

論文 打込み型枠とコンクリートとの複合大型パネルの 温冷ムーブメント

渡部嗣道*¹・馬場明生*²・大久保孝昭*³・真方山美穂*⁴

要旨：本研究は、鉄筋コンクリート工事の際に押出成形パネルを型枠として用い、その後は取り外さずに構造物の一部（以下、打込み型枠という）とする合理化工法について、同型枠とコンクリートからなる2層の複合モデル試験体を作製し、断面内温度差によって生じる内部応力がもたらす変形挙動を実験的に検討した。その結果、2層材間の一体性の状況やひずみ挙動をモデル解析を通して実証することができた。なお、複合体は剥落やひび割れを生ずることがなく挙動することができた。

キーワード：押出成形，打込み型枠，温冷ムーブメント

1. はじめに

近年、鉄筋コンクリート構造物の施工の自動化を目的として、新しい施工法やそれに適合した建築構法が開発されている。その中でも、打込み型枠を用いた工法は、型枠の脱型やコンクリートの養生、および仕上げ工事を省略できる上、躯体の耐久性を向上することができる。しかし、コンクリートの打設後、この打込み型枠にひび割れが生じたのでは、構造物の安全性や耐久性に悪影響を与えることとなる。

ここでは打込み型枠と後打ちコンクリートとの複合体に生じるひび割れ発生応力に対する安全設計を確立するために、外部応力ではなく部材内の温度差によって生じる内部応力に着目し、外気温の急激な温度差（以後、温冷ムーブメントと称する）のある雰囲気を想定した断面内の温度差を変化させるモデル実験を試みた。そして、この2層材からなる実大レベルの複合パネルを作製し、その断面内温度分布と変形挙動との関係を明確にするために予備的な検討をすることとした。なお、試験体に用いた打込み型枠は、施工の合理化および部材の工場生産化の推進を目的として、空洞断面を持つ押出成形パネルとした。

2. 実験概要

(1) 試験体

図1に、打込み型枠と後打ちコンクリートからなる複合パネルの試験体形状と寸法を示す。長軸方向における端部は、支持点のアンカーを取り付けるためにコンクリートのみとし、打込み型枠の端面はコンクリートと接するようにした。なお、試験体は平打ちとし、打込み型枠の上にコンクリートを打設した。コンクリートの養生は、打設後1週間湿潤養生を施し、その後は室内で自然乾燥させた。打込み型枠パネルは、空洞断面を持ち、厚さ75mm・600mm・長さ2508mmの押出成形パネルとした。また、図2に示すように、コンクリートと接する面は剥落しないような特殊な形

*1 (株)フジタ 技術研究所主任、工修(正会員)

*2 建設省建築研究所第4研究部施工管理研究官、工博(正会員)

*3 建設省建築研究所第4研究部施工技術研究室主任研究員、工博(正会員)

*4 建設省建築研究所第4研究部施工技術研究室研究員、工修(正会員)

状とした。押出成形パネルの物理的性質を表1に示す。一方、後打ちコンクリートは、普通ポルトランドセメントを用いた普通コンクリートとし、最大骨材径20mm、スランプ $18 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量 $4.5 \pm 1.5\%$ 、呼び強度 210kgf/cm^2 とした。硬化コンクリートの物理的性質を表1に示す。

(2)試験方法

パネルの断面内に温度変化を与える装置の概要を図3に示す。同装置は、門型フレームにパネルを支持し、パネルまたは断熱材によって分けられた2室（一方は恒温室、他方は変温室）の温度を変化させることによってパネル断面内の温度差を調整するものである。なお、試験体と門型フレームとの支点は面外に単純支持となるようにした。試験体は2体作製し、温室側の試験体の面が、コンクリート側（試験体A：床スラブを想定）および型枠側（試験体B：外壁・柱を想定）のそれぞれについて試験できるようにした。2室の雰囲気温度条件を図4に示す。温度条件は、変温室温度を下降させる場合(CASE1)と上昇させる場合(CASE2)の2種類とした。測定内容は、試験体の各部温度およびひずみ、さらにパネルの面外変位である。図1に、試験体のゲージ、熱電対位置および変位計取付け位置を示す。

