論文 マス養生温度履歴下における膨張コンクリートの応力評価手法

三谷 裕二*1・谷村 充*2・松本 健一*1・佐竹 紳也*3

要旨:インバー鋼材を配した一軸拘束供試体にマスコンクリート様の温度履歴を与える試 験を行い,収縮補償用程度に膨張材を混和したコンクリートの温度応力低減効果を評価し た。また,鋼材ひずみと拘束鋼材比の関係に,力の釣合いとひずみの適合条件に基づく関 係式を適用して見かけのヤング係数を定式化し,それを用いた温度上昇~降下過程におけ る応力評価法について検討した。その結果,温度上昇過程に生じる圧縮応力の増加分は温 度降下後も明らかに残存すること,さらに,提示した応力評価法により,マス養生温度履 歴を受ける膨張コンクリートの圧縮~引張応力挙動を概ね良く評価できる可能性を示した。 キーワード:マスコンクリート,膨張コンクリート,拘束応力,評価法

1. はじめに

近年,膨張材をマスコンクリートに適用する ことによる温度ひび割れ低減効果を解析的に評 価する試みが増えている。その一方で,マスコ ンクリート様の温度履歴を受けた膨張コンクリ ートの膨張・収縮ひずみ,ヤング係数,クリー プ特性の温度依存性に関する知見は少なく,解 析精度を高める上で課題となっている。

この点について,筆者らはこれまでに,収縮 補償用程度に膨張材を混和したコンクリートを 対象に,PC 鋼材を用いた一軸拘束試験を種々 の温度下で行い,拘束膨張ひずみと拘束鋼材比 の関係より,見かけの膨張ひずみおよび見かけ のヤング係数を抽出する手法を提示し,さらに, 各々の温度依存性を考慮した膨張応力の算定手 法を提示した¹⁾。しかしこの場合には,線膨張 係数がコンクリートとほぼ等しい PC 鋼材を用 いているため,実際的な温度応力を含んだ状態 での検証が課題として残っていた。

そこで本研究では,線膨張係数が無視できる 程度に小さいインバー鋼材を配した一軸拘束供

試体にマス養生温度履歴を与えるこ とにより,温度上昇~温度降下まで の領域における膨張コンクリートの 温度応力低減効果を実験的に評価し

*1 太平洋セメント(株)	中央研究所	工修	(正会員)
*2 太平洋セメント(株)	中央研究所	工博	(正会員)
*3 太平洋マテリアル(株)	開発研究所	工修	(正会員)

た。さらに,インバー鋼材のひずみと拘束鋼材 比の関係を基に,これまで検討できなかった温 度降下過程における見かけのヤング係数を定め, 温度上昇過程を対象としていた既往の研究成果 ¹⁾と組み合わせることにより,温度履歴下にお ける膨張コンクリートの応力評価法を拡張した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

表 - 1 に使用材料,表 - 2 にコンクリートの 配合を示す。水/(セメント + 膨張材)比は 55% とし,普通セメントに石灰系膨張材を 30kg/m³ 混和した一般的な膨張コンクリート(NE),お

表 - 1 使用材料

材料	記号	物理的性質など		
セメント	С	普通ホ ゚ルトランドセメント / 密 度:3.16g/cm ³ , 比表面積:3310cm²/g		
膨張材	EX	石灰系膨張材 / 密度: 3.14g/cm3		
細骨材	S	御前崎産陸砂 / 表乾密度:2.59g/cm ³ , 吸水率:1.63%		
粗骨材	G	岩瀬産砕石 / 最大寸法:20mm , 表乾 密度:2.64g/cm ³ , 吸水率:0.84%		
高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系 / 密度:1.09g/cm ³		

表-2 コンクリートの配合

配合	スランプ	空気量	W/B	s/a	s/a 単位量 (kg/m ³)					
	(cm)	(%)	(%)	(%)	W	С	EX	S	G	SP
NE	15 ± 2.5	4.5 ±	55	47	175	288	30	830	951	0.636
NP		1.5	55		175	318	-	830	951	0.636

