膨張材の効果を考慮したCP法に関する基礎的研究

名城大学　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工学協会温度応力委員会で提案された手法[1)]であり、土木学会コンクリート標準示方書において、ひび割れ指数を算定する手法として推奨されている。一方、近年では、膨張材の使用に対する効果を評価できる手法の構築が熟望視されている。しかし、CP方では、膨張材の効果を考慮することは極めて困難である。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法の基本的特質について数値解析的に検討を行った。

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してあると考える。なお、躯体は、平面保持の仮定に従い想定する。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により応力を簡便に評価する手法がCP法である。応力を算定する際、BB'で表わされるCompensation Plane(CP)を求める必要がある。**図-2**のような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。これらのひずみ分布を重ね合わせたときのCPの自由な軸ひずみを$\bar{\varepsilon}$、曲率を$\bar{\phi}$とする。この時、軸ひずみ増分、曲率増分は次式となる。

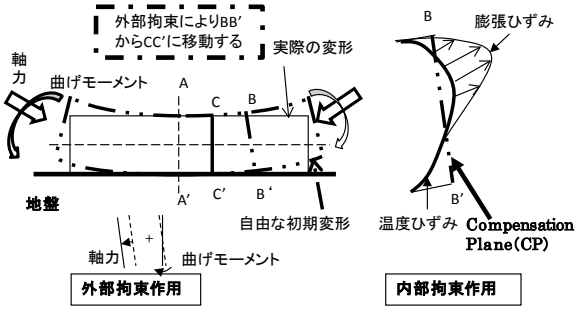

図-1　膨張材を含んだCP法の考え方

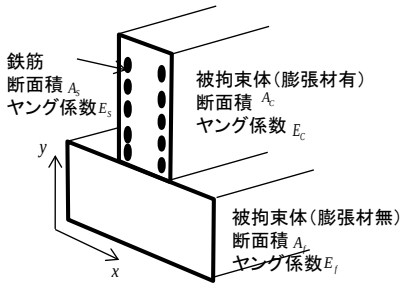

図-2　膨張材を含んだ断面モデル

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

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

ここで、y_gは図心位置である。$\Delta\sigma_{f(R)}$、$\Delta\sigma_{c(R)}$、$\Delta\sigma_{s(R)}$および内部拘束応力$\Delta\sigma_{f(I)}$、$\Delta\sigma_{c(I)}$、$\Delta\sigma_{s(I)}$は、式(1)、(2)および外部拘束係数R_n、R_mを用いて表現することが出来るが、その詳細は、割愛する。一方、断面応力増分$\Delta\sigma_f$、$\Delta\sigma_c$、$\Delta\sigma_s$は外部拘束応力と内部拘束応力の和として、次式で表わされる。

$$\Delta\sigma_f=\Delta\sigma_{f(I)}+\Delta\sigma_{f(R)},\Delta\sigma_c=\Delta\sigma_{c(I)}+\Delta\sigma_{c(R)},\Delta\sigma_s=\Delta\sigma_{s(I)}+\Delta\sigma_{s(R)} \quad (3)$$

一方、仕事量一定則によれば、単位体積当たりの膨張材の固有の膨張エネルギーU^{che}を用いて、膨張材領域の任意点にて次式が成立する[2)]。ただし、$\sigma_{c.o}$は前のステップの応力である。

$$\left\{\sigma_{c,o}+\Delta\sigma_c\right\}\Delta\varepsilon^{che}=-\Delta U^{che} \quad (4)$$

前のステップの$\Delta\varepsilon^{che}$を初期値とし、式(2)、(3)によって$\Delta\bar{\varepsilon}$、$\Delta\phi$を計算する。そして、式(4)が成立する。即ち、提案手法は自由膨張ひずみを予め、入力値で

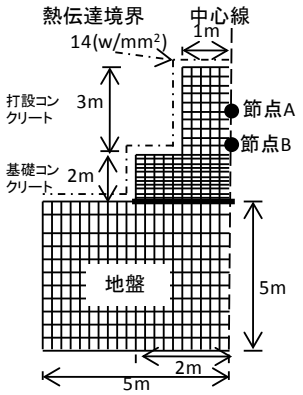

図-3　解析対象モデル

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打設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。なお、鉄筋は配置されていない。温度解析では解析モデル全体、CP 法では、基礎および打設コンクリート部分を解析対象とした。**表-1** に、解析に用いた熱特性値、材料特性値を示す。

