

仕事量一定則に基づいた CP 法による膨張コンクリートの温度応力解析

名城大学大学院 学生員 羽田 和香予 名城大学 正会員 石川 靖晃

1. はじめに

CP 法とは、1985 年に日本コンクリート(JCI)工学協会温度応力委員会で提案された手法¹⁾であり、2007 年制定土木学会コンクリート標準示方書「設計編」において、ひび割れ指数を算定する有力な手法として提示されている。一方、近年では、膨張材の使用に対する温度ひび割れ抑制効果を定量的に評価できる手法の構築が熟望視されている。CP 法では、膨張材の効果を考慮することは現在不可能であるが、近年では、膨張材の変形挙動は仕事量一定則に基づいていることが確認されている²⁾。そこで、本研究では、仕事量一定則に基づき、膨張材の効果を考慮に入れた CP 法の定式化を試みた。そして、提案した CP 法により温度応力解析を行い、その基本的特質について検討を行った。

2. 膨張材効果を考慮に入れた CP 法の定式化

図-1 で示すように、地盤上にコンクリート躯体が打設されると考える。なお、躯体は平面保持の仮定を満たしている。この時、外部拘束と内部拘束の 2 つの拘束が生じるが、この 2 つの拘束により生じた応力を重ね合わせることで、より応力を簡便に評価する手法が CP 法である。躯体は図-2 のような断面であるとする。この断面モデルにおいて、鉄筋と被拘束体(膨張材有)の温度ひずみ分布を ϵ^t とする。被拘束体(膨張材有)には、さらに膨張材による自由膨張ひずみ分布 ϵ^{che} が存在している。このとき BB' 面の CP の自由な軸ひずみ $\bar{\epsilon}$ 、曲率 $\bar{\phi}$ は、次式で表わされる。

$$\Delta \bar{\epsilon} = \frac{E_f \int_{A_f} \Delta \epsilon^t dA_f + E_c \int_{A_c} (\Delta \epsilon^t + \Delta \epsilon^{che}) dA_c + E_s \int_{A_s} \Delta \epsilon^t dA_s}{E_f A_f + E_c A_c + E_s A_s} \quad (1)$$

$$\Delta \bar{\phi} = \frac{E_f \int_{A_f} \Delta \epsilon^t (y - y_g) dA_f + E_c \int_{A_c} (\Delta \epsilon^t + \Delta \epsilon^{che}) (y - y_g) dA_c + E_s \int_{A_s} \Delta \epsilon^t (y - y_g) dA_s}{E_f \int_{A_f} (y - y_g)^2 dA_f + E_c \int_{A_c} (y - y_g)^2 dA_c + E_s \int_{A_s} (y - y_g)^2 dA_s} \quad (2)$$

ここで、 y_g は図心位置である。最終的な応力増分 $\Delta \sigma_f$, $\Delta \sigma_c$, $\Delta \sigma_s$ は、式(1), (2)および外部拘束係数 R_n , R_m を用いて計算することが出来るが、その詳細は、割愛する。なお、下付き添字“f”, “c” および “s” は、それぞれ拘束体、被拘束体および鉄筋を表わす。

一方、仕事量一定則によれば、単位体積当たりの膨張材の化学エネルギー U^{che} を用いて、膨張材領域の任意点にて次式が成立する。なお、 $\sigma_{c,0}$ は前のステップの応力である。

$$\{\sigma_{c,0} + \Delta \sigma_c\} \Delta \epsilon^{che} = -\Delta U^{che} \quad (3)$$

ただし、 $\sigma_{c,0} + \Delta \sigma_c > S_0$ となったときは、 $\Delta \epsilon^{che} = -\Delta U^{che} / S_0$ といった制約を課している。ここに、 S_0 は仕事量一定則が成立するための限界応力である。前のステップの $\Delta \epsilon^{che}$ を初期値とし、式(1), (2)を用いて、断面内の応力を計算する。そして、式(3)が成立するまで、上記作業を繰り返すことで、応力および自由膨張ひずみが計算される。即ち、提案手法は自由膨張ひ

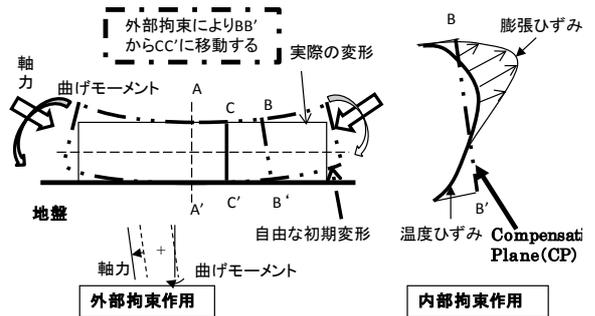


図-1 膨張材を含んだ CP 法の考え方

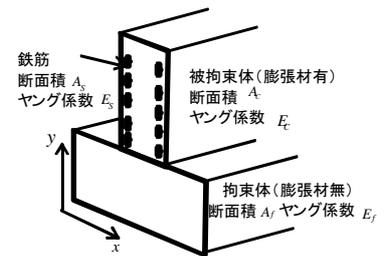


図-2 膨張材を含んだ断面モデル

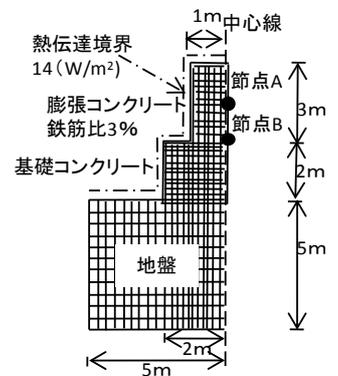


図-3 解析対象モデル

ずみを予め、入力値で与える方法ではなく、膨張材の化学エネルギーを入力値として与え、拘束に応じて自由膨張ひずみが定まる手法であり、このことが本手法の大きな特徴である。

