

論文 薄肉打込み型枠とコンクリートとの複合体の温冷・乾湿ムーブメント

大久保孝昭*¹・緒方昌博*²・渡部嗣道*³・眞方山美穂*⁴

要旨：本研究は薄肉打込み型枠とコンクリートとの複合部材に関して、温冷・乾湿ムーブメントに対し、それらの接着一体性を確保する技術を確立するための基礎的な研究である。本論文では、各種薄肉打込み型枠材料の温冷・乾湿ムーブメントに関する性状を実験的に明らかにし、打込み型枠を用いた建築部材の耐久性を高めるためには、設計・施工においてこれらの品質を考慮することの重要性を示している。

キーワード：薄肉打込み型枠，温冷・乾湿ムーブメント，一体性，自己ひずみ

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物における打込み型枠の使用は、柱、梁および床などの主要な建築部材の構工法の合理化を可能とするものである。特に高い曲げ比強度の打込み型枠の使用は、梁や床工法における無・省支保工法の達成や部品の薄肉軽量化による建築工事の合理化を達成できる。

本研究は高曲げ比強度の薄肉打込み型枠を用いたコンクリート部材の品質向上のために行ったものである。打込み型枠を用いたコンクリート系複合部材では、打込み型枠とコンクリートが一体化することによって所要の力学性能や耐久性能を得ることができる。特に埋込みアンカー等による機械的な一体化補強を行わない薄肉打込み型枠構法においては、薄肉打込み型枠と充填されるコンクリートとの接着一体性（以下、一体性と記す）の確保は重要な課題である。これは一体性の確保によって打込み型枠は内部コンクリートの保護機能を有し、場合によっては構造性能を有することができるからである。この一体性を低下させる要因としては、外力が作用した時の構成材料の力学的性質の差異と、構成材料の含水率の変化や温度変化に伴う体積変化の差異（温冷・乾湿ムーブメント）[1] との2つに大きく分けられる。

本論文では、温冷・乾湿ムーブメント（コンクリートと打込み型枠との相対ムーブメント）に対する一体性向上技術を確立するために行った基礎的な研究成果を示した。まず、各種薄肉打込み型枠材料の温冷・乾湿ムーブメントに関する性状を実験的に明らかにし、更に簡単なモデル解析によって薄肉打込み型枠の品質が複合体のムーブメントに及ぼす影響を検討している。

2. 実験概要

2. 1 打込み型枠単体のムーブメント

(1) 試験体

実験に供した試験体を表1に一括して示す。ここで用いた試験体は比較的強度が高く、材質および成形方法等の異なる10種類の無機系の薄肉打込み型枠材料である。試験体形状は幅×長さが10×10cmとし、厚さは表1中に示すように各材料で異なっている。

(2) 片面吸放水試験

実際の施工時において打込み型枠は散水によるプレウェッチングやグラウトされるコンクリー

*1建築研究所 主任研究員・工博（正会員） *2 鉄建建設（株）技術研究所 研究員（正会員）

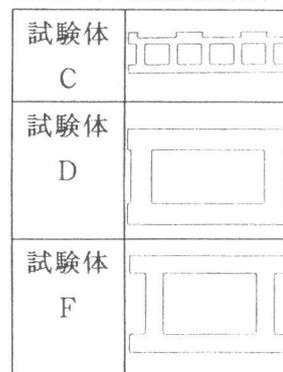
*3（株）フジタ 技術研究所主任・工修（正会員） *4 建築研究所 研究員・工修（正会員）

トからの吸水，竣工後は降水の作用など，打込み型枠の片面からの吸水が生じる場合が多い。そこで本実験では，試験体が一面から水分を吸水する場合の伸縮性状について検討した。片面からの吸水方法は，図1に示すように，容器内部に設置したフェルト（厚さ40mm）上面の水位まで水を入れ，十分に乾燥した試験体をその上に静置してフェルト中の水分を吸水させることよって行った。この片面吸水は20℃の恒温室で約6日間行い，その後20℃の空气中で乾燥させ，この間のひずみ変化を電気抵抗線ひずみゲージ（ゲージ長5mm）により図2に示す位置で測定した。