よび比較用として膨張材無混和の コンクリート(NP)を用いた。 2.2 供試体の作製および測定方法 本試験では,温度ひずみを伴う

状態での膨張材の効果を評価する ため,線膨張係数が無視できる程 度に小さいインバー鋼を配した一

軸拘束供試体を作製した。インバー鋼の線膨張 係数およびヤング係数は,メーカーの公称で 0.5×10^{-6/} および 140000N/mm²である。

図 - 1 に供試体の形状, 寸法を示す。拘束鋼 材比は 0.7, 1.7, 5.7%の 3 水準とし, それぞ れ PC 鋼棒の呼び名 9.2mm, 15mm および 26mm と同じねじ仕様となるように加工した インバー鋼棒と同じインバー鋼製の拘束端板を 溶接し、一体化した。インバー鋼棒のひずみは、 鋼棒軸方向の対象面に設けた幅 4mm,長さ 800mm のねじ切削面の中央部に貼付したひず みゲージを用いて測定した。ただし,拘束鋼材 比 1.7%のものについては,インバー鋼棒の定 着長を確認するために,中央から片側 400mm の区間において 50mm 間隔でひずみゲージを 貼付した。なお,各々のひずみゲージについて は,鋼材に貼付した状態で温度変化を与えるこ とにより,ゲージの指示値と温度の関係式を求 めておき,温度変化に伴うゼロ点移動を補正し た。

2.3 養生方法

コンクリートの練混ぜおよび打込みは 20 相対湿度 80%の試験室内で行い,ブリーディ ングがほぼ終了するまで静置した後,仕上げ面 にポリエステルフィルムを被せ,さらにその上 を湿布で覆った状態で,所定の温度履歴を生じ るようにプログラムした恒温槽内に投入した。 恒温槽内の温度履歴には,JCI マスコンクリー ト委員会報告書²⁾に示されている壁状構造体 (高さ 2000mm,幅 1800mm)の 2 次元 FEM 温度解析より求めた断面中央の中層(高さ 1000mm)位置における温度履歴を設定した。







なお,材齢1日の時点において,供試体を一 度恒温槽から取り出し,脱型および供試体の全 面をアルミ箔粘着テープでシールした後,速や かに恒温槽内に戻した。

3. 実験結果

3.1 供試体内部の温度履歴

図 - 2 に供試体中心部の温度計測結果を示す。 供試体温度は,材齢 1.5 日付近で約 63 に達 した後,20 まで徐々に降温する履歴を示した。 3.2 インバー鋼棒の定着長の確認

図 - 3 に,拘束鋼材比 1.7%における,鋼材 中央からの距離と鋼材ひずみの関係を示す。鋼 材端部から鋼材ひずみがほぼ一定となるまでの 長さ(定着長)は 15~20cm 程度となっており, 本試験で採用した供試体は,定着長の面で十分 な長さが確保されている。以下の考察では鋼材 中央部のひずみを用いる。

3.3 長さ変化特性

図 - 4 に鋼材ひずみと材齢(注水時を原点) の関係を示す。また,図 - 5 に温度上昇過程に おける鋼材ひずみと拘束鋼材比の関係の経時変 化を示す。膨張材を混和した NE の拘束膨張ひ ずみは,膨張材無混和の NP と比較して,拘束 鋼材比 0.7,1.7,5.7%に対して,それぞれ約 2.1 倍,1.9 倍および 1.6 倍であった。また,鋼 材ひずみと拘束鋼材比には,下に緩やかに凸の 曲線的な関係が見られ,PC 鋼材を用いた既往 の実験結果と同様の傾向となった¹⁾。

図 - 6 は温度降下過程における拘束収縮ひず みの経時変化を示す。温度降下域における NE と NP の差は温度上昇域よりも明らかに小さく, 両者はほぼ同様の収縮挙動を示している。すな わち,膨張材の有無による違いは,膨張材の反 応が活発な温度上昇過程において大きく生じる が,一旦硬化体の組織が形成された後は,通常 の温度降下域で見られる温度収縮ひずみに依存 した挙動を生じると考えられる。





図 - 7 に鋼材とコンクリートの力の釣合いよ り算出した拘束応力の経時変化を示す(引張を 正,圧縮を負)。また,図 - 8 には NE と NP の拘束応力の差の経時変化を示す。この拘束応 力の差は,膨張材によってもたらされた温度応 力の低減効果分とみなすことができる(以下, 膨張応力)。膨張応力の最大値(圧縮)は,拘 束鋼材比 0.7,1.7,5.7%に対して,それぞれ約 0.26,0.44,0.60N/mm²を生じ,その大きさは 温度降下域においてもほぼ保持されている。す なわち,膨張材によって温度上昇過程に生じる 圧縮応力は温度降下後も残存しており,引張応 力の低減に明らかな効果を有している。