表1 打込み型枠および後打ちコンクリートの諸物性

打込み型枠	圧縮強度: 1019kgf/cm^2 引張強度: 134kgf/cm^2 ヤング係数: $2.07 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 線膨張係数: $10.13 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$
コンクリート	圧縮強度: 310kgf/cm^2 引張強度: 27.4kgf/cm^2 ヤング係数: $3.07 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 線膨張係数: $9.50 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

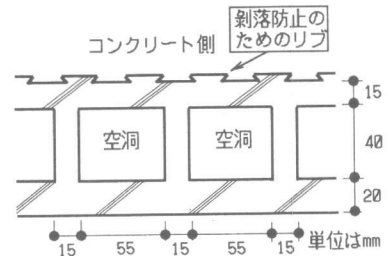


図2 打込み型枠断面形状

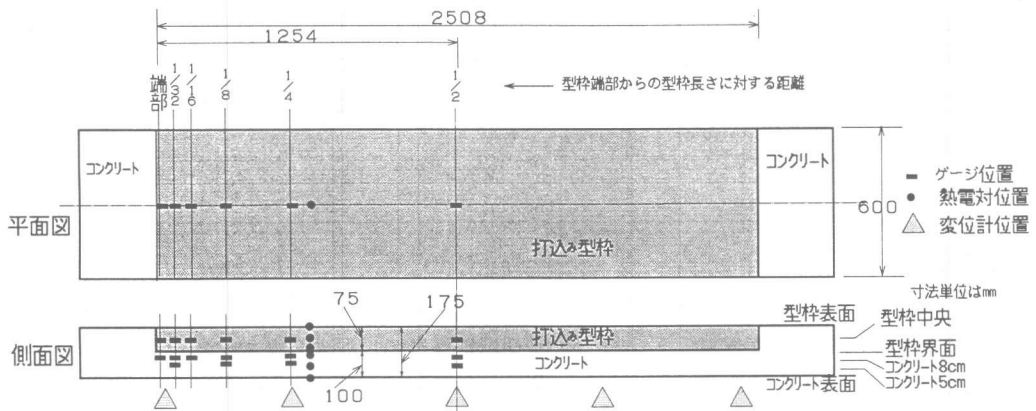


図1 試験体および測定箇所

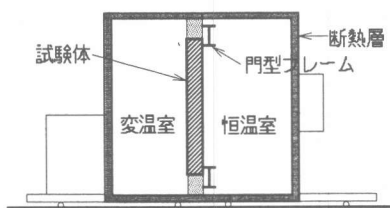


図3 大型温度変形試験装置

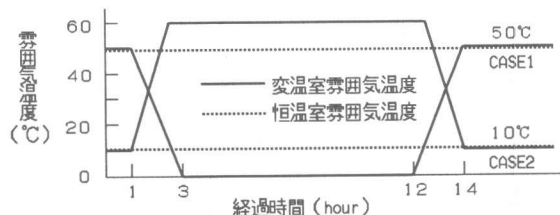


図4 環境温度条件

3. 実験結果および考察

(1) 断面内温度の経時変化

図5に、CASE1における試験体断面内の温度変化を示す。各温度は、雰囲気温度変化開始から非定常的に変化し、変温室側の温度を一定に保ってから9時間経ても定常状態には至らなかった。他の実験結果も同様であった。打込み型枠は空洞断面となっているために断熱効果が大きく、特に試験体Bでは打込み型枠の断面内の温度差が試験体内のそれに大きな影響を与えている。

(2) 面外変形の経時変化

面外変位を5点測定し、それぞれ3点を1組として、上部、中央部、下部について曲率を求めた。図6に、CASE1の実験結果を示す。いずれの曲率の経時変化も、ほぼ試験体の温度変化と同様な経緯をたどって増減した。また、いずれも上部または下部の値よりも中央部の値の方が大きくなった。なお、試験体AとBとを比較すると、やや初期においてBの方が大きな変形をする結果となったものの、10時間程度ではほぼ同等の値となった。