表1 実験に供した打込み型枠試験体

試験体 (タイプ)	製造方法	材 質	比 重		厚さ cm	断面形状 (空洞率%)	ヤング率 ¹⁾ MPa		圧縮強度 MPa		引張強度 MPa		曲げ強度 MPa	
			表乾	気乾			押出	直交	押出	直交	押出	直交	押出	直交
A	押出成形	非セメント系	2.42	2.36	1.0	中実 平板	4.42	—	134	—	13.8	13.4	43.1	29.0
B					2.0									
C	押出成形	セメント系	2.15	1.96	2.5	中空(40%)	2.36	2.26	92.5	88.4	9.60	8.43	25.9	25.6
D	押出成形	セメント系	2.01	1.86	6.0	中空(40%)	2.13	1.90	99.9	82.2	13.1	12.0	27.4	19.3
E					1.4									
F	押出成形	セメント系	2.09	1.90	6.0	中空(50%)	1.83	2.00	80.6	65.8	11.7	9.80	24.7	21.6
G	押出成形	セメント系	1.84	1.55	1.2	中実 平板								
H	押出成形	セメント系	1.84	1.55	1.2	中実 平板	1.46	1.42	29.4	23.6	6.96	4.80	14.1	10.3
I	型枠成形	GRC	2.28	2.22	1.5	中実 平板	3.00	—	62.0	—	9.11	—	38.1	—
J					3.0									

注：表1中の中空断面試験体形状



* はひび割れ強度を示す

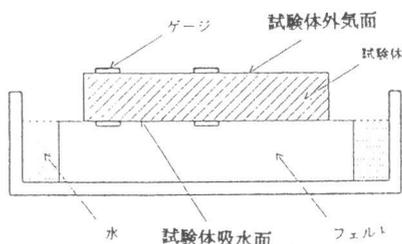


図1 片面吸水試験方法

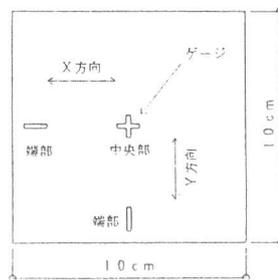


図2 ひずみ計測位置

(3) 温冷試験

打込み型枠材料の温度変化に伴う長さ変化は，図3に示すように20℃±15℃の急激な外気温度変化を与えて試験した。なお本実験に供した試験体は，片面吸放水試験後のものを用いている。試験体温度は試験体表面に張付けたCC熱電対，ひずみは図2に示す位置において電気抵抗線ひずみゲージにより測定した。なお，外気温が変化する場合，計測ひずみにはひずみゲージ自身の抵抗値の変化による誤差が含まれているので，ゲージの温度特性から(1)式により試験体の実際のひずみを求めた。

$$\varepsilon_k = \varepsilon_e + \alpha_g \times \Delta T \quad (1)$$

ここに， ε_e ：ひずみの計測値

ε_k ：試験体の実際の伸縮を表すひずみ

α_g ：ゲージの見かけの線膨張係数

ΔT ：基準時刻からの試験体の温度変化

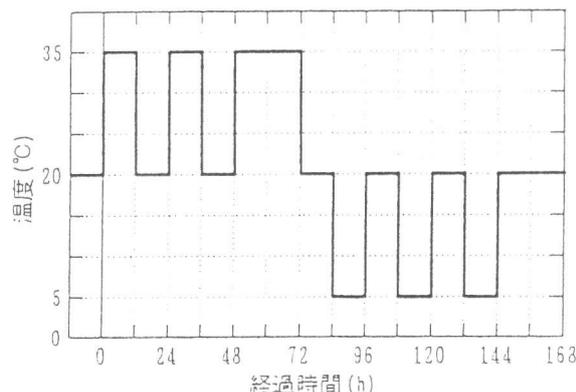


図3 外気温度の変化

2. 2 複合体のムーブメント

(1) 試験体

複合試験体は、図4に示すような床スラブを対象とした打込み型枠とコンクリートとの2層からなる積層複合試験体である。試験体は実際の床スラブの施工を想定し、散水によるプレウェッチングを施した打込み型枠の上面にコンクリートを打設して作製した。試験体成形のための仮設の側型枠（合板製せき板）はコンクリート打設後1日で脱型した。試験体を構成する打込み型枠は表1中の試験体C、コンクリートは設計基準強度が20.6MPaのものを使用している。

(2) 乾燥収縮

試験体はテフロンシート（2mm厚）の上に横向きに静置し、20℃の恒温室内で乾燥収縮ひずみの測定を行った。試験体のひずみは、ポリエステル系接着剤で表面をコーティングして接着した電気抵抗線ひずみゲージ（メカバース）により測定した。なお、コンクリートのひずみ測定はゲージの張付けが可能となってから行ったため、打込み型枠のひずみ測定よりも遅れて開始した。

