

エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線仕様プレテンション PC 桁製作時の温度管理に関する研究

琉球大学 正会員 ○富山 潤
 琉球大学 正会員 伊良波繁雄
 (株)ホープ設計 親泊 太一

1. 目的

本研究では、高耐久性プレテンション PC 桁の開発として、エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線を使用したプレテンション PC 桁（以下 EPC 桁と称す）の研究を行ってきた¹⁾。プレテンション PC 桁製作では、蒸気養生やセメントの水和発熱に伴いコンクリート中の温度が高温になる。このため、エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線を使用する場合は、高温によるエポキシ樹脂の軟化に起因したより線とコンクリートとの付着性能の低下を防ぐために、プレストレス導入時のコンクリート内の温度について ASTM A882/A882M-04a（内部充填型エポキシ被覆 7 本 PC 鋼より線標準規格）、米国プレストレスコンクリート協会（PCI）²⁾により 66℃以下にすることが明記されている。

コンクリート中の温度を管理するための方法としては、コンクリート中に温度センサーを埋め込んで管理する方法やコンクリートの温度特性から数値解析的に管理する方法が考えられる。本研究では、桁製作時の合理化を考え後者の検討を行う。

具体的には、蒸気養生下におけるプレストレス導入時期を数値解析的に予測するための 3 次元非定常熱伝導有限要素解析プログラムを作成し、実験結果と比較しプログラムの妥当性を検討した。

2. 水和熱を考慮した非定常熱伝導有限要素解析

水和熱を考慮した 3 次元非定常熱伝導方程式は次のようになる。

$$c\rho \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + k \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + H \quad (1)$$

$$H = \rho c \frac{T_{t+\Delta t} - T_t}{\Delta t} \quad (2)$$

ここで、 c は比熱 ($\text{kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C}$)、 ρ は密度 (kg/m^3)、 k は熱伝導率 ($\text{kcal/h} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C}$)、 T は温度 ($^\circ\text{C}$)、 t は時間 (hr)、 H は単位時間・単位体積当たりセメント水和発熱速度 ($\text{kcal/kg} \cdot \text{h}$) である。

また、式(1)を空間に関しては有限要素法（四面体要素）、時間に関してはクラנק - ニコルソンの θ 法 ($\theta = 1$) により離散化した。

温度解析を行うためには式(1)に関して、コンクリートの断熱温度上昇特性を用いて水和発熱速度 H を算出しなければならない。そこで本研究では簡易断熱温度上昇試験³⁾を行い断熱温度上昇量の近似曲線の推定を行った。また蒸気養生下でのコンクリートの熱伝達境界条件も必要となるため熱伝達率算定試験を行いコンクリート表面と鋼板表面との熱伝達率を算定した。

3. 断熱温度上昇試験・熱伝達係数算定試験

3. 1 簡易断熱温度上昇試験

図-1 に簡易断熱温度上昇試験の結果をもとにコンクリート標準示方書（施工編）に示された近似式(3)の係数を決定した。この近似式より式(2)の値が得られる。

$$Q(t) = Q_\infty (1 - \exp(-\gamma t)^s) \quad (3)$$

ここで、 $Q(t)$ ：断熱温度上昇量、 Q_∞ ：終局断熱温度上昇量、 γ, s ：温度上昇速度に関する定（実験により定まる定数）、 t ：材齢（日）である。

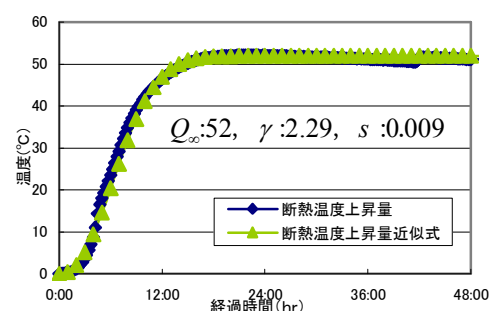


図-1 断熱温度上昇量曲線

3. 2 熱伝達係数算定試験

ここでは熱伝達率の算定結果を示す。実験は図-2 に示す一つの面を熱伝達境界条件としそれ以外は断熱条件とした型枠を製作し、熱伝達面から 1,3,7.5, 10,15,20,25,35,40cm の位置で温度を測定した⁴⁾。

キーワード エポキシ樹脂被覆鋼より線、高耐久プレテンション PC 桁、温度管理、有限要素法

連絡先 〒903-0213 沖縄県西原町字千原 1 番地 琉球大学工学部環境建設工学科 TEL 098-895-8649

熱伝達面はコンクリートと鋼板の 2 ケースとした。また、桁製作では蒸気養生を行うため、温度解析の外部温度として蒸気養生の蒸気温度をモデル化した。熱伝達率の算定は熱伝達率をパラメーターとした逆解析により行った。逆解析の結果、表-1 に示す値を得た。