(3) 表面ひずみの経時変化

図7に、CASE1における試験体AとBに関して、温度応力による表面ひずみの経時変化を示す。応力によるひずみは、実際の被測定物とひずみゲージとの熱特性が異なるため、温度変化に応じてひずみ差を修正する温度補正を行った。なお、ここでは引張りひずみを正の値とした。

まず、試験体AのCASE1について、型枠表面ひずみは測定位置によって経時変化の傾向が異なり、端部においては緩やかな経時変化を示すのに対して、中央部になるほど急激な変化を示す傾向となった。また、いずれの位置においても、初期における温度降下とともに引張りひずみは増大するものの、2時間程度から減少しはじめて圧縮ひずみを生じる結果となった。そして、15時間程度での圧縮ひずみの極大値を経過して、最終的には初期値に収束するような経緯を示した。なお、コンクリート表面ひずみについても、型枠と同様な経緯を示した。

次に、試験体BのCASE1について、型枠の表面には主に引張りひずみが生じ、表面温度の経緯に沿って変化した。ただし、中央部と端部との値を比較すると、中央部になるほど大きな値を示した。

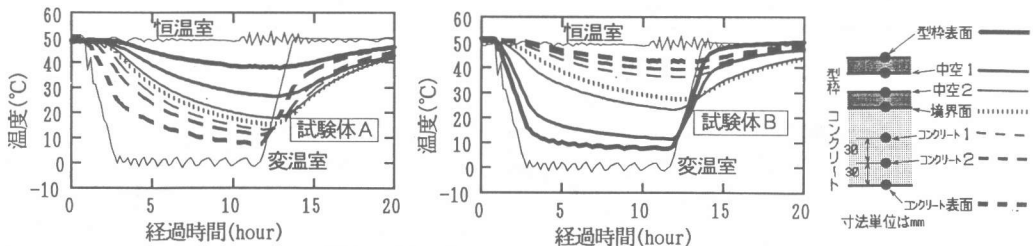


図5 断面内温度分布の経時変化 (CASE1)

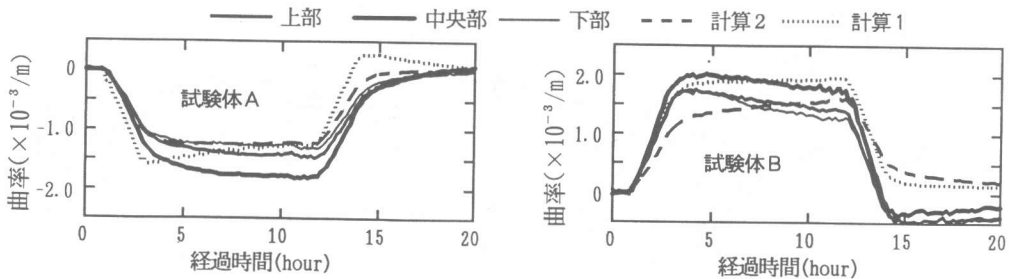


図6 曲率の経時変化 (CASE1)

コンクリートの表面ひずみについては、減少の程度が大きいものの約12時間程度までは型枠表面ひずみと同様な経緯を示した。しかし、それ以後は圧縮側に大きく変わり、試験体Aと同様に極大値を持つような経緯を示した。

なお、CASE2の場合もひずみの値は正負逆となったものの、これらの傾向と同様な傾向を示す結果となった。

図8に、CASE1の場合のコンクリートおよび型枠の表面ひずみの経時変化の計算結果を示す。これは、打込み型枠とコンクリートとの境界面が一体としてすべりが生じないと仮定した場合の複合体について、試験体断面内の測定温度と線膨張係数およびヤング係数から面内に作用する曲げモーメントを算定して、初等はり理論における平面保持の仮定に基づき求めたものである(計算1)。コンクリートおよび型枠ともに雰囲気温度の変化にそった経緯を示している上、試験体AとBとではひずみの正負が逆になっており、実験結果とは大きく異なる結果となった。

