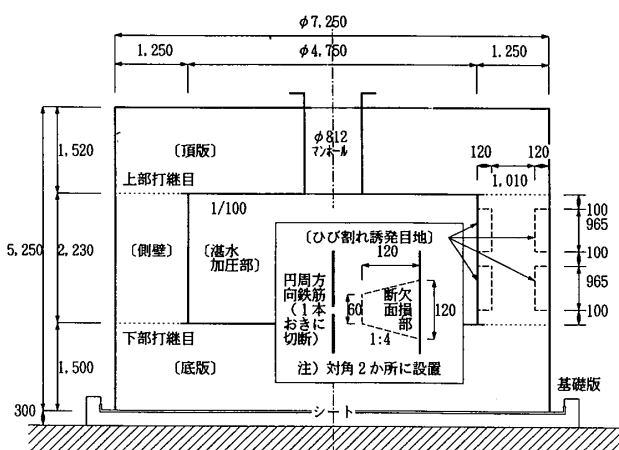


図-2 ひび割れ誘発試験体の構造概要

表-3 側壁コンクリートの力学的試験結果

試験項目		試験材齢							
		1 日	3 日	7 日	14日	28日	91日	365日	438日
2成分系 低発熱セメント	圧縮強度	3.5	13.2	24.8	38.1	48.0	57.9	60.0	—
	静弾性係数	—	1.63	2.36	2.80	2.98	3.37	3.66	—
	ポアソン比	—	0.17	0.20	0.22	0.23	0.24	0.23	—
	割裂引張強度	0.50	1.16	1.99	2.73	3.50	4.56	4.86	—
普通ポルトランドセメント	圧縮強度	21.8	29.8	36.1	41.2	45.5	—	—	48.5
	静弾性係数	—	2.72	2.92	3.15	3.31	—	—	3.50
	ポアソン比	—	0.19	0.20	0.22	0.22	—	—	0.22
	割裂引張強度	2.08	2.48	2.97	3.22	3.48	—	—	3.59

注) 1. ポアソン比以外の単位はN/mm²とし、静弾性係数には10⁴を乗じる。
2. 3供試体の平均値を示す。

3. 施工時のひび割れ

3. 1 試験体の施工と養生

試験体は建屋内で、マスコンクリートの温度ひび割れ制御にとってクリティカルな秋期に作製した。底板・側壁・頂版コンクリートは、およそ1か月の間隔をおいて打設した。試験体の施工と施工後にを行った透水試験の工程を、表-4に示す。

(1) ひび割れ制御試験体

試験体の施工場所は、外気温変動が大きい地域で、日中と夜間の温度差は最大15℃程度生じた。そのため、ひび割れ制御試験体では、外気温変動を抑制するため養生マット等で保温養生を実施するとともに、表面乾燥を防ぎセメントの水和を促進するため、脱型後直ちにシートにより被覆する湿潤養生を行った。セメントの品質変動により、頂版打設後の温度ひび割れ指数が、2.2から1.5に低下すると予想されたためパイプクーリングを追加施工した結果、表-5

に示すように、頂版では最高温度をおよそ29℃に抑制した。さらに、試験体施工1か月後に試験体の内部に湛水し、同2か月後に試験加圧を実施するため保温湿潤養生材を撤去した。

(2) ひび割れ誘発試験体

ひび割れ誘発試験体では、施工後に温度ひび割れ等の止水欠陥にグラウトの注入試験を行うため、温度ひび割れの発生を確実にする必要があった。そこで、普通ポルトランドセメントを用いるほか、側壁打設後に断熱材で覆い温度上昇を促すと共に、頂版下型枠を設置後2日間、試験体の内部を-20℃程度に冷却し、ひび割れの発生を助長した。なお脱型後は表乾状態とした。

