

### [3] マスコンクリートの有効弾性係数に関する実験的研究

正会員 青景平昌 (フジタ工業技術研究所)  
 正会員 ○伊藤祐二 (フジタ工業技術研究所)  
 渡辺直樹 (フジタ工業技術研究所)

#### §1 まえがき

セメントの水和熱による温度応力は、ひびわれ発生原因の一つとしてマスコンクリート施工の主要な検討項目の一つになっている。しかし、温度応力の予測計算に用いる若材令時の有効弾性係数あるいはクリープ係数には不明な点が多く、計算精度向上の阻害要因となっている。そこで本研究は、室内実験および現場計測データにもとずき、マスコンクリートの有効弾性係数を定量的に評価し、さらにこの結果を用いて計算した温度応力を実測結果と比較検討し、その予測計算への適用性について考察したものである。

#### §2 実験概要

##### 2.1 室内実験

コンクリートの温度下降速度に着目し、JIS原案の「コンクリートの水和熱による温度ひびわれ試験方法(案) 1)」に準じた試験を行った。図-1に試験装置を示す。温度可変室内に本装置を静置し、コンクリート打設後8時間は一定温度(20°C)を保持し、側枠および底板を脱型した後に、所定の温度履歴を与えた。計測項目はコンクリートの温度とひずみ、拘束パイプの温度とひずみであり、コンクリートの温度応力は拘束パイプのひずみより求めた。コンクリート打設時には、φ10X20cmの円柱供試体を作製し、圧縮強度、引張強度および静弾性係数を各材令にて試験した。

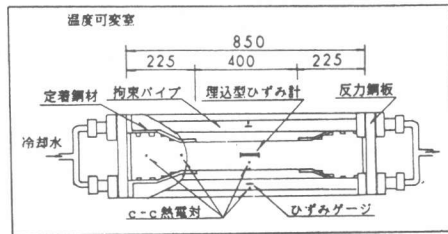


図-1 温度ひびわれ試験装置

##### 2.2 現場計測

本研究に使用した現場計測データには、内部拘束が卓越した底板一ヶ所、外部拘束が卓越した側壁二ヶ所とトンネル覆工コンクリート一ヶ所の合計4ヶ所の現場での計測結果である。それぞれの現場において、有効応力計、埋込型ひずみ計と温度計を対にして同一個所に設置し、同一時点の温度応力と有効ひずみを計測することにより、その応力-ひずみ関係から有効弾性係数の検討を試みたものである。各現場ともコンクリートの圧縮強度、引張強度および静弾性係数の試験を各材令で行っている。

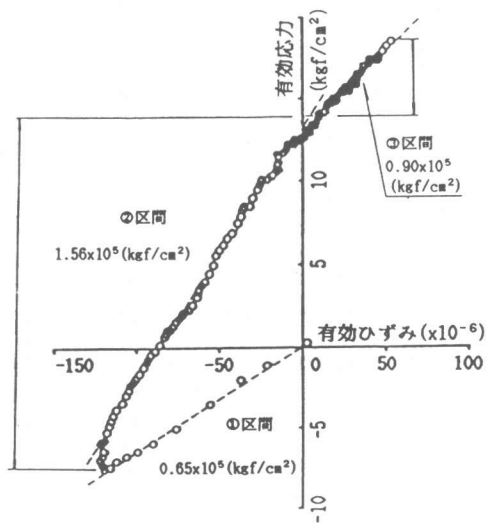


図-2 有効応力と有効ひずみの関係

#### §3 有効応力と有効ひずみの関係

本研究に用いたデータは、温度の変化速度でみると、上昇速度が約6-40(°C/日)、また下降速度が約1-75(°C/日)の範囲にあり、さらに応力の発生速度でみると1.5-43.8(kgf/cm²/日)と、非常に広い範囲に分布したものである。

典型的な有効応力と有効ひずみの関係を図-2に示す。有効弾性係数はこの図の有効応力と有効ひずみの勾配より求めることができる。この図より、田沢らの研究報告<sup>2)</sup>と同様にほぼ直線的な区間が温度上昇域と温度下降域に認められること、また温度応力を簡便に推定するためには単純な有効弾性係数のモデル化が望ましいことより、有効応力と有効ひずみの関係を便宜上3本の直線に近似し、それぞれの区間の平均的な有効弾性係数を求めることとした。すなわち、3本の直線に近似する区間は、図-3に示すように、①区間は原点から最大圧縮応力の点までとし、②区間は最大圧縮応力の点から引張域における引張強度との応力レベル比が0.5の点までとし、また③区間はそこから最大応力レベルまでの範囲とする。温度下降域を②区間と③区間とに分けたのは、もちろん、この両区間を一本の直線で近似するには無理があること、また高応力レベルになるにしたがって勾配が小さくなる傾向があることより、コンクリートの引張塑性化の影響を考慮すべき③区間と弾性範囲内と想定できる②区間とに分けるのが妥当と考えられたからである。②区間と③区間の境界は、クリープが載荷応力に比例する限界といわれている応力レベル比0.3-0.75<sup>3)</sup>の平均とした。各区間の直線近似は最小二乗法によって行ない、その勾配を有効弾性係数とした。

