

若材齢時のコンクリート温度上昇にともなうポリエチレン製シースの挙動

川田建設(株) 正会員 ○中山 良直
 オリエンタル白石(株) 安田 聖晃
 山梨大学 正会員 博(工) 斉藤 成彦

Abstract : It is concerned that cracking due to cement hydration in concrete structures with polyethylene (PE) sheaths may occur according to the conditions of curing sequence and structural details, since the coefficients of expansion are different between PE sheath and concrete matrix at the early age of concrete. The experiment and thermal stress analysis for a mass concrete specimen arranged two types of PE sheaths were performed to investigate the occurrence of thermal cracking. No thermal cracking occurred in the experimental observation during several months. The strains of PE sheath predicted by the analysis agreed well with the test measurements along the circumferential direction. The modeling of the structural effects of sheath bellows was however required to accurately predict the strains along the longitudinal direction.

Key words : PE sheath , crack , temperature stress

1. はじめに

ポリエチレン(以下、PE)の線膨張係数($(110\sim 130)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)は、コンクリートの線膨張係数($10\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)に比べて1オーダー大きい。そのため、PEシースを配置したコンクリート部材で、水和熱による温度上昇や蒸気養生などの影響で温度変化が大きい場合、両者の膨張性の違いからコンクリートにひび割れが生じることが懸念される。そのことに着目した安全性確認試験が文献¹⁾で紹介されており、ひび割れの発生は見られなかったことが報告されているが、その試験は、縦締め用シースを配置した主桁部材と横締め用シースを配置した床版部材を想定しており、シース間隔が300mm、シースかぶりが45mmであった。そこで、シース間隔やかぶりがそれより小さい場合のひび割れ発生に対する安全性を確認するための実験を行うとともに、解析値と比較してその妥当性を検証した。

2. ひび割れ確認実験

2.1 供試体

供試体は、幅700mm×奥行き700mm×高さ1000mmの角柱のマスコンクリートとし、温度ひび割れに着目することから、水和熱による温度上昇を最大限に生じさせるため、全面(上下面、側面)を厚さ150mmの発泡スチロールで覆って断熱養生した。

シースは12S15.2用(内径80mm)で、図-1に示すように、道路橋示方書に示す場所打ち桁と同様にシース外径に対するあきを40mm、純かぶりを35mmとし、供試体の各側面(4面)に2本ずつ高さ方向に並列で配置した。シースの種類は、蛇腹形状の違いや材質(線膨張係数)の違いを比較するため、製造メーカーの異なる2種類のPEシース(PE1・PE2)と鋼製シース(ST1)とし、8本中の5本は中間をジョイントシースで接続した。

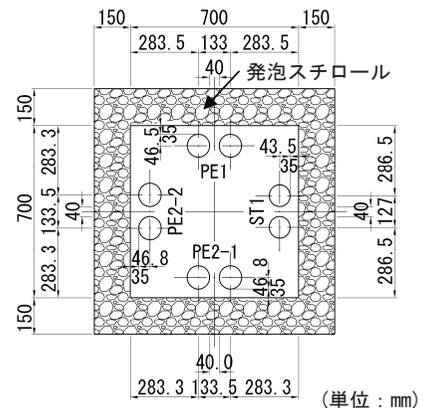


図-1 試験体シース配置

表-1 シース寸法 単位: mm

材質	名称	シース(ジョイントシース)	
		内径	外径
ポリエチレン製	PE1	80 (90.4)	93 (99.2)
ポリエチレン製	PE2	80 (91)	93.5 (99.5)
鋼製	ST1	80 (85)	87 (92)



図-2 シース概形

表-2 コンクリート配合

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブ (cm)	水セメント比 (%)	空気量 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)				
					水 W	セメント C(H)	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 AD2
20	12±2.5	38	4.5±1.5	42.5	150	395	759	1048	3.16

2.2 使用材料

使用したシースの寸法を表-1に示す。シースは、図-2に示すような蛇腹形状で、肉厚は3mm程度であるが5mm程度の波がらせん状に形成されている。

コンクリートの配合は表-2に示すとおりで、早強ポルトランドセメントを用い、設計基準強度 $f_{ck} = 50\text{N/mm}^2$ とした。なお、材齢28日のテストピース強度は 74.5N/mm^2 であった。