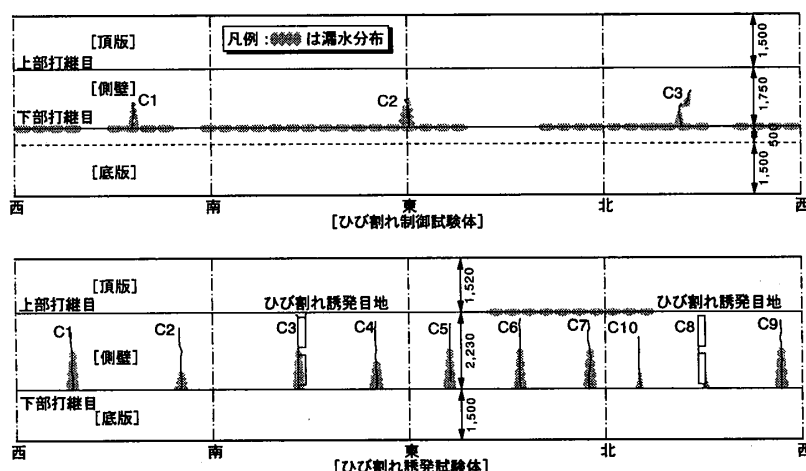


図-4 施工時のひび割れおよび漏水分布

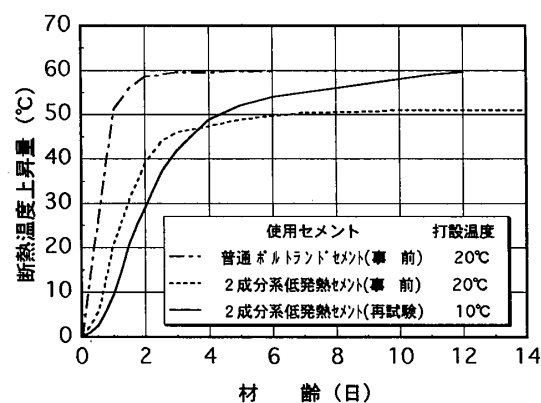


図-3 コンクリートの断熱温度上昇試験

表-4 試験体の施工および透水試験工程

	10月	1	4	7	10	1	4	7
試験体の作製	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽	▽▽▽
試験加圧								
保温湿潤養生								
初期透水試験								
頂版ひび割れ								
恒温湿潤養生								
長期透水試験								

表-5 コンクリート
打設時の温度計測結果

		打設温度	最高温度	温度上昇
ひび割れ制御試験体	底板	6.0℃	52.9	46.9
	側壁	8.0	43.5	35.5
	頂版	7.0	28.7	21.7
ひび割れ誘発試験体	底板	27.5	88.7	61.2
	側壁	34.0	88.6	54.6
	頂版	28.0	82.5	54.5

表-6 施工時の
側壁のひび割れデータ

ひび割れ制御試験体		幅(mm)	長さ(m)	間隔(m)
	C1	0.05	0.95	6.22
	C2	0.05	0.90	6.54
	C3	0.05	1.10	6.09
	平均	0.05	0.98	6.28
ひび割れ誘発試験体	C1	0.17	1.60	2.24
	C2	0.23	1.70	2.73
	C3	0.31	2.25	2.33
	C4	0.16	1.90	1.81
	C5	0.13	1.70	1.74
	C6	0.20	2.00	1.65
	C7	0.15	1.80	2.19
	C8	0.19	2.25	2.31
	C9	0.05	1.90	1.85
	平均	0.18	1.90	2.09

注) 間隔は円筒型側壁の軸線上の間隔に換算

3. 2 施工時のひび割れの発生状況

(1) ひび割れの目視調査

試験体施工時のひび割れおよび後述する試験加圧時の漏水状況を目視調査した結果を、図-4および表-6に示す。ひび割れ誘発試験体の側壁には9本のひび割れが発生したが、ひび割れ誘発目地に集中せず、全周に分散した。平均ひび割れ幅は0.18mmであり、平均ひび割れ長さは約1.9m、平均ひび割れ間隔は約2.1mで側壁の打設高さ2.25mに近かった。また、頂版のマンホール周りにも放射方向に軽微なひび割れが発生した。漏水はひび割れのほか、側壁と頂版間の打継目の一部で観察された。

ひび割れ制御試験体の側壁には3本の微小なひび割れが発生したが、平均ひび割れ間隔は6.28mで平均ひび割れ幅は0.05mm、平均ひび割れ長さは約1.0mで側壁の打設高さ1.75mの約半分となり、ひび割れ誘発試験体と比較してひび割れが抑制された。漏水はひび割れのほか、側壁と底版間の打継目の一部で観察された。

(2) 温度応力の検討

側壁コンクリートの打設時の温度計測に基づくFEM軸対称温度応力の事後解析条件を表-7、結果を図-5に示す。ひび割れ制御試験体の温度ひび割れ指数は頂版打設直後に2.1となり、温度ひび割れが発生しないとされる2.0以上を上回ったのに対し、ひび割れ誘発試験体では0.8となり、ひび割れ誘発目地の断面欠損率を考慮すると $0.8 \times 0.808 \approx 0.65$ と推定される。