そこで、次に本実験に用いた試験体の打込み型枠とコンクリートとの層間のせん断力を伝達する機能が小さいとしてその間にすべりが生じた場合、つまり同じ曲率で変形するもののせん断応力に対しては一体化されていない2層部材として、これも初等はり理論に基づいて解析することとした(計算2)。その場合の中立軸に平行なひずみは、平面方向に垂直で長軸方向に平行な断面について次式で表される。

$$\epsilon_{ix} = -((T_{ixt} - T_0) \cdot R_i - \epsilon_{ci}) + (\phi_i - \phi_c) \cdot dx \quad (1)$$

$$\phi_i = M_i / (E_i \cdot I_i) \quad (2)$$

$$\phi_c = \frac{\sum_{i=1}^{i=2} M_i}{\sum_{i=1}^{i=2} (E_i \cdot I_i)} \quad (3)$$

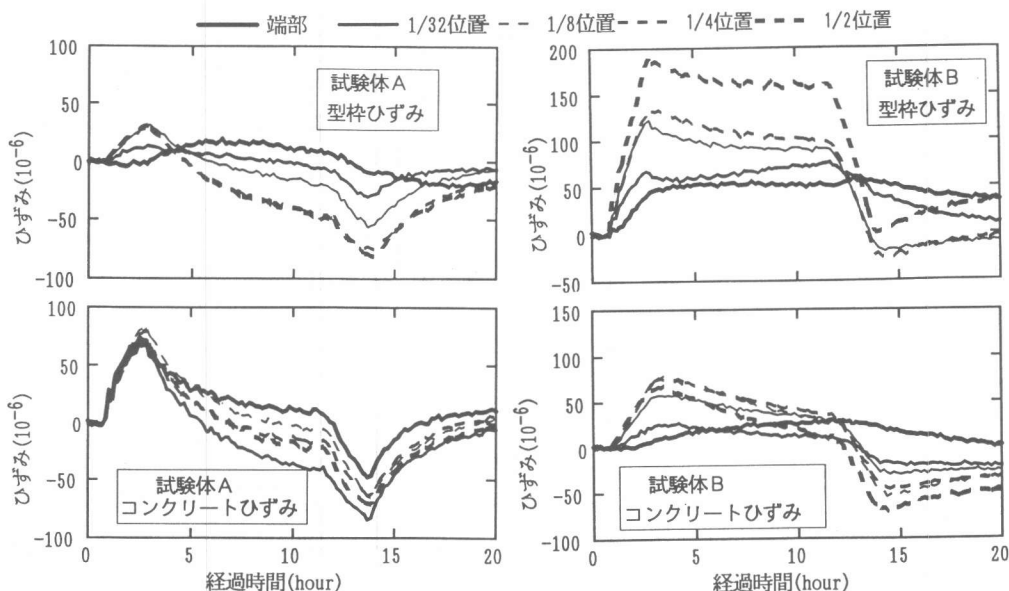


図7 実測した表面ひずみの経時変化(CASE1)

ここで、 ϵ_{ix} : 構成部材 i (打込み型枠:1, コンクリート:2) の中立軸から dx だけ離れた構成部材 i の面の長軸方向ひずみ, T_{ixt} : 構成部材 i の dx 面における t の時刻における断面内温度, T_0 : 試験体の初期温度 (全て一定), R_i : 構成部材 i の線膨張係数, ϵ_{ci} : 構成部材 i の中立軸位置の自由ひずみ, ϕ_i : 他方の構成部材に拘束されずに自らの温冷ムーブメントのみにより変形したとした場合の構成部材 i の曲率, M_i : 構成部材 i の温冷ムーブメント, ϕ_c : 構成部材間のせん断抵抗がないものとした場合の温冷ムーブメントにより変形した複合体の曲率, dx : 中立軸からの面外方向距離, E_i : 構成部材 i のヤング係数, I_i : 構成部材 i の断面2次モーメント

