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「)。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

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	普通ポルトラント゚セメント/密度:3.16g/cm³, 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/cm³,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/cm³				

表 - 2 コンクリートの配合

配合	スランフ [°]	空気量	W/B	s/a	単位量 (kg/m³)						
	(cm)	(%)	(%)	(%)	W	C	EX	S	G	SP	
NE	15 ±	4.5 ±	55	47	175	288	30	830	951	0.636	
NP	2.5	1.5	55	47	175	318	•	830	951	0.636	

^{*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)

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 $140000 N/mm^2$ 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。

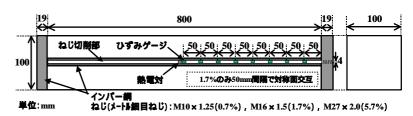


図 - 1 インバー鋼を配した一軸拘束供試体

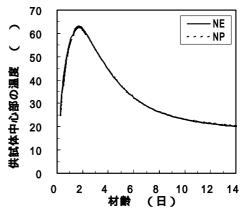


図 - 2 供試体中心部の温度履歴

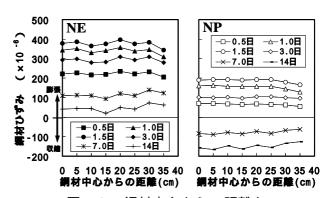


図 - 3 鋼材中心からの距離と 鋼材ひずみの関係

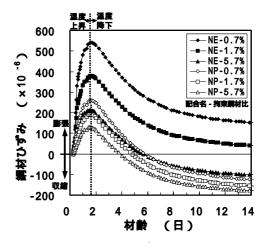


図 - 4 鋼材ひずみの経時変化

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。

3.4 拘束応力

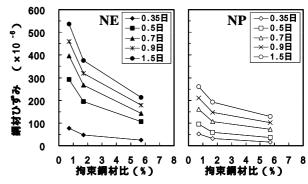


図 - 5 鋼材ひずみと拘束鋼材比の関係

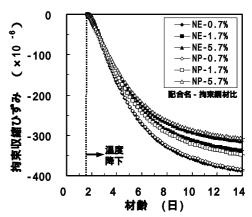


図 - 6 温度降下過程における 拘束収縮ひずみの経時変化

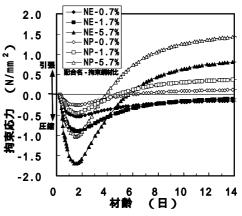


図 - 7 拘束応力の経時変化

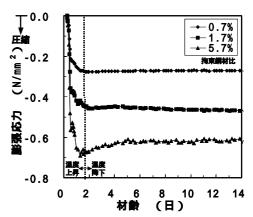


図-8 膨張応力の経時変化

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。

4. 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/mm^2), $E_{ca}(t_i)$: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

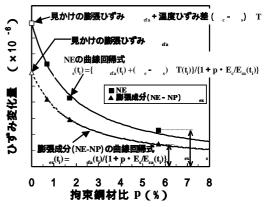
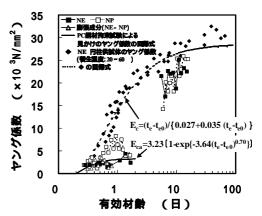


図 - 9 見かけのヤング係数の算出方法



(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) , $\Delta \mathcal{E}_{ex}(t_i)$: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, $E_{ca}(t_i)$: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/mm^2)

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 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

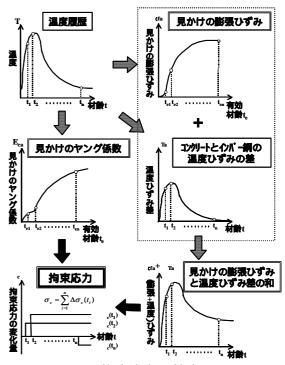


図 - 11 拘束応力の算定フロー

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。

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

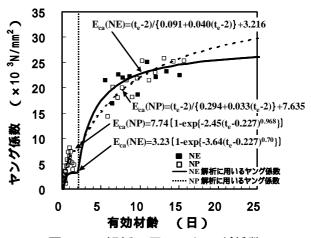
約 50%に小さくな るが,温度降下過 程においては、膨 張材の有無に拘わ らず、ほぼ同様で あった。

(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

- 1) 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



解析に用いるヤング係数 図 - 12 と有効材齢の関係

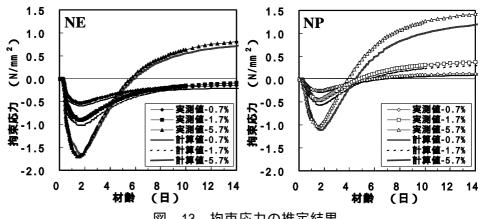


図 - 13 拘束応力の推定結果