3. 3 側壁ひび割れの原因推定

ひび割れ制御試験体の側壁では、温度ひび割れ指数が2.1にもかかわらず、ひび割れが生じたことから、従来の温度ひび割れ指数による判定[1]では考慮していない要因が複合したと考えられる。最新の土木学会コンクリート標準示方書によると、温度ひび割れ指数を算定する際の引張強度は2割程度低減するとともに、同一の温度ひび割れ指数に対するひび割れ発生確率を大きくしている[2]。また、高炉スラグ微粉末を多く含むセメントを用いたコンクリートは自己収縮が大きく、さらに引張強度が圧縮強度の平方根に比例するとした場合の比例定数は他のセメントと比較して小さいと報告されている[3]。そこで、温度ひび割れ指数を算定する際の低減とセメントの種類による低減をそれぞれ2割考慮すると、ひび割れ制御試験体の温度ひび割れ指数は $2.1 \times 0.8 \times 0.8 \approx 1.34$ に低下し、ひび割れ発生確率が10%程度生じることになる。

表-7 温度および温度応力の解析条件

		ひび割れ誘発試験体	ひび割れ制御試験体
断熱温度	K (°C)	60.9	53.9
上昇量	α	2.235	0.290
単位体積質量(kg/m³)		2354	
比熱(kcal/kg°C)		0.26	
熱伝導率(kcal/mh°C)		2.35	
熱伝達率(kcal/m²h°C)		通常の型枠養生 : 10 シート養生 : 5 底版、頂版の保温養生 : 3 断熱養生 : 0.3	
線膨張係数(1/°C)		11×10^{-6}	
クリープ係数		CEB-FIPコード	
ヤング係数(kgf/cm²)		40444 1nM-15216	60506 1nM-253461
引張強度(kgf/cm²)		5.437 1nM-17.73	8.949 1nM-55.88

注) Mはマチュリティ(h°C)を示す。

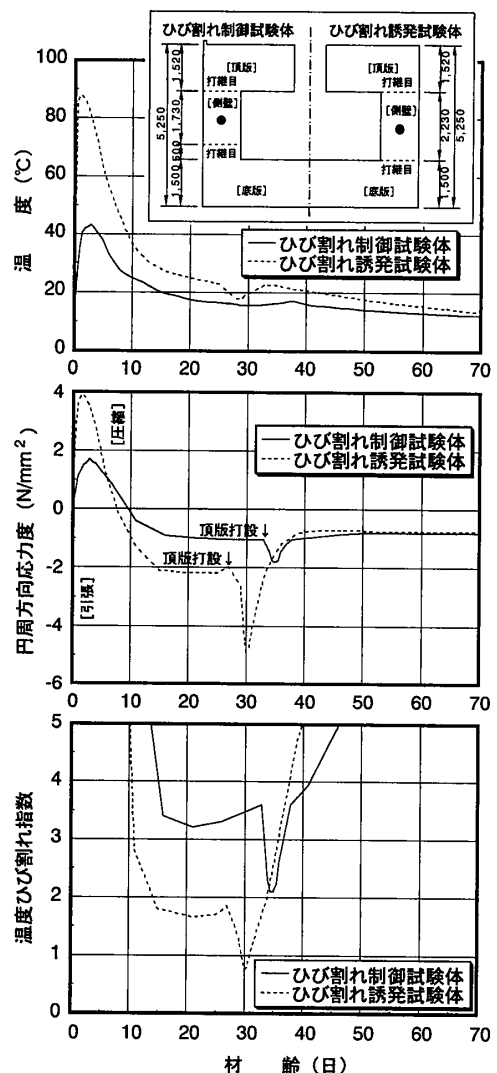


図-5 試験体の側壁中央の温度・温度応力の事後解析

ひび割れ制御および誘発試験体の補正した温度ひび割れ指数から、最大ひび割れ幅を推定すると[2]、0.06および0.32mmとなり、実測値とおおむね一致した。

4. 施工後のひび割れ

4. 1 試験体の養生と透水試験の経緯

(1) 試験加圧：試験体は、漏水状況を把握する目的で、施工2か月後に試験加圧を実施した。注水圧は、試験体コンクリートの引張応力度が引張強度の1/3程度の0.4MPaを上限とした。