 実測値に基づく見かけのヤング係数の検討 筆者らはこれまで,PC 鋼材を用いた一軸拘 束試験結果より,見かけのヤング係数の定め方 を検討した¹⁾。ただし,この PC 鋼材を用いた 試験では,温度応力の検出ができないため,温 度上昇過程における膨張材起源の膨張応力に対 する検討に限られていた。そこで本章では,イ ンバー鋼を用いた本実験結果より,温度降下過 程も含め,膨張応力と温度応力の両者の作用を 受けた状態の,見かけのヤング係数の発現性状 について検討する。

図 - 9に見かけのヤング係数の算出方法の概 要を示す。図 - 5に示した鋼材ひずみと拘束鋼 材比の曲線関係に,力の釣合いおよび鋼材とコ ンクリートのひずみの適合条件に基づく関係式 (1)を当てはめることにより,式中の未知数 である見かけのヤング係数を定めることとした。 この見かけのヤング係数は,時々刻々と変化す る拘束応力による弾性ひずみとクリープひずみ の双方が考慮されたヤング係数と見なすことが できるものである。

ここで,式(1)中の見かけの膨張ひずみ (_{cfa})は式(2)より得られるものであり, 膨張材起源のひずみ成分として位置づけた。式 (2)は温度ひずみ成分を取り除くために NE と NP の鋼材ひずみの差と拘束鋼材比の関係よ り,見かけの膨張ひずみと見かけのヤング係数 を定めており,PC 鋼材を用いた実験に対応す るものである。また,温度ひずみ成分の影響の みを受ける NP の見かけのヤング係数は式 (1)の見かけの膨張ひずみをゼロとすること により求めることとした。

 $\Delta \varepsilon_s(t_i) = \{ (\Delta \varepsilon_{cfa}(t_i) + (\alpha_c - \alpha_s) \Delta T(t_i) \} / \{ 1 + p \cdot E_s / E_{ca}(t_i) \}$ (1)

$$\Delta \varepsilon_{ex}(t_i) = \Delta \varepsilon_{cfa}(t_i) / \{1 + p \cdot E_s / E_{ca}(t_i)\}$$
(2)

ここに, $\Delta \varepsilon_{s}(t_{i})$:ステップ t_{i} での鋼材ひず みの変化量, $\Delta \varepsilon_{cfa}(t_{i})$:ステップ t_{i} での見かけ の膨張ひずみの変化量, α_{c} :コンクリートの 線膨張係数(10×10^{-6} /), α_{s} :インバー鋼材 の線膨張係数(0.5×10^{-6} /), $\Delta T(t_{i})$:ステッ プ t_{i} での温度変化量(), p:拘束鋼材比, E_{s} :インバー鋼のヤング係数(140000N/mm²), $E_{ca}(t_{i})$:ステップ t_{i} での膨張応力と温度応力の 両者の作用を受けた場合の見かけのヤング係数



(2)は温度ひずみ成分を取り除くために,NE図-10見かけのヤング係数と有効材齢の関係

 $(N/mm^2), \Delta \varepsilon_{ex}(t_i) : ステップ t_i での拘束膨$ 張ひずみ (NE と NP のひずみ差)の変化量, $<math>E_{ca}(t_i) : ステップ t_i での膨張応力の作用を受け$ た場合の見かけのヤング係数 (N/mm²)

図 - 10 に上記の方法より算出した見かけの ヤング係数と式(3)で表される有効材齢の関 係を示す。図中には,既往の PC 鋼材を用いた 実験による見かけのヤング係数¹⁾,および別に 円柱供試体(100×200mm)より測定したヤ ング係数と有効材齢の関係を併記する。

$$t_{e} = \sum_{i=1}^{n} (T_{i} + 10) \cdot \Delta t_{i} / 30$$
 (3)

ここに, t_e :有効材齢, Δt_i :温度が T_i である 期間

まず,NE と NP の見かけのヤング係数を比 較すると,温度上昇過程においては,NE で約 3000N/mm²,NP で約 7000N/mm²であり,膨張 材を混和した場合が,無混和の約 50%に小さ くなったが,温度降下過程においては両者とも に 15000~25000 N/mm²であり,ほぼ同様とな った。また,温度上昇過程において,式(1) による膨張応力と温度応力の両者の影響を受け た場合の見かけのヤング係数と式(2)による 膨張応力のみを受けた場合のものを比較すると, 大差ないことが分かる。すなわち,見かけのヤ ング係数には膨張材混和の影響が卓越して表れ ている。