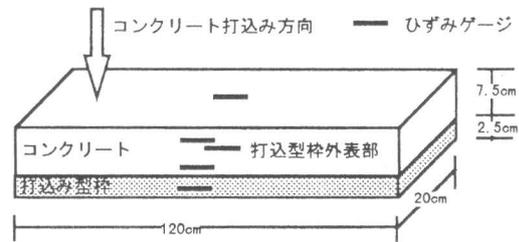


図4 複合試験体の形状

3. 複合体のムーブメント解析概要

解析対象の打込み型枠とコンクリートとのモデル試験体断面を図5に示す。ここでは、床断面を想定し、打込み型枠とコンクリートからなる2層の複合材料とした。なお、解析では簡便化のため、層間の剛性は無限大（完全一体化）で各材料は完全弾性体と仮定し、複合体断面内で平面保持が成立するものとした。以上の仮定をもとに、各材料にそれぞれ一定の自己ひずみ（ひずみ差 $\Delta \epsilon$ ）が生じようとするときの複合体の曲率 $1/\rho$ (/cm)および単位幅当たりの層間せん断応力 P (N/cm)を初等はり理論により算定した。その結果を(2)式および(3)式に示す[2]。

$$1/\rho = \frac{1}{2} \frac{n \cdot q \cdot (1-q)}{q + n \cdot (1-q)} \cdot \Delta \epsilon \cdot \phi \cdot d \quad (2)$$

$$P = \frac{n \cdot q \cdot (1-q)}{q + n \cdot (1-q)} \cdot \Delta \epsilon \cdot E_1 \cdot d \quad (3)$$

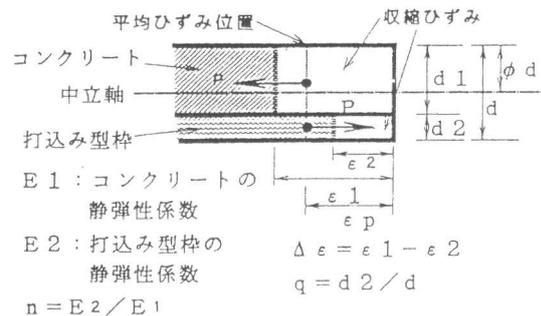


図5 解析対象のモデル試験体断面

4. 実験結果及び考察

4. 1 打込み型枠単体のムーブメント

(1) 片面吸放水試験結果

試験体ひずみの経時変化の例を図6および図7に示した。図6は外気に接している面（以下、外気面）、図7は吸水試験時に水と接している面（以下、吸水面）のひずみ変化を示したものである。図6からわかるように外気面のひずみは試験体種類によってかなり異なる傾向を示した。一方、試験体の吸水面には外気面ほどの試験体間の相違が認められない。このことは試験体の水分の吸い上げ能力の差によるものである。図6において試験体Bの外気面は片面吸水時から圧縮側のひずみ、同様に放水時（乾燥過程）においては試験体BとGの外気面は圧縮側のひずみを示している。このことは試験体内部の含水率分布により試験体に反りが生じたためと考えられる。図8および図9はそれぞれ試験体BおよびGについて外気面と吸水面とのひずみ差の経時変化を