(2) 保温湿潤養生：試験加圧の終了後、ひび割れ制御試験体の側面は温度変動を緩和するため保温材で覆うとともに、湿潤養生を行うため試験体上・下面に湛水し、初期透水試験終了まで試験体との間隙に流水を循環した。

(3) 初期透水試験：初期透水試験は、試験体施工3か月後の冬期に約1か月間実施した。注水圧は試験加圧と同じ0.4MPaを上限とし、段階的に昇圧および降圧した。ひび割れ誘発試験体では図-4に示したように、初期透水試験後、側壁に平均ひび割れ幅0.02mm、ひび割れ長さ1.00mのひび割れが1本新たに発生した。以下、ひび割れ制御試験体について記述する。

(4) 恒温湿潤養生：ひび割れ制御試験体は初期透水試験を終えて、さらに保温湿潤養生を6か月間継続し加圧したが、試験体施工11か月後に頂版に貫通ひび割れが4本発生した。透水試験をさらに継続することから、可能な限り他の透水経路を生かすエポキシ樹脂によるひび割れの注入補修を行い、さらに、恒温湿潤養生を開始した。

(5) 長期透水試験：恒温湿潤養生を実施して1か月後から、注水圧0.3MPa一定の長期透水試験を実施したが、頂版に貫通ひび割れ1本が追加発生した。

4. 2 施工後のひび割れの発生状況

(1) ひび割れの目視調査

最初に、ひび割れ制御試験体の頂版において発生したひび割れは、図-6および表-8に示すように、頂版中央に埋設した外径812mmのマンホールから放射方向にはほぼ等ピッチで4本発生した。さらに、8か月後に1本追加して発生したひび割れも放射方向に生じた。合計5本のひび割れはいずれも放射方向に生じ、マンホールから側壁と頂版の打継面まで到達した。したがって、側壁に拘束された頂版が施工後の何らかの原因で引張応力が発生し、マンホール近傍の応力集中域で、コンクリートの引張強度を超えたと推定される。ひび割れの発生時期は施工後の透水試験中であり、試験体の施工時の温度応力および内圧による注水圧がひび割れの主因とは考えにくい。

(2) 温度計測と温度応力解析

2回目にひび割れが生じたときの温度の経時変化を図-7に示す。発生当日は試験場所の建屋内の室温が約40℃に達し、恒温水循環装置の運転上限温度35℃を超えたため、循環水温が10℃程度急上昇し、屋根直下にある試験体頂版の環境温度が上昇した。一方、それまで恒温養生により約21℃に保持されていた

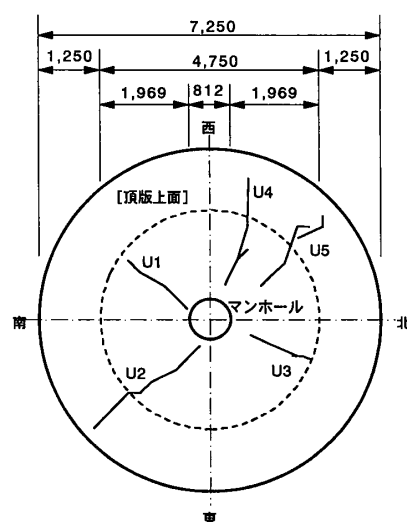


図-6 施工後の頂版のひび割れ分布

表-8 施工後の頂版のひび割れデータ

時期	ひび割れ制御試験体			
		幅(mm)	長さ(m)	間隔(°)
① 回目	U1	0.07	1.70	75
	U2	0.10	3.20	97
	U3	0.07	1.30	105(91)
	U4	0.07	2.80	83(51)
②	U5	0.10	3.20	- (46)
	平均	0.08	0.90	90(72)

注) ()内はひび割れ2回目の発生時点のひび割れ間隔を示す。

試験体の内側温度は、内部湛水の熱容量が大きく直ちに追従しないことから、頂版の上下面に約10℃の温度差が生じたと推定される。これを確認するため、循環水温が上昇後から安定するまでを対象とする非定常温度解析および全断面有効として頂版上下面の温度差による温度応力解析を行った。長期透水試験の注水圧0.3MPaによる円周方向引張応力を重ね合わせた最大引張応力結果を、図-8に示す。この応力解析により、試験体頂版の上下面に10℃の温度差が生じると、コンクリートの引張応力度は引張強度を上回ることがわかった。