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℃)	3	2.7
比熱(J/kg℃)	800	1100
密度(kg/m³)	2600	2300
断熱温度上昇量 $Q(t)$℃(t：材齢)	$42.0\cdot\left(1-e^{-0.8t}\right)$	
圧縮強度 $f_c'(t)$ (N/mm²)	$\frac{t}{4.5+0.95t}f_{28}'$	
引張強度 $f_t(t)$ (N/mm²)	$0.44f_c^{-0.5}$	
材齢 28 日の圧縮強度 f_{28}' (N/mm²)	30	
線膨張係数(1/℃)	10×10^{-6}	
外気温(℃)	20 (一定)	
打込温度(℃)	20	

外部拘束係数に関するケースとして、(Rn=0.0,Rm=1.0)、(Rn=0.5,Rm=1.0)、(Rn=1.0,Rm=1.0)の 3 ケース、膨張材混入量に関する解析ケースとして、膨張材混入量 20kg/m³、膨張材混入量 40 kg/m³、膨張材無しの 3 ケースを設定した。膨張材混入量 20 kg/m³ および 40 kg/m³ に対しては、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。

膨張材混入量 20 kg/m³　$U_{che}(t)=5.0\times10^{-5}\left(1-\exp(0.69(t-0.3)^{1.11}\right)(\mathrm{N/mm^2})$　(5)

膨張材混入量 40 kg/m³　$U_{che}(t)=5.0\times10^{-4}\left(1-\exp(0.69(t-0.3)^{1.11}\right)(\mathrm{N/mm^2})$　(6)

図-4 に提案した手法により得られた応力履歴を示す。どの外部拘束条件において、膨張材混入量 40 kg/m³ のケースでは、ケミカルプレストレスが十分に作用する結果となった。一方、膨張材混入量 20kg/m³ のケースでは、Rn=0.0 のケースのように比較的外部拘束が小さい場合、応力は膨張材なしのケースに比べ引張側に発生する傾向となったが、外部拘束が大きい場合、応力は、膨張材無しに比べ 0.4 N/mm² 程度圧縮側にシフトしている。

４．おわりに

膨張材混入量が 40 kg/m³ の場合、ケミカルプレストレスが生じるが、膨張材混入量が 20 kg/m³ の場合、外部拘束が小さくなるほど、膨張材によるひび割れ抑制効果は低減することが解析的に確認された。今後さらに検討を行いたいと考えている。

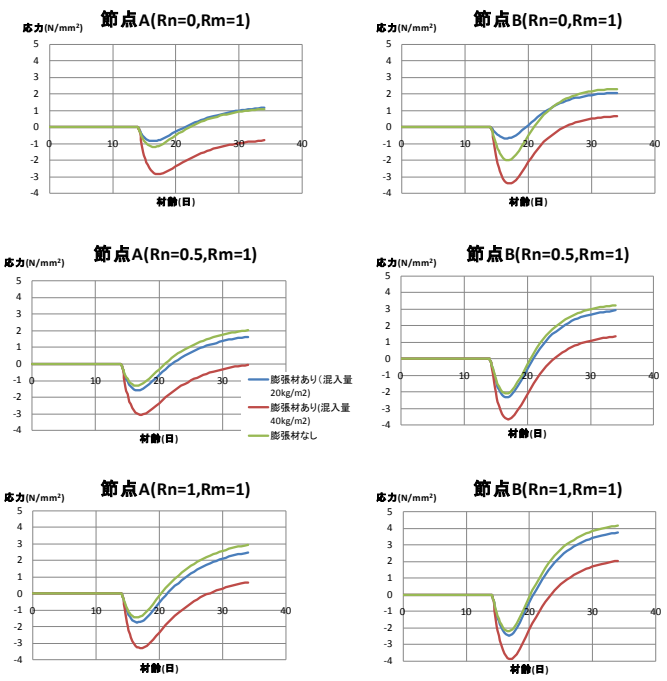

図-4 膨張材混入量および外部拘束の違いによる応力履歴の比較

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)　Ishikawa, Y. and Tanabe, T.: Theoretical development of CP method in predicting expansive concrete cracking, Proc. of the 7th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete Structures (FraMCoS-7),pp.398-404, Jeju, Korea, May23-28, 2010

3)　林陸太、石川靖晃：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