2.3 実験結果

コンクリート温度の計測値は、図-3に示すように、最高温度が各測点(計測箇所を図-8に表示)とも約70℃で、ほぼ4週間かけて外気温の10℃になった。

シースのひずみは、長さ3mmのプラスチック用ゲージをリブの頂部に貼り付けて計測し、シースとゲージの線膨張係数差を温度補正式で補正した。PEシースの鉛直方向ひずみ(PE1-VD, PE2-1VD, PE2-2VD)は図-4のとおりで、鋼製シースひずみ(ST1-VD)の約10倍(PEシースひずみは左縦軸、鋼製シースひずみは右縦軸)で、鉛直方向ひずみの最大値は、PEシースと鋼製シースの線膨張係数をそれぞれ $160\mu/\text{C}$ および $10\mu/\text{C}$ としたときの60℃の温度上昇による膨張ひずみ $9,600\mu$ および 600μ とほぼ対応する。

PEシースの円周方向ひずみは鉛直方向ひずみの約半分である。なお、鋼製シースの円周方向ひずみ(ST1-HD)は図-5のとおりで、5日までのデータが大きく変動しているが、ゲージの絶縁不良が原因と考えられる。

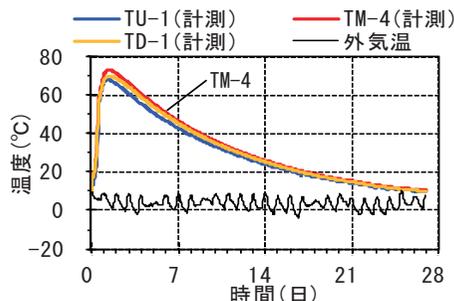


図-3 コンクリート温度の計測値

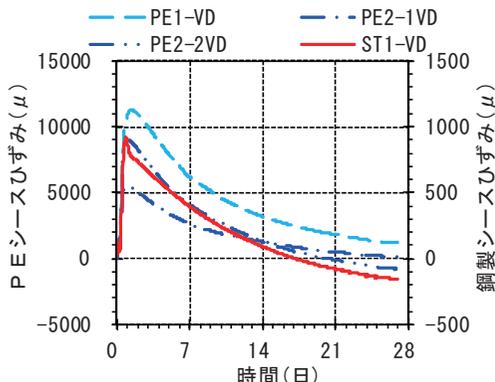


図-4 シースひずみの計測値(鉛直方向)

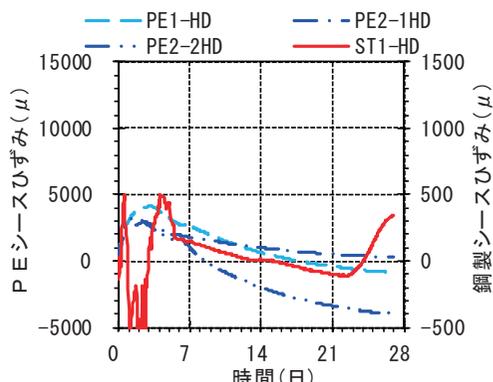


図-5 シースひずみの計測値(円周方向)

脱枠直後(材齢29日)・脱枠1週間後・2週間後・3週間後に表面をアセトンで拭いて目視観察を行ったが、ひび割れ発生は認められなかった。

3. 温度応力解析

3.1 解析条件

温度応力を、有限要素法による3次元温度応力解析専用ソフトで解析した。

解析モデルを図-6に示す。PEシースと鋼製シースは、蛇腹をモデル化すると要素数が膨大になるため、ソリッドモデルで正12角形の円筒管状にモデル化(ジョイントシースはモデル化せず)し、解析用のシース厚は、表-3のように設定した。