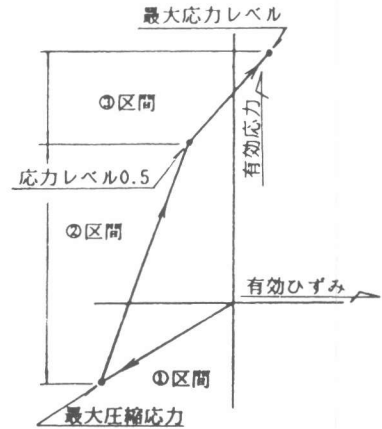


図-3 有効応力と有効ひずみの関係

#### §4 有効弾性係数

§3で述べた方法により、有効弾性係数(Ee)を①、②および③区間についてそれぞれ求めたが、配合の異なるコンクリートの結果を比較検討するために次の方法により無次元化した。すなわち、コンクリートの標準養生28日の静弾性係数(Ec28)で各区間の有効弾性係数(Ee)を除し、Ee/Ec28とした。

無次元化した有効弾性係数を表-1に示す。表中の平均積算温度(Mav)とは各区間の始点と終点における積算温度の平均値を表している。

表-1 有効弾性係数一覧

試験名	静弾性係数 (材令28日) Ec28 x10 <sup>5</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	① 区 間			② 区 間			③ 区 間		
		平均積算温度 Mav (°c・日)	有効弾性係数 Eex10 <sup>6</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	Ee Ec28	平均積算温度 Mav (°c・日)	有効弾性係数 Eex10 <sup>6</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	Ee Ec28	平均積算温度 Mav (°c・日)	有効弾性係数 Eex10 <sup>6</sup> (kgf/cm <sup>2</sup> )	Ee Ec28
No1	2.84	47.8	0.58	0.20	300.2	1.48	0.52	249.8	0.86	0.33
No2	2.64	46.2	0.49	0.19	161.6	1.46	0.55	--	--	--
No3	2.50	107.8	0.58	0.23	164.1	1.33	0.53	--	--	--
No4	2.75	78.6	0.63	0.23	164.4	1.10	0.40	--	--	--
No5	2.51	46.9	0.44	0.18	99.9	1.06	0.42	123.0	0.71	0.28
No6	3.06	51.2	0.56	0.18	158.6	1.75	0.58	135.0	0.58	0.19
No7	2.81	36.4	0.49	0.17	63.4	1.37	0.49	83.8	0.86	0.31
現場1	2.80	51.9	0.65	0.23	659.4	1.56	0.56	1442.8	0.90	0.32
現場2	2.80	41.7	0.81	0.29	168.1	1.59	0.57	784.5	0.61	0.22
現場3	2.32	17.6	0.30	0.13	95.1	0.93	0.40	--	--	--
現場4	3.66	29.0	0.65	0.18	396.6	2.14	0.58	777.2	0.95	0.26

図-4はEe/Ec28と平均積算温度(Mav)との関係を示している。図中△印は①区間より、○印は②区間より、また□印は③区間より求めた値であり、それぞれの実線はEe/Ec28の平均値を、さらに斜線の3領域はEe/Ec28の標準偏差の範囲を示している。この図より、Ee/Ec28はおおのこの区間においてほぼ一定となっていることが認められる。これは、コンクリートの物性が大きく変化しているにもかかわらず、有効弾性係数としては経時的

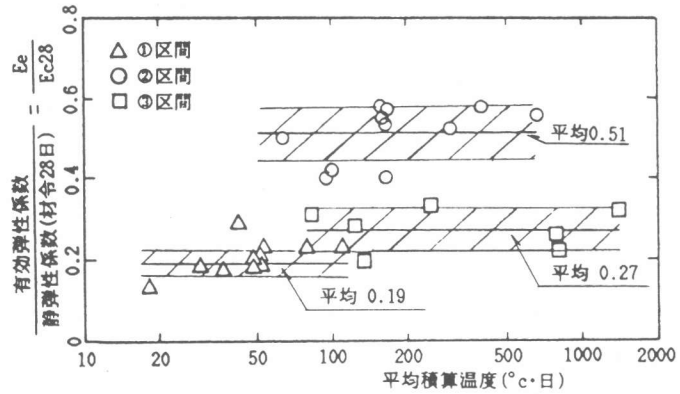


図-4 Ee/Ec28と平均積算温度の関係

な剛性の増大とクリープによる剛性低下が相殺されて、ほぼ一定に近い値になっているものと考えられる。本研究の範囲内ではEe/Ec28の平均値は①区間で0.19、②区間で0.51および③区間で0.27であった。

