

報告

[2106] アラミド3軸メッシュで補強した永久型枠の開発

正会員 〇田中 幸一郎 (竹中工務店)
 正会員 大野 定俊 (竹中工務店)
 正会員 西山 正直 (竹中工務店)
 位田 淳一 (東海コンクリート工業)

1. はじめに

炭素繊維やアラミド繊維などの高強度繊維をコンクリート構造物の補強材として用いる研究が近年行われるようになってきた。特に鉄筋や緊張材の代替としてFRP補強材を用いる方法などが活発に検討されている。一方、コンクリート製の永久型枠のような薄い板状構造物の補強材としての利用も、耐食性能や力学的性能の向上などの観点から期待されている。また建設工事の省力化・工業化の推進が進められるなか、型枠のような薄肉の部材であっても一層の軽量・薄肉化が重要な開発課題となってきている。従来、型枠やカーテンウォールのような薄い部材を対象とした繊維補強コンクリートには短い繊維の利用が主体であったが、高性能化に対応するためには長繊維の利用が力学的に有利であると考えられる。しかし、短繊維に比べ長繊維は複合部材の製造方法の面で自由度が少ないなど問題がないわけではない。本論文では型枠形状および材料の選定に関して実施した種々の実験結果のうち、主にパネル自身に関連する事項を中心に報告する。また、新素材繊維補強セメント板の力学的特性について補強繊維の加工方法やメッシュ繊維の配向性の影響についても報告する。

2. 型枠形状の解析

本報告で対象とする薄板永久型枠では、外部の支保を用いずセパレータのみの支持で型枠として機能すること、一般の板厚は極力薄いこと、長繊維メッシュ補強とすることの3点を基本的な仕様とし、セパレータ間隔、板厚、セパレータ部の補強方法および使用条件の設定は解析と実験結果の両者を参考にして行った。特に、型枠の形状・寸法の決定に関しては、FEM弾性解析によって応力及び変形の照査を行った。FEM解析は図-1に示すような型枠のモデルにコンクリートの液圧が作用するものとして、型枠の面形状や部分的な厚さ変化、セパレータ間隔及び境界

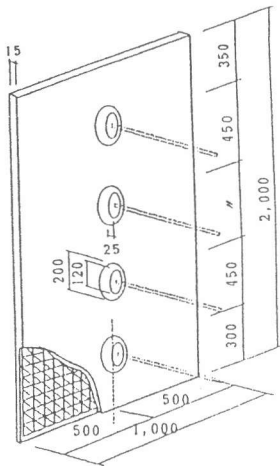


図-1 代表的な型枠の形状

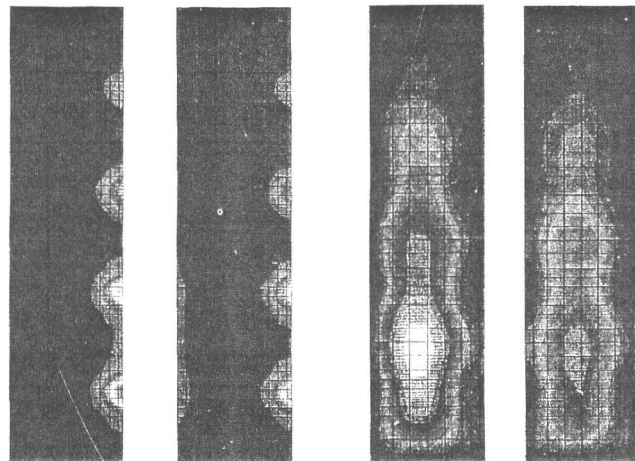


図-2 解析結果の一例

条件（支持条件）をパラメータとして解析を行った。解析の結果、型枠の形状等に関して以下の結論が得られた。解析結果の一例を図-2に示す。

(1) リブ補強は補剛効果は認められるもの、最大応力度を低減するためには予想されるほど効率的でない。最大応力度を低減するためには板のモーメント分布に比例した板厚の変化をつけることが有利であり、特に応力が集中するセパレータ近傍の板厚をコーン状に厚くすることは曲げ応力の低減ばかりでなく、セパレータ部分の押抜きせん断耐力の面でも有利と判断された。

(2) パネル厚さを15mmとした場合、セパレータ間隔450×500mmとし、厚さ25mm・φ200mmの部分的な補強コーンをセパレータ部分につけることにより、複合部材の弾性限界点近傍での使用が可能となる。これにより、長繊維補強セメントの薄板においても型枠の変形限界を十分に満足することができると判断された。