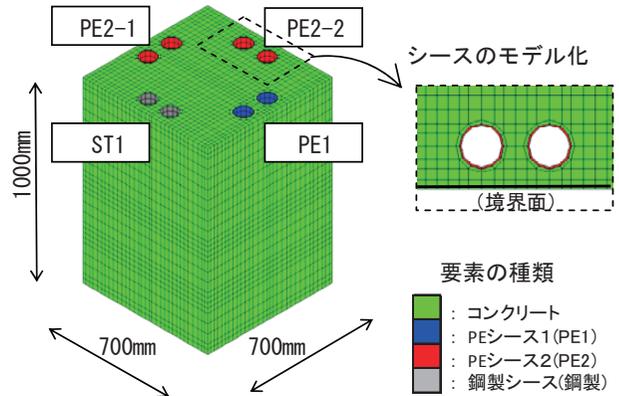


図-6 解析モデル

熱物性条件は表-4に示すとおりで、コンクリートの発熱と強度・ヤング係数の発現は、土木学会の方法²⁾で解析ソフト内で計算した。PEシースのヤング係数は高温で軟化する熱依存性があるが、解析では常温時の1,070N/mm²としたので、高温時期は実際よりもPEシースの影響度をやや大きく評価している。温度境界条件は表-5に示すとおりで、コンクリート表面の雰囲気温度は10°C一定、シース内の温度は図-7のようなシース内温度の計測値を用いた。

表-3 シース厚

項目	単位	PEシース		鋼製シース	備考	
		PE1	PE2			
単位長さ重量	w	kg/m	0.73	0.83	1.06	
単位体積重量	r	kg/m ³	957	957	7,797	
シース厚	t	mm	3.0	3.5	0.5	$t = w / (r \times \phi \pi) \times 10^3$

表-4 熱物性条件

項目	単位	コンクリート	PEシース	鋼製シース	備考
熱伝導率	W/m°C	2.7	0.3	51.3	
密度	kg/m ³	2,400	956	7,850	
比熱	kJ/kg°C	1.15	2.5	0.47	
初期温度	°C	16.5	9.2	9.2	計測値
ヤング係数	N/mm ²	JSCE2012	1,070 ^{**}	200,000	^{**} 常温23°Cでの値
ポアソン比	-	0.2	0.41	0.3	
線膨張係数	$\mu / ^\circ\text{C}$	10	160	10	

表-5 温度境界条件

項目	単位	コンクリート表面	PEシース内面	鋼製シース内面
熱伝導率	W/m ² °C	0.261 ^{**}	6	6
温度	°C	10	図-7 参照	

※全面とも、厚さ150mmの発泡スチロールで断熱養生
 $\eta = 1 / (1 / \beta + d / \lambda) = 1 / (1 / 13 + 0.15 / 0.04) = 0.261$
 β : 外気に触れる面の熱伝導率=13W/m²°C
 d : 養生材の厚さ=0.15m, λ : 熱伝導率=0.04W/m°C

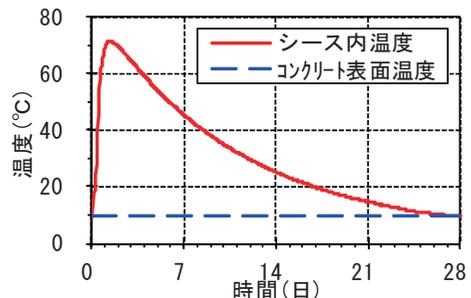


図-7 解析用温度条件

3.2 解析結果と計測値の比較

(1) コンクリート温度

コンクリートの解析最高温度のコンターを図-8に示す。主要計測点の温度の経時変化は図-9のとおりで、最高温度・昇降温度勾配は計測値と解析値がほぼ一致しており、コンクリートの断熱温度上昇・温度境界条件が妥当だったと考えられる。中央部と周辺部が最高温度に到達した時期については、計測値に比べて解析値のほうが0.3~0.5日(8~12時間)程度遅かった。

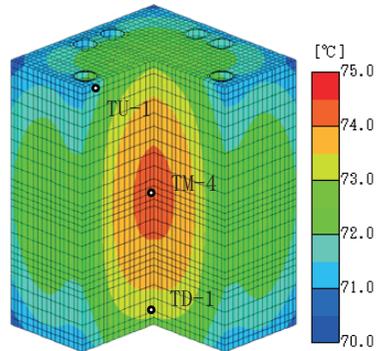


図-8 コンクリート最高温度

(2) シース全ひずみ

シースの解析全ひずみについて、上縁から500mmの位置のシース4面(図-10の①~④で、②は隣接シースとのあき側、③はかぶり側)の円周方向と鉛直方向の最大全ひずみを抽出すると、図-11と図-12のとおりである。