## §5 室内試験への適用

### 5.1 温度応力の計算方法

§4にて求めた各区間における有効弾性係数の適用性を検証するために、これらの結果を用いて温度応力を逆算し実測値と比較検討する。室内試験は単純な一軸拘束と考えられるので、温度応力(外部拘束応力： $\sigma(t)$ )は時間ステップの逐次計算式(1)式で求められる<sup>4)</sup>。

$$\sigma(t) = \alpha K E_e \sum_{t_0}^t (\Delta T_R - \Delta T_C) \quad (1)$$

ここに、 $\sigma(t)$ :温度応力

t:材令(日)

K:外部拘束度

$\alpha$ :コンクリートの線膨張係数

Ee:有効弾性係数の時間ステップ間の平均値

t<sub>0</sub>:応力計算を開始する基準材令(日)

$\Delta T_R$ :拘束材平均温度の時間ステップ間の変化量

$\Delta T_C$ :コンクリートの断面平均温度の時間ステップ間の変化量

§4で求めた有効弾性係数のみの影響を直接比較するために、有効弾性係数以外の入力値は全て実測値を使用することとした。拘束材の平均温度は4本の拘束パイプの算術平均を、コンクリートの平均温度は温度計測点の負担面積を考慮した平均値を、さらに外部拘束度は温度上昇および下降域の実測値を入力データとして用いた。

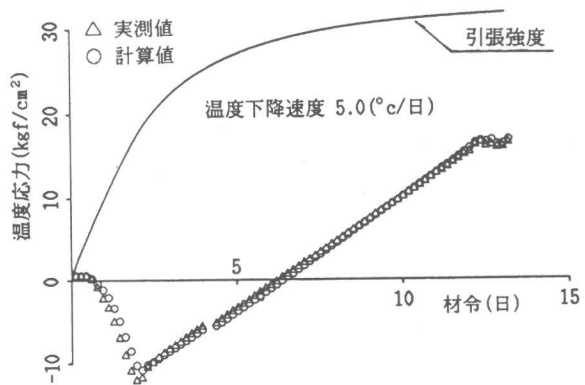


図-5 温度応力計算値と実測値の比較

## 5.2 温度応力の計算結果

図-5および6は、コンクリートの温度下降速度が異なる2ケースについての、温度応力計算値と実測値の比較を示している。これらの図には積算温度を考慮した引張強度も併記している。図-5および6の温度下降速度はそれぞれ5.0(°C/日)および74.8(°C/日)と極端に異なったものである。また、図-6の場合には、材令2日にて供試体中央部にひびわれの発生が認められた。

図-5および6より、試験期間の全領域において、計算値と実測値は良く一致しているのが認められる。特に、図-6の場合には、ひびわれ発生直前におけるコンクリートの塑性化領域においても良く一致した結果が得られている。

有効弾性係数は図-2の有効応力と有効ひずみの関係より、便宜上3つの区間に分けて求めたが、逆算した温度応力の結果からみるとほぼ妥当なものと考えられる。これには理論的には不合理な点はあるが、あくまでも実測値にもとずいた近似である。

ここでは室内試験の結果と比較検討したが、今後は種々の拘束条件下の構造物への適用性についてさらに検討して行く必要がある。

## §6 まとめ

室内試験および現場計測データより、有効弾性係数を検討し、この結果を用いて室内試験の場合の温度応力を計算し実測値と比較した。その結果、本研究の範囲内において次のことが言える。

- 1) 無次元化した有効弾性係数( $E_e/E_{c28}$ )は、設定した3つの区間においてほぼ一定と考えられた。  
 $E_e/E_{c28}$ の平均値は①区間で0.19、②区間で0.51および③区間で0.27であった。
- 2) 前述の有効弾性係数を用いて計算した温度応力は、温度下降速度が大きく異なる場合でも、実測値と良く一致した。

## <参考文献>

- 1) 仕入, 青柳, 川瀬「コンクリートのひびわれ試験方法(案)」コンクリート工学, Vol.23, No3, 1985年
- 2) 田沢, 飯田「硬化時温度応力の発生メカニズムについて」マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, 日本コンクリート工学協会, 1982年9月
- 3) A. M. Neville (後藤 尾坂 監訳)「コンクリートの特性」技報堂出版, 1979年
- 4) 前野, 青景, 伊藤「大断面ボックスカルバートの硬化時温度応力について」第2回マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム論文集, 日本コンクリート工学協会, 1984年3月

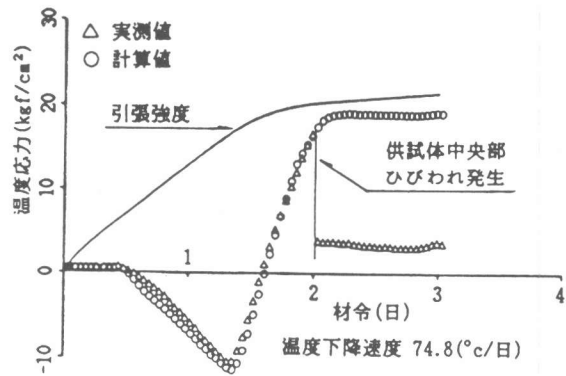


図-6 温度応力計算値と実測値の比較