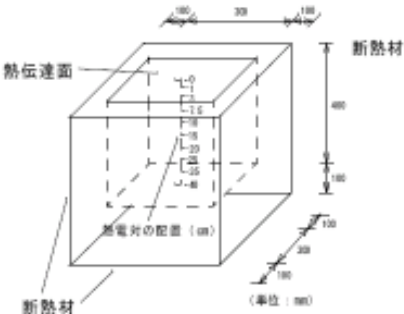


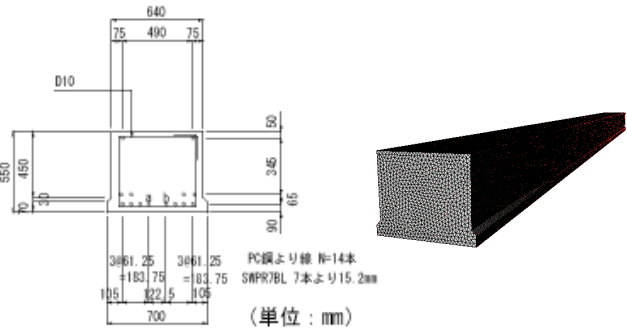
図-2 熱伝達率算定試験型枠

表-1 熱伝達率算定試験結果

熱伝達率 ($\text{kcal}/\text{h}\cdot\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}$)	コンクリート表面	鋼板表面
	18.0	9.0

4. 蒸気養生下における PC 桁の温度解析

ここでは温度解析により図-3 (a) に示す断面をもつ 12.5m 桁¹⁾の温度解析を行った。また、有限要素分割図を図-4 (b) に、解析に用いた表-1 以外の熱特性を表-2 に示す。なお、この値はコンクリート標準示方書より決定している。温度解析の評価箇所は、実験においてコンクリート内部の温度が特に高温になった a, b について行った。



(a) 断面図 (b) 要素分割図

図-3 設計断面と有限要素分割図

表-2 コンクリートの熱特性

密度 (kg/m^3)	熱伝導率 ($\text{kcal}/\text{h}\cdot\text{m}\cdot^\circ\text{C}$)	比熱 ($\text{kcal}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C}$)
2300.0	2.2	0.2

解析結果と実験結果の比較を図-5 に示す。b の結果については、a の結果とほぼ同じであったため今回は a の結果だけ示している。図よりプレストレス導入時期の予測については導入温度である 66℃付近での実測値とほぼ同じ値を示しているのがわかる。

この結果から今回作成した解析プログラムを用いた温度解析によりプレストレス導入時期の予測が可能であると考えられる。

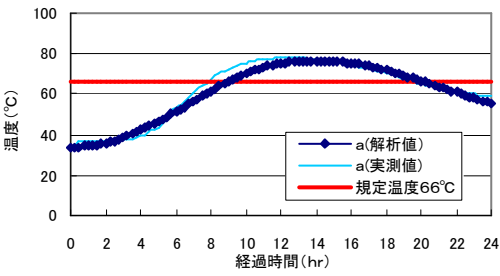


図-4 解析値と実測値との比較 (a)

5. まとめ

今回作成した解析プログラムを用いた温度解析によりプレストレス導入時期の予測が可能であることが示された。このことから、断面寸法・形状が異なる桁についても温度解析を行いプレストレス導入時期の予測が可能だと考えられる。

謝辞: 本研究は平成 20 年度(財)高橋産業経済研究財団の助成を受けた。また、研究を遂行する上で琉球大城武名誉教授、山口大学 吉武勇准教授に有益な助言を得た。桁製作においては沖縄ピーシー(株)、住友電工スチールワイヤー(株)に協力頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

(1) 富山潤, 他 3 名: エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線を用いたプレテンション PC 桁の耐荷性能に関する試験研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.523-58, 2008.

(2) PCI Ad Hoc Committee on Epoxy-Coated Strand: Guidelines for the Use of Epoxy-Coated Strand, PCI Journal, Vol.38, No.4, pp.26-32, July-August 1993.

(3) 吉岡慧, 他 4 名: 簡易試験による HVFA コンクリートの断熱温度上昇量の推定, 材料, Vol.57, No.5, pp.509-514, May, 2008.

(4) 遠藤友紀雄, 他 3 名: 蒸気養生下におけるコンクリートの諸特性について, コンクリート工学年次論文集, Vol.18, No.1, pp.1305-1310, 1996.