次に,NE について,見かけのヤング係数と 円柱供試体によるヤング係数を比較すると,後 者に対する前者の比は,温度上昇過程において 0.2~0.4 程度,温度降下過程において 0.7~0.9 程度である。温度応力解析で用いるクリープの 影響を考慮したヤング係数の補正係数について, コンクリート標準示方書³⁾では材齢 3 日まで 0.73,材齢 5 日以降 1.0,また,ひび割れ制御 指針⁴⁾では温度上昇過程において 0.36~0.5, 温度降下過程において 0.63~0.67 としている。 これらと本研究による値を比較すると,ひび割 れ制御指針により近い結果であるが,膨張コン クリートでは,温度上昇過程の補正係数をより 小さく設定する必要があると考えられる。

5. 応力評価法の検討

以下では,見かけのヤング係数と見かけの膨 張ひずみを用いた温度履歴下における応力評価 法を検討する。

5.1 応力評価法の概要

図 - 11 に応力算定のフローを示す。見かけ のヤング係数については、図 10 の傾向より, 図 - 12 に示すように膨張材の作用がほぼ頭打 ちになる有効材齢2日を境界として2区間に分 け,それぞれ定式化した。有効材齢2日以前に ついては、PC 鋼材を用いた既往の実験より得 られた関係式を用いた¹⁾。また、膨張材無混和 の NP については、本試験より算出した見かけ のヤング係数について、NE と同様の式で回帰 し、関係式を定めた。有効材齢2日以降は温度 降下過程に対応しており、NE および NP とも に有効材齢2日における見かけのヤング係数を 固定した上で、本試験より得られた見かけのヤ ング係数を回帰し、関係式を定めた。



一方,温度履歴下における見かけの膨張ひず

みは,筆者らの既往の報告より¹⁾,任意の一定 温度下における見かけの膨張ひずみ曲線を重ね 合わせる方法を用いて算定した。

以上の温度依存性を考慮した見かけの物性値 を用い,式(4)より拘束応力(。)を算出す る。なお,応力解析において,見かけの膨張ひ ずみおよび見かけのヤング係数の発生原点は凝 結始発とし,既往の実験結果より¹⁾,有効材齢 0.227 日と定めた。

$$\sigma_c = E_s \cdot p \cdot \sum_{i=1}^n \left[\left\{ \Delta \varepsilon_{cfa}(t_i) + \Delta \varepsilon_{Ta}(t_i) \right\} / \left\{ 1 + p \cdot E_s / E_{ca}(t_i) \right\} \right] \quad (4)$$

5.2 解析結果および考察

図 - 13 に,拘束応力の実測値と,上記の方 法により求めた計算値を比較して示す。これよ り,NE および NP ともに,全ての拘束鋼材比 において,温度上昇~温度降下過程における拘 束応力の挙動を概ね良く評価できている。

今後は膨張コンクリートを用いた実マスコン クリート体の応力解析に本評価法を取り入れ, 適用性の検証を進める予定である。

6.まとめ

以下,本研究から得られた知見を示す。

- (1) 温度上昇過程において膨張材の作用により
 生じた圧縮応力の増加分は温度降下後も残存する。
- (2) 膨張材の反応が活発な温度上昇過程における膨張コンクリートの見かけのヤング係数は,膨張材無混和コンクリートと比較して

約 50%に小さくな るが,温度降下過 程においては,膨 張材の有無に拘わ らず,ほぼ同様で あった。

(3) 見かけのヤング係 数と見かけの膨張 ひずみを用いた応 力評価法により、 マス養生温度履歴を受けた膨張コンクリー トの圧縮~引張応力挙動を概ね良く評価で きる可能性を示した。

参考文献

- 三谷裕二,谷村充,佐久間隆司,佐竹紳 也:膨張コンクリートのマス養生温度履歴 を考慮した膨張応力算定法,コンクリート 工学年次論文集,Vol.27,No.1,pp.1141-1146,2005.6
- 2) 日本コンクリート工学協会,マスコンクリ ートソフト作成委員会報告書,pp.124-126, 2003.11
- 3) 土木学会,2002 年制定コンクリート標準示 方書[施工編],pp.289-290,2002.3
- 4) 日本コンクリート工学協会,マスコンクリ ートのひび割れ制御指針,pp.67-70,1986