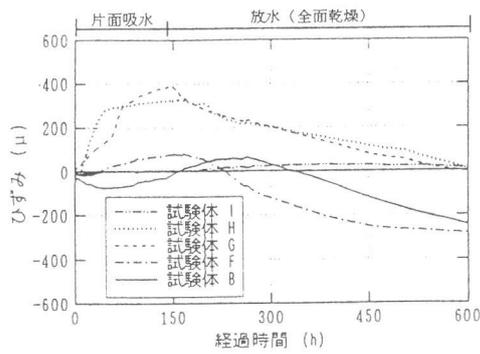


図6 試験体ひずみの経時変化（外気面）

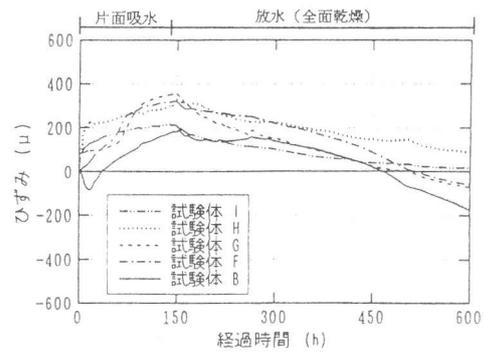


図7 試験体ひずみの経時変化（吸水面）

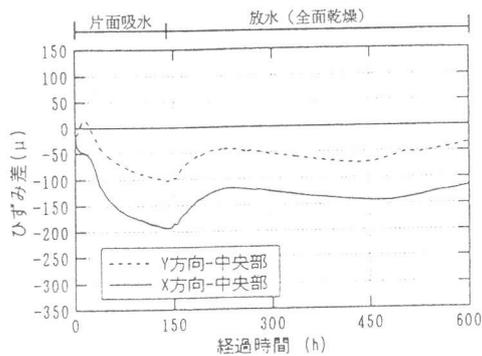


図8 試験体Bの外気面と吸水面のひずみ差

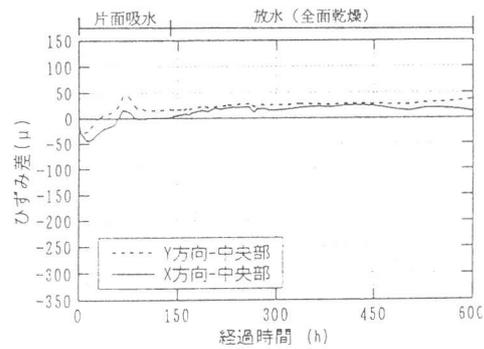


図9 試験体Gの外気面と吸水面のひずみ差

示したものである。試験体Bは外気面と吸水面のひずみ変化に顕著な差があり、吸水面側に凸の変形モードを示していることがうかがえる。また押し出し方向（図中、X方向）と直交方向（同、Y方向）のひずみ差はかなり異なり、これは試験体の異方性の影響と考えられる。試験体Gについては、外気面と吸水面のひずみ性状の違いは明確には認められない。図10では、同一材質からなり断面形状の異なる試験体F、G（表1参照）に関する外気面のひずみ変化を比較した。吸放水に伴うひずみ変化は試験体形状が大きく影響することが明らかである。

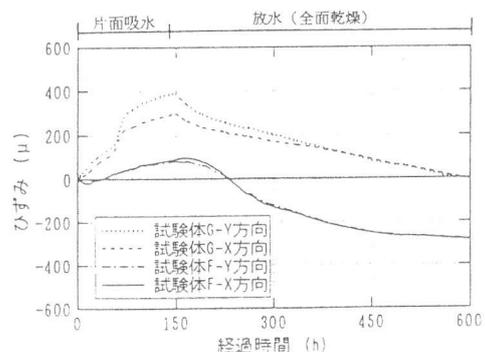


図10 試験体FとGのひずみ（外気面）

以上のように、打込み型枠の材質や形状により片面吸水時の伸縮や反り変形はかなり異なることが明らかであり、打込み型枠をコンクリート構造物に使用するときには型枠材質や形状を考慮した上で設計・施工を行うことの重要性がわかる。

（2）温冷試験結果

温冷試験結果の一例として、試験体Bのひずみの経時変化を図11、12に示す。先にも示したように温冷試験では片面吸放水試験後の試験体を用いたため、本試験においても吸放水試験における外気面と吸水面に分けて結果を示した。これらの図から、本試験結果には温度変化による伸縮の他に乾燥収縮が影響していることが分かる。即ち、試験開始時の含水率が大きい試験体吸水面のひずみは、乾燥収縮の影響により圧縮ひずみ側に大きく移行している。図13および図14には試験体温度とひずみの関係を試験体Fについて示した。温冷繰り返しによって試験体ひずみが圧縮側に移行する割合は吸水面（図14）の方が大きくなっていることが明らかである。図には示して

いないが、他の試験体についても同様の傾向を示した。このことは打込み型枠内部の含水率分布が施工後の温冷ムーブメントにも大きく影響することを示している。

本試験結果から各試験体を構成する材質ごとの線膨張係数を算定した。ただし線膨張係数は乾燥収縮の影響が小さくなった時点、即ち、例として図13, 14中に示したような直線の傾きから求めた。表2に算定した各試験体の線膨張係数を一括して示している。