3. 補強材料

本開発で最終的に採用した補強材は写真-1に示すようなアラミド繊維の3軸メッシュであるが、開発段階では他の繊維のメッシュも含めて検討対象とした。検討対象としたものは炭素、アラミド、ビニロン及びガラスの各繊維であり、いずれも長繊維でメッシュ状に加工したものである。メッシュの加工形態は種々の可能性があるが、製造技術の問題や繊維の特性との関係から現状の製造技術で可能な格子状メッシュと3軸メッシュを選んだ。

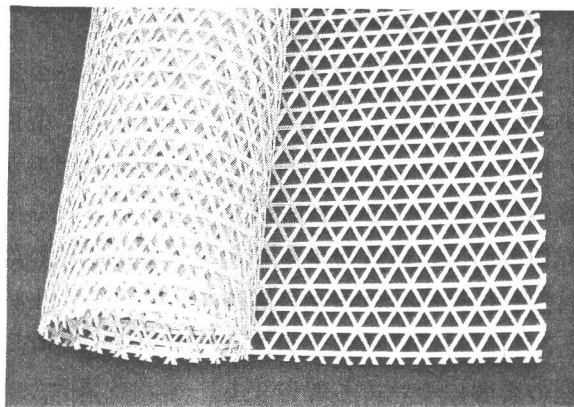


写真-1 アラミド3軸メッシュ

表-1 補強繊維メッシュの種類

記号	繊維の種類	繊維束				加工形態	
		繊維度 (デニール)	素線数 (本)	繊維径 (μm)	断面積 (mm^2)	繊維束 間隔	メッシュ形態
2A21	アラミド	3000	2000	12	0.226	12.5	3軸接着
3A31						12.5	
3A32		4500	3000			18	
3A33						25	
2V11	ビニロン	1800	1000	14	0.154	10	2軸接着
3V21		4500	1875		0.288	18	3軸接着
2G11	ガラス	3672	2880	12	0.326	8	2軸
2G12							からみ織

しかし、繊維の種類と加工形態には密接な関係があり、すべての繊維に対して同じ加工が必ずしも可能でなく、コストにも大きな差が見られた。そのため、最終的には表-1に示すアラミド、ビニロン、ガラス繊維の3種類に絞り込んで検討することとした。

4. マトリックスの配合検討

FEM解析結果から得られる使用条件では、対象となる薄板型枠は部分的に高い曲げ応力が作用する。高強度繊維を用いた長繊維補強セメント板では、強度に関してこの程度の応力レベルは十分にクリアできるものが製造可能であるが、板厚15mm程度と非常に薄い場合マトリックスにひびわれが入ると剛性低下をまねき使用時の変形の限界値を超える可能性がある。これを防ぐためには、マトリックスのひびわれ発生応力を100~120kgf/cm²程度に設定することが望ましいと判

断された。一方、薄板型砕製造の合理化と製造コストの低減という観点からは、練混ぜ後の十分な流動性の確保や製造方法および生産サイクルの効率化などが重要な課題となる。また、本型砕は15mm厚と従来のものに比べて非常に薄いので、養生期間中の製品の反りなどがでないよう、できる限り乾燥収縮量が小さいことが望ましい。このような観点から本研究では、表-2に示すような種々の配合条件についてモルタルの強度試験と乾燥収縮試験を行った。なお曲げ強度試験は $1250 \times 50 \times 15$ mmの試験体を用いてスパン 200mmで中央集中載荷を行った。配合実験結果から得られた知見は以下の通りである。

(1) マトリックスの曲げ強度：真空脱水なしで w/cを25%~45%の範囲で変化させた試験では、材令4週の曲げ試験強度が w/cに応じて50~150kgf/cm²の範囲に入る値となった。強度的には w/c小さくすれば目的の所要強度は十分達成できる結果が得られた。これに対し、真空脱水を行った試験体では w/c=45%でも脱水の効果により w/c=30%の真空脱水なしの試験体と同様の強度が得られると共に、即時脱型によって型砕製作時の生産効率を高められることが明らかになった。しかし、後述するように補強繊維が存在すると w/cが大きい場合には繊維の存在によって脱水が阻害され、強度増加の効果が無補強の場合よりも小さくなるなどの影響が認められた。このため、真空脱水を行う場合でもw/cの値は30%程度とした。