3. 外部拘束および膨張混入量が応力におよぼす影響

図-3 に、解析モデルを示す。解析モデルは、地盤、基礎コンクリートおよび膨張コンクリートにて構成されており、対称性を考えて 1/2 モデルとしている。本解析では、基礎コンクリート打設 14 日後に、膨張コンクリートを打設することを想定している。CP 法では、基礎および膨張コンクリート部分を解析対象とした。なお、基礎コンクリートおよび膨張コンクリートの材料特性値は同一と仮定した。表-1 に、解析に用いた材料特性値を示す。

Rn=Rm=0.0 および Rn=0.2, Rm=0.8 の 2 ケース、鉄筋の有無に関する 2 ケース、膨張コンクリートにおける膨張材の有無に関する 2 ケースを設定した。鉄筋有りについては、鉄筋は、膨張コンクリートの側壁側に均等には配置され、配筋率は 3% とした。膨張材有りについては、膨張材混入量 20 kg/m³ を想定し、林らの研究³⁾を基に次式にて膨張材エネルギーを入力値として与えた。

$$U_{che}(t) = 5.0 \times 10^{-5} (1 - \exp(0.69(t - 0.3)^{1.11})) (4)$$

図-4 に提案した手法により得られた応力履歴を示す。なお、 $S_0 = -0.001$ (N/mm²) とした。外部拘束が大きいほど、膨張材効果が大きい結果となった。図-5 に、鉄筋有りのケースにおける自由膨張ひずみ履歴および経過時間 34 日目における自由膨張ひずみ分布を示す。応力が負から正に移行する際、自由膨張ひずみは大きく生じていることが分かる。この理由は S_0 によるものと考えられるが、この与え方については、今後更に検討したいと考えている。また、分布より、自由膨張ひずみが場所により変動することが確認された。外部拘束が大きいほど、自由膨張ひずみの変動の程度は小さいことが確認された。

4. おわりに

以上より、仕事量一定則に基づき、温度応力解析を実施した場合、外部拘束の程度が膨張材の効果に及ぼす影響が大きく、さらに、同一混入量であっても、自由膨張ひずみは場所ごとに異なる可能性があることが示された。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会協会：マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書，1985. 11
- 2) 石川ほか：仕事量一定則に基づく膨張コンクリートの变形挙動に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol. 30, No. 1, pp. 351-356, 2008
- 3) 林ほか：脱型材齢が膨張コンクリートのヤング係数および仕事量に及ぼす影響，土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集，V-449, pp895-896

表-1 解析に用いた材料特性

材料特性	値もしくは式	
	地盤	コンクリート
熱伝導率(W/m ² C)	3	2.7
比熱(J/kg ² C)	800	1100
密度(kg/m ³)	2600	2300
断熱温度上昇量 Q(t) ² C (t : 材齢)	—	40.0 · (1 - e ^{-0.8t})
圧縮強度 f _c '(t) (N/mm ²)	—	$\frac{t}{4.5 + 0.95t} f_{c,28}'$
引張強度 f _t (t) (N/mm ²)	—	0.44 f _c ^{0.5}
材齢 28 日の圧縮強度 f _{c,28}' (N/mm²)}	—	30
線膨張係数(1/C)	—	10 × 10 ⁻⁶
外気温(°C)	20 (一定)	
打込温度(°C)	20	

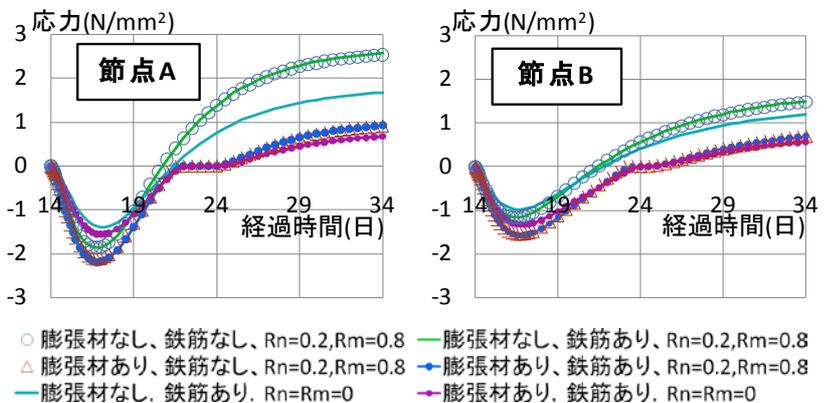


図-4 応力の経時変化

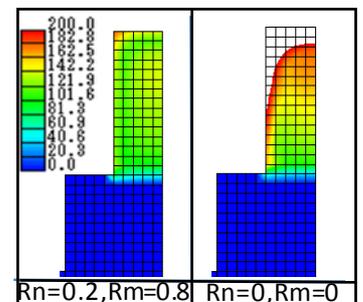
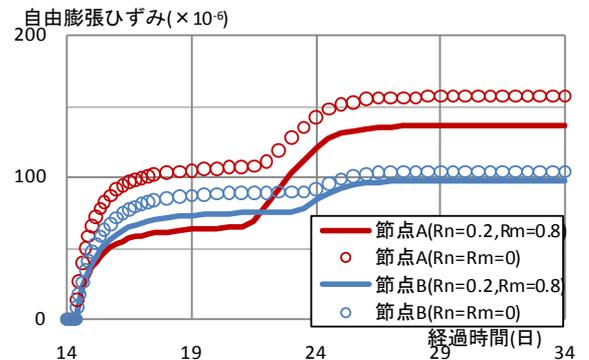


図-5 自由膨張ひずみの経時変化および分布