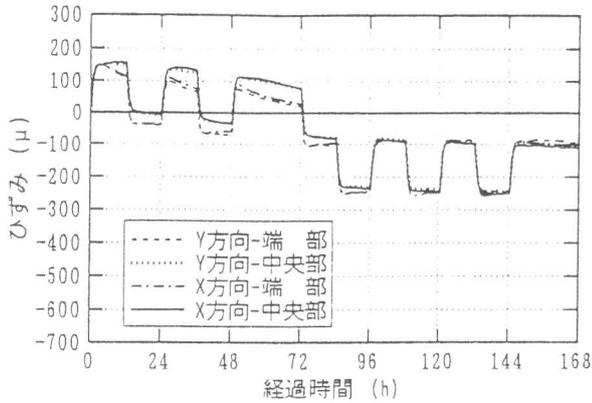


図11 試験体Bのひずみの経時変化（外気面）

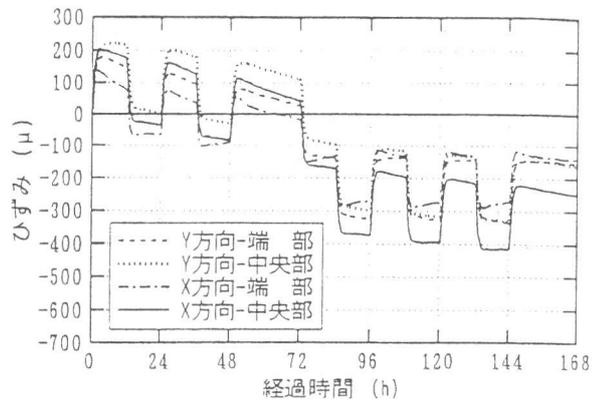


図12 試験体Bのひずみの経時変化（吸水面）

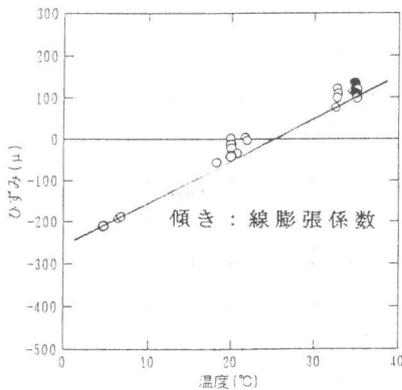


図13 試験体Fのひずみと温度の関係（外気面）

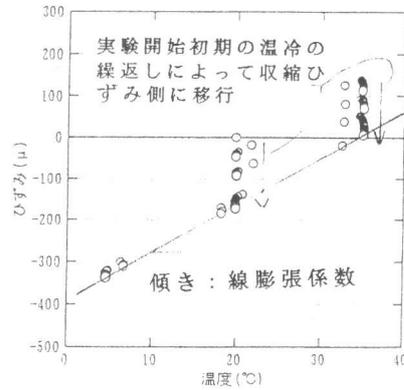


図14 試験体Fのひずみと温度の関係（吸水面）

4. 2 複合体のムーブメント

(1) 乾燥収縮試験結果

乾燥収縮試験における複合試験体のひずみの経時変化を図15に示す。同図において、型枠表面のひずみはコンクリート打設後3時間、コンクリートの表面ひずみは打設後7日をそれぞれ基長（ひずみの初期値0）とした値を示している。試験体の型枠表面には打設後5日程度までに伸びひずみが増加し、その後ほぼ一定値を示していることが同図から分かる。この伸びは打込み型枠自身がコンクリートから吸水し膨張することとコンクリートの初期乾燥収縮による試験体全体の反りとの複合作用によるためと考えられる。時間が経過するとコンクリートと打込み型枠とのひずみ差は小さくなる傾向を示しており、このことは試験体の曲率も時間とともに変化していることを示している。