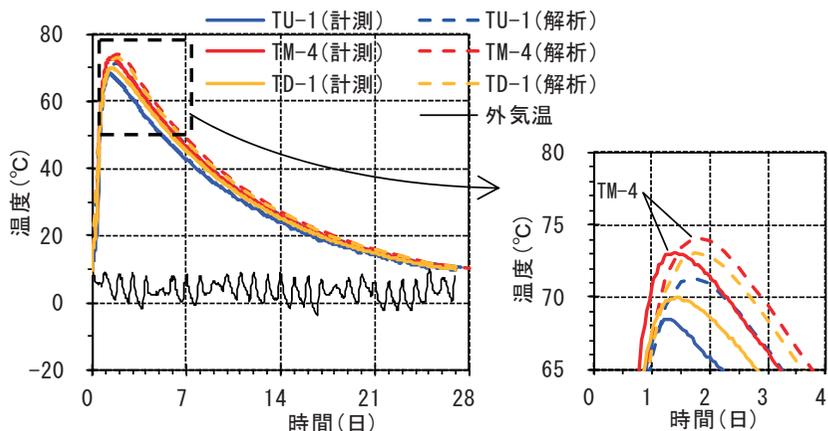


図-9 温度の経時変化

鋼製シースは、円周方向と鉛直方向の4面とも最大全ひずみは同程度(約600 μ)であるが、PEシースは、円周方向(2,400~3,000 μ)が鉛直方向(700~800 μ)の約3.5倍である。なお、円周方向・鉛直方向どうしで比べると、①から④で大きな違いはない。

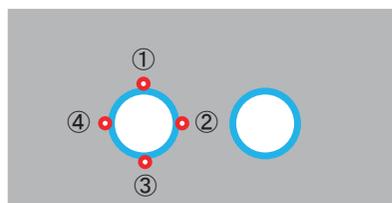


図-10 シースのひずみ抽出箇所

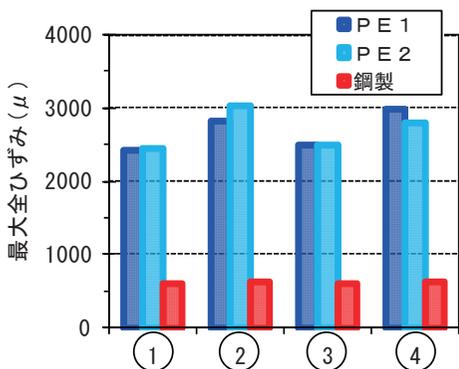


図-11 解析最大全ひずみ(円周方向)

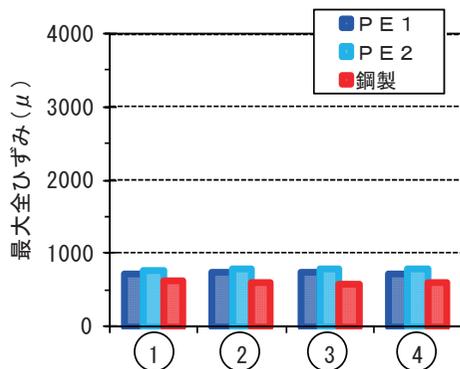


図-12 解析最大全ひずみ(鉛直方向)

(3) シース弾性ひずみ

ひずみには、図-13に示すように、温度ひずみ・弾性ひずみ・全ひずみの3種類があり、解析では各ひずみが計算される。今回の実験では外力を作用させていないので、外的要因はコンクリートの拘束力のみである。