これによる試験体AおよびBの表面ひずみの計算結果を図9に示す。試験体AおよびBともに、コンクリートおよび打込み型枠について実験結果と同様なひずみの変化を示した。従って、実験結果が示した傾向は、各構成部材内部の温度差によるそれ自身の内部応力と他方の部材変形の拘束による外部応力との合成された応力によってひずみが生じたことによるためと考えられる。ただし、計算1による型枠またはコンクリートの引張ひずみの最大値と計算2によるそれとは大差ない結果となった。

図10に、試験体AのCASE1における型枠端部から型枠長さの1/32, 1/4および1/2の位置について、各断面位置におけるひずみ分布を示す。型枠とコンクリートとの境界面位置を境にして、型枠側とコンクリート側との直線の傾きの動きが逆になっていることが分かる。これは明らかに2層材間において平面保持の仮定が成り立っていないことを示している。

図6に、上記の2つの解析によって計算した曲率を示す。いずれの計算方法も試験体の変形挙動を十分に満足したものではないことから、試験体の2層材間の関係はこの中間に位置するものと考えられる。

(4)長軸方向位置のひずみ分布

図11に、試験体BのCASE1における型枠表面、コンクリート表面から5cmの位置の側面、およびコンクリート表面について、型枠端部からの水平距離とひずみ分布との関係を示す。型枠および

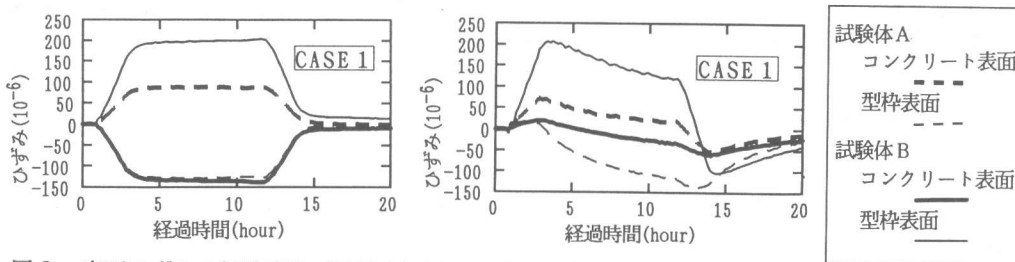


図8 表面ひずみの経時変化 (計算1) 図9 表面ひずみの経時変化 (計算2)

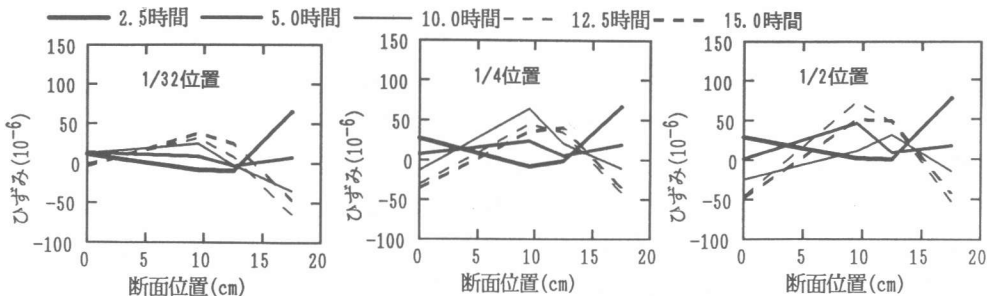


図10 型枠表面からの測定位置とひずみ分布との関係 (試験体A, CASE1)

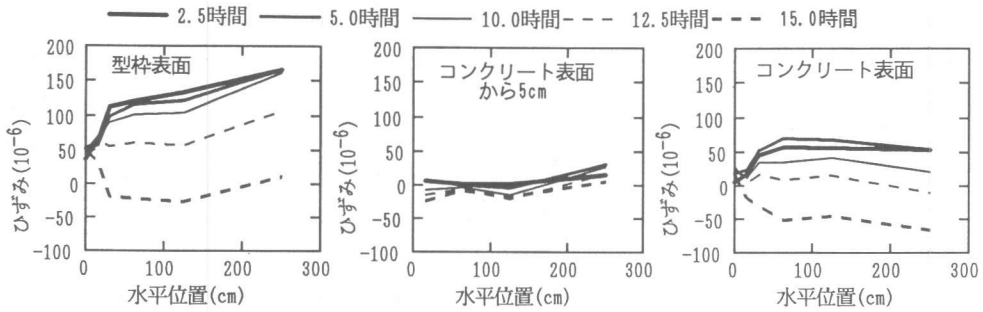


図 1 1 型枠端部からの測定位置とひずみ分布との関係 (試験体B, CASE 1)