表2 各試験体素材の線膨張係数

試験体	A, B	C	D, E	F	G	H	I, J
線膨張係数 (μ/C)	9.9	8.1	10.7	10.8	9.5	11.3	11.3

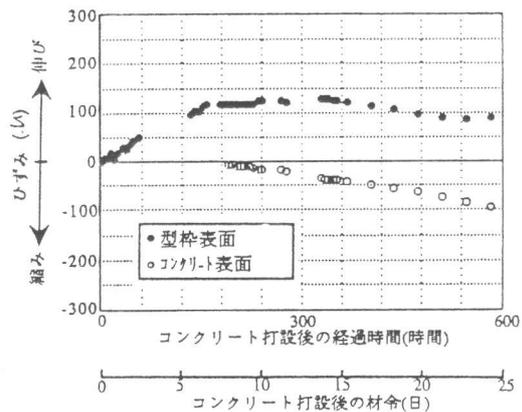


図15 複合試験体の乾燥収縮の経時変化

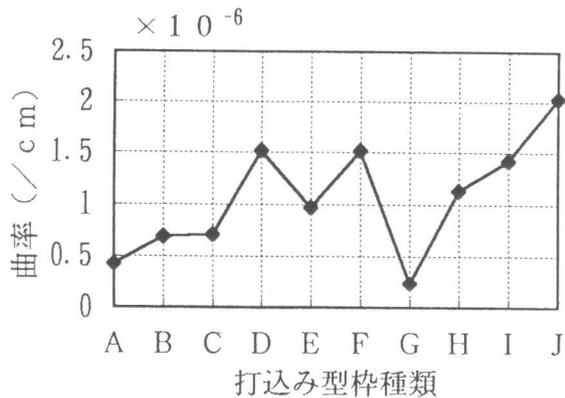


図16 モデルによる各試験体の曲率

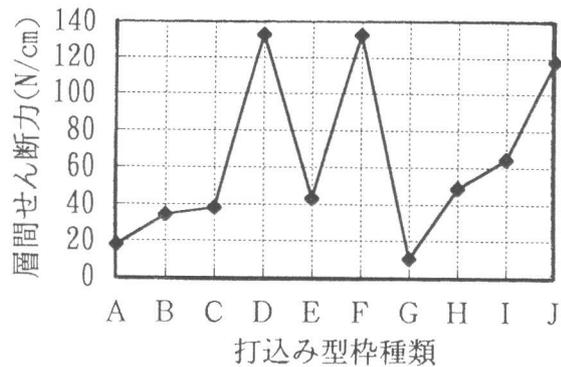


図17 モデルによる各試験体の層間せん断力

(2) 打込み型枠の性状が複合体のムーブメントに及ぼす影響（解析結果）

前節までに示したように、複合体のムーブメントに及ぼす打込み型枠の品質の影響は大きい。いま、先の表1に示した各種打込み型枠に厚さ10cmのコンクリートを打込んだ2層の積層複合体について、複合部材断面がある基準時刻から一様に10℃増加した場合を想定する。コンクリートの弾性係数を 2×10^4 MPa、線膨張係数を 9×10^{-6} /℃として複合体の曲率および層間せん断力を(2)式、(3)式で算定した結果を図16および図17に示した。同図に示すように複合体の曲率や層間せん断力は打込み型枠の種類によって大きく異なることが明らかである。本算定手法は非常に簡便化したものではあるが、打込み型枠を用いた複合部材のムーブメントに伴う一体性には打込み型枠の品質を考慮することの重要性を示すものである。

5. まとめ

本研究は、温冷・乾湿ムーブメントに対する打込み型枠とコンクリートとの一体性向上技術を確認するために行った基礎的な研究である。本研究で得られた主な知見は以下の通りである。

- 1) 各種薄肉打込み型枠材料の片面吸放水試験による乾湿ムーブメントは打込み型枠の材質や形状により大きく異なる。
- 2) 温冷試験から求めた打込み型枠の線膨張係数は、ここで検討した試験体についてはコンクリートとほぼ同程度であった。また、外気温が変化するときの打込み型枠のムーブメントには打込み型枠内部の含水率分布による乾湿ムーブメントの影響は無視できないほど大きい。
- 3) 薄肉打込み型枠の品質や形状はコンクリートとの複合体のムーブメントに影響し、特に複合体に生じる反りや層間せん断力を抑えるためには重要な要因となる。

以上のように、薄肉打込み型枠とコンクリートとの複合部材の耐久性を高めるためには、温冷・乾湿ムーブメントに関わる打込み型枠の材質や形状を慎重に検討しなければならない。今後、複合部材に関し、さらに定量的な検討を行う予定である。

謝辞：本研究の大部は平成2年度から平成6年度までに実施した建設省総プロ「建設事業における施工新技術の開発」で実施した。貴重なご意見を頂いた委員の方々に深く謝意を表します。

参考文献

- [1] 渡辺嗣道, 馬場明生, 大久保孝昭, 眞方山美穂: "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", コンクリート工学年次論文報告集 Vol. 17, No. 2, 1995, pp. 113-118
- [2] T. WATANABE, A. BABA AND T. OHKUBO "A METHOD FOR APPROXIMATING MOISTURE AND THERMAL MOVEMENTS OF CONCRETE COMPOSITE WITH CASTING FORM", STRATEGIES AND TECHNOLOGIES FOR MAINTENANCE AND MODERNIZATION OF BUILDING, CIB W70, 1994. 10