計測ではシースの全ひずみを測っているが、3種類のひずみには次式の関係性があるので、全ひずみから温度ひずみを差し引くことで弾性ひずみを導出できる。温度ひずみはシース温度の上昇量に線膨張係数を乗じることで算出できるが、ここでは解析値を用いて弾性ひずみを算出した。

$$\text{全ひずみ} (\epsilon_s) = \text{温度ひずみ} (\epsilon_t) + \text{弾性ひずみ} (\epsilon_e)$$

$$\epsilon_t = \text{線膨張係数} (K) \times \text{温度上昇量} (T)$$

円周方向と鉛直方向のひずみの解析値と計測値の比較は、図-14と図-15に示すとおりで、円周方向弾性ひずみは概ね合っているが、鉛直方向弾性ひずみの計測値は解析値の0.2~0.5倍で、解析は過大評価になっている。なお、鉛直方向の計測弾性ひずみが小さいのは、蛇腹形状のために変形してひずみが蓄積されにくいためと推察される。そのため、鉛直方向は全ひずみが大きく、計測ではそれが円周方向の約2倍であった。

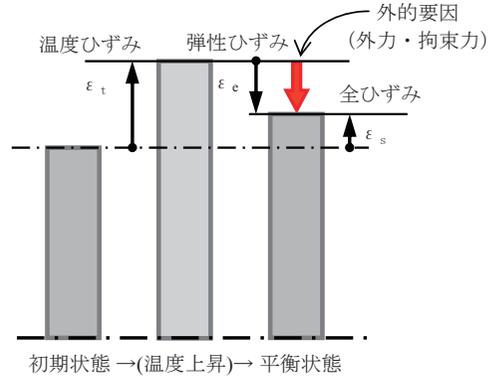


図-13 ひずみの関係性

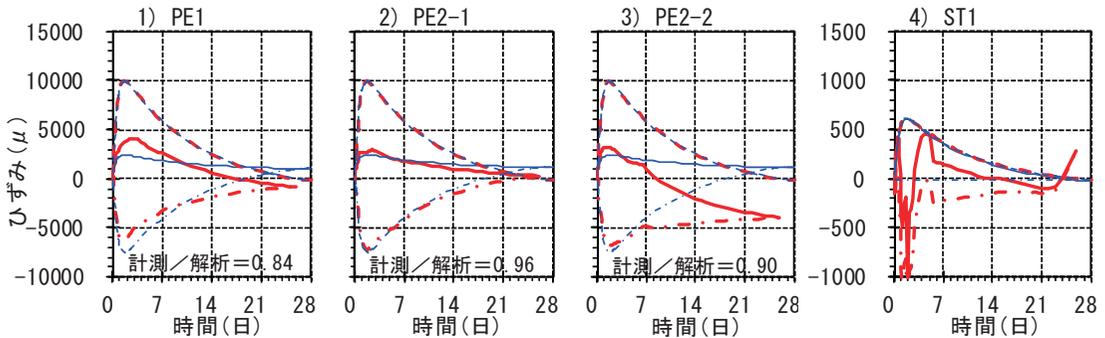


図-14 円周方向ひずみの比較

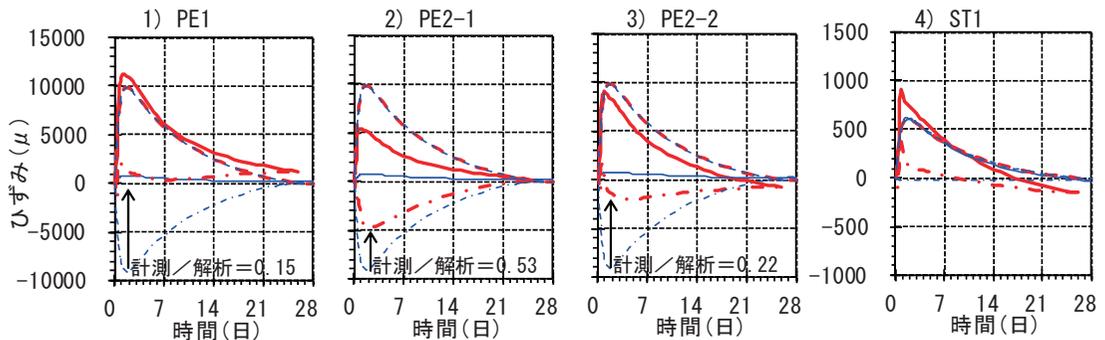


図-15 鉛直方向ひずみの比較

— 計測全ひずみ — 解析全ひずみ
- - - 計測温度ひずみ - - - 解析温度ひずみ
- · - · 計測弾性ひずみ - · - · 解析弾性ひずみ
 (計測温度ひずみは、解析温度ひずみと一致)