4. 3 頂版ひび割れの原因推定

施工時にひび割れを制御し、施工後に恒温湿潤養生を実施したひび割れ制御試験体では、施工後にひび割れの本数が増加したのに対し、施工時にひび割れが多く発生し、施工後に特別の養生を行わなかったひび割れ誘発試験体では、ひび割れが増加しなかった。つまり、中空円筒形のひび割れ制御試験体では、剛性低下が小さいため自己拘束が大きくかつ、頂版上下面の温度差が大きかったことが、温度応力を大きくした要因と考えられる。この温度応力により曲げひび割れが発生し、内圧の注水圧によりひび割れていない断面の負担応力が増加し、貫通ひび割れに進展したと推定される。

5. まとめ

中空円筒形コンクリート構造物の施工時および施工後のひび割れの発生状況から、その原因について推定したが、それぞれ内的・外的な温度変動等による拘束応力が密接に係わっていることが明らかになった。本研究のような中空円筒形のコンクリート構造物のひび割れを制御するためには、次の事項に配慮することが重要である。

- (1) 中空円筒形のコンクリート構造物の施工時のひび割れは、平均的な引張強度よりも弱い円周上のどこかに生じる可能性があることから、引張強度を2割程度低減するだけでなく、セメントの種類によっては、引張強度や伸び能力が小さいことや自己収縮を考慮する必要がある。
- (2) 施工後、外荷重や外気温変動が加わる中空円筒形のコンクリート構造物のひび割れは、平均的な断面剛性よりも小さい円周上のどこかに生じる可能性があることから、断面欠損部を検討するだけでなく、ひび割れの制御水準によっては、断面剛性を慎重に低減する必要がある。

〔あとがき〕この研究をまとめるにあたり、(財)原子力環境整備センターに設けられたコンクリート構築物検討委員会の委員の方々から、貴重なご助言を頂き深く感謝いたします。

〔参考文献〕

- [1] 土木学会，コンクリート標準示方書〔平成2年版〕施工編，pp.134-146, 1991.7
- [2] 土木学会，コンクリート標準示方書〔平成8年制定〕施工編，pp.182-193, 1996.3
- [3] 土木学会，コンクリート技術シリーズ14 最新のマスコンクリート技術，pp.8-23, 1996.11

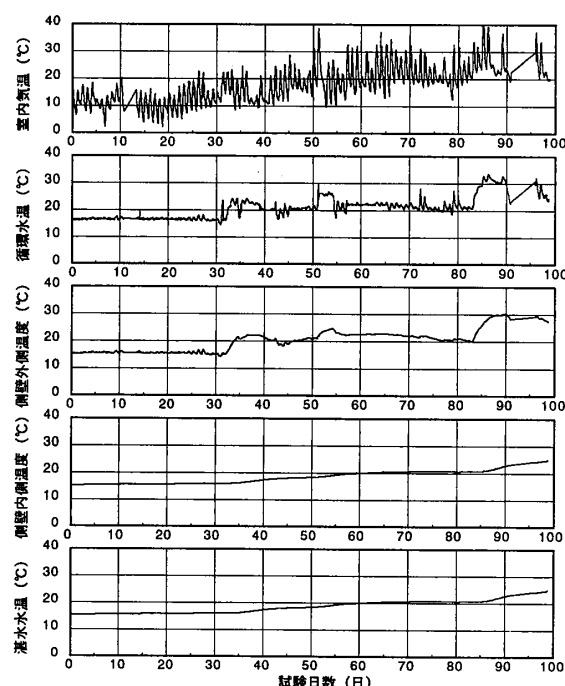


図-7 長期透水試験中の温度経時変化

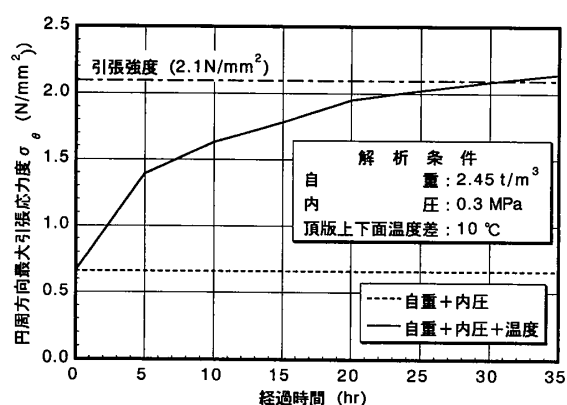


図-8 円周方向最大引張応力度の経時変化