びコンクリート表面ともに、端部の値は時間の経過に拘わらずほぼ一定の値を示した。これは、端部に引張応力に対する拘束がないために応力が緩和されたことによるものと考えられる。それに対し、1/16位置より中央にかけての値は、時間の経過に拘わらずほぼ同じ分布となった。これは、

端部の拘束の影響を受けなくなるためであり、初等はり理論を適用できる範囲と考えられる。

(5)最大ひずみの発生状況

表 3 に、コンクリート表面および型枠の表面に生じたひずみの最大値を上記の計算結果とともに示す。2層材間のすべりを考慮した計算方法 (計算 2) が、実験結果と整合性が高いことが伺われる。なお、ひび割れの危険性を示す引張ひずみの最大値について、コンクリート表面では試験体AのCASE 2で120 μ となり、型枠表面では試験体BのCASE 1で190 μ となった。

(6)剥落およびひびわれ発生状況

本実験では、2層材間にすべりが生じていると判明したにも拘わらず、打込み型枠の剥落は確認されなかった。これは、打込み型枠とコンクリートとの境界面の特殊な断面形状が面外剥落を防止する働きがあったためと考えられる。また、打込み型枠およびコンクリートともに、目視によるひび割れは発見できなかった。

4. まとめ

本実験によって、中空断面を持つ押出成形パネルを打込み型枠として用いたコンクリートとの複合体について、雰囲気温度を変化させた場合の断面内の温度分布の変化および接合面形状と変形挙動との関係を把握することができた。特に、変形挙動については、本実験に用いた打込み型枠の場合、面外剥落は起こさなかったものの、2層材間のせん断応力に対する一体性がなく、同じ曲率で変形する2枚材として挙動することを推測することができた。ただし、接合面の一体性の良否がひび割れの危険性つまり引張ひずみに与える影響については、今回の温度変形試験においては大きな問題となるとは考えられないものの、面外応力に対する変形については影響が大きいものと考えられるために剥落の危険性ととも今後の重要な検討課題としたい。

表 3 実験結果および解析結果から求めた最大ひずみ

試験体名	環境条件	実験値または計算値	圧縮ひずみ				引張ひずみ			
			コンクリート		型枠		コンクリート		型枠	
			ひずみ (×10 ⁻⁶)	経過時間 (hour)	ひずみ (×10 ⁻⁶)	経過時間 (hour)	ひずみ (×10 ⁻⁶)	経過時間 (hour)	ひずみ (×10 ⁻⁶)	経過時間 (hour)
A	CASE 1	実験	-84	13.7	-80	14.0	82	2.8	81	2.8
		計算 1	-	-	-130	7.8	89	7.8	-	-
	CASE 2	計算 2	-52	14.0	-138	13.2	73	2.8	17	1.8
		実験	-60	3.0	-33	3.2	120	13.8	71	14.0
B	CASE 1	計算 1	-108	17.2	-	-	-	-	159	7.0
		計算 2	-	-	-26	2.7	110	12.5	131	14.0
	CASE 2	実験	-73	14.0	-25	14.2	81	3.5	190	2.8
		計算 1	-139	11.5	-	-	-	-	204	11.5
	CASE 1	計算 2	-58	14.3	-104	14.3	20	2.8	207	3.7
		実験	-66	3.3	-214	12.0	70	14.3	-	-
CASE 2	計算 1	-	-	-197	12.0	135	12.0	-	-	
	計算 2	-30	3.5	-226	3.5	51	14.3	104	14.8	