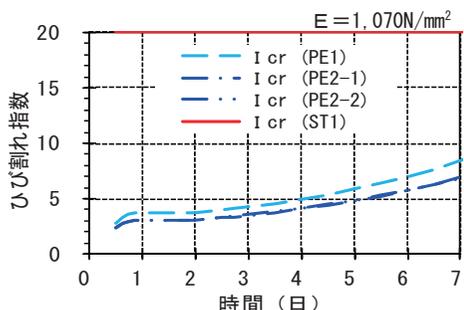


図-16 ひび割れ指数 (円周方向)

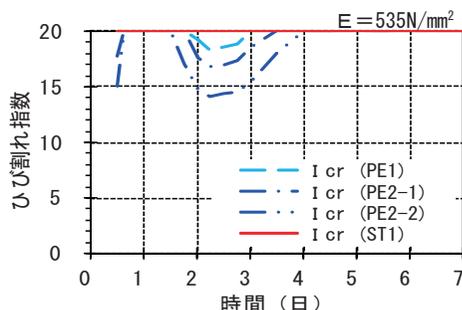


図-17 ひび割れ指数 (鉛直方向)

4. ひび割れ指数の解析

PE シースの弾性ひずみはコンクリートの拘束で発生し、PE シースが受ける圧縮力とコンクリートが受ける引張力は釣り合うので、鉛直方向に関しては、実際にコンクリートが受ける引張力は解析の0.2~0.5倍程度であると推測される。これは解析では蛇腹の影響をモデル化していないことが原因と考えられ、ここでは、蛇腹をモデル化する代わりにPE シースのヤング係数を低減してPE シースの影響を小さくすることとし、PE シースのヤング係数を $E = 1,070\text{N/mm}^2$ で解析した円周方向ひび割れ指数を図-16、 $1/2$ の $E = 535\text{N/mm}^2$ で解析した鉛直方向ひび割れ指数を図-17に示す。ヤング係数を $1/2$ にすることで、PE シースの解析ひずみは変わらないが、PE シースが受けた圧縮力およびコンクリートが受けた引張力が半減した評価になったと考える。

ひび割れ指数が小さいのはPE シースの円周方向で、材齢1日以降で $I_{cr} = 3.0$ であるが、ひび割れ発生確率を次式²⁾から算出すると $P = 0.6\%$ で、確率的には非常に小さい値である。

$$\text{ひび割れ発生確率： } P (\%) = [1 - \exp\{- (I_{cr}/0.92)^{-4.29}\}] \times 100$$

鉛直方向に関しては、コンクリートひずみを実測して解析値と比較する等でモデル化の妥当性を検証する必要があるが、ひび割れが発生する確率は円周方向よりもさらに小さいと思われる。

5. おわりに

マスコンクリート部材を供試体とし、断熱温度上昇を生じさせた実験を行って、コンクリートの温度やシースのひずみを計測するとともに、ひび割れ発生の有無を目視観察し、以下が判明した。

- ・ 供試体のコンクリート温度は約70℃まで上昇したが、最小限の配置間隔とかぶりでも、ひび割れの発生は認められなかった。
- ・ 円周方向ひずみは計測値と解析値がよく一致するが、鉛直方向ひずみについてはシースの蛇腹形状を考慮した評価が必要である。
- ・ PE シースのひび割れ指数を、シースの蛇腹形状をモデル化せずヤング係数を半分に低減したモデルで解析した結果、ひび割れ発生確率としてはとくに問題にならない程度であった。

謝辞

本実験は、プレストレストコンクリート工学会の「PE シース設計施工指針作成検討委員会 (委員長・長岡技術科学大学 下村匠教授)」の活動に関連して実施したものです。本実験に際して貴重なご助言を頂いた委員諸氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) プレストレスト・コンクリート建設業協会：「ポリエチレン製シース実用化試験報告書」, pp.28-30, 1995.9.
- 2) 土木学会：「コンクリート標準示方書 2012年制定」[設計編：標準], 6編