表-2 モルタルマトリックスの配合試験

配合名称	配合						真空脱水	曲げ強度 (kg/cm ²)		圧縮強度 (kg/cm ²)		
	w/c (%)	s/c (%)	減水剤	収縮低減剤	シリカフューム	珪砂(号)		材令1週	材令4週	材令1週	材令4週	
25-35	25	35	3%	—	—	7	—	143	188	820	917	
27-35	27		2%					137	150	828	924	
30-35	30		1.5%					119	133	764	906	
27-35A	27	50	2%	—	—	7	—	128	135	765	882	
27-35B								6	126	136	785	843
27-50C								110	126	785	855	
27-50D	27	50	2%	3%	—	7	—	111	130	709	816	
27-50E								127	152	856	902	
27-50F								112	129	746	841	
30-70	30	70	2%	—	—	7	—	112	123	706	734	
30-70A								123	135	—	—	
30-70B								113	122	661	804	
35-80	35	80	2%	—	—	6	—	76	80	693	785	
45-70	45	70	—	—	—	5	—	40	51	336	405	

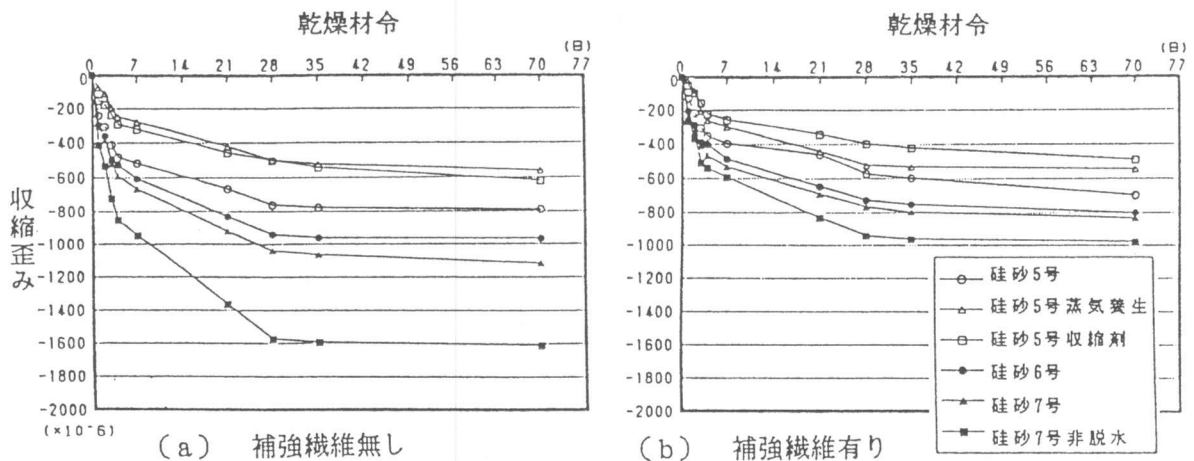


図-3 マトリックスモルタルの乾燥収縮結果

(2) 乾燥収縮：図-3はw/c=30%,s/c=70%の脱水パネルの乾燥収縮結果で、(a)が補強繊維のないモルタル、(b)が繊維補強モルタルの試験結果を示している。この結果より補強繊維ありの場合モルタルの乾燥収縮量が大きくても補強繊維の存在により収縮が拘束される傾向が見られた。また蒸気養生及び収縮低減材の使用はモルタルマトリックスの乾燥収縮を低減する効果があり両者の効果はほぼ同程度であることが明らかになった。一方、骨材粒径が大きいほど収縮量が少なくなる傾向も認められた。

5. 複合体の力学的特性の検討

永久型枠に採用する補強材を選定するために、表-3に示すような各種の繊維メッシュで補強した複合体セメントパネルの曲げ載荷試験を行った。複合体の製作において、特に曲げ強度のばらつきを少なくするためには、補強繊維を所定の位置に正確に配置する必要がある。しかし、通常メッシュ繊維はモルタルマトリックスよりも軽いために製作時に部分的な浮き上がりがあったりする。これを防止するため、本研究では所定の厚さのモルタルを打設した上に補強繊維を敷き、この状態で真空脱水することにより補強繊維メッシュを固定した。さらにこの手順を繰り返して数段の補強繊維メッシュ層を形成し、複合体を製作した。

表-3 曲げ載荷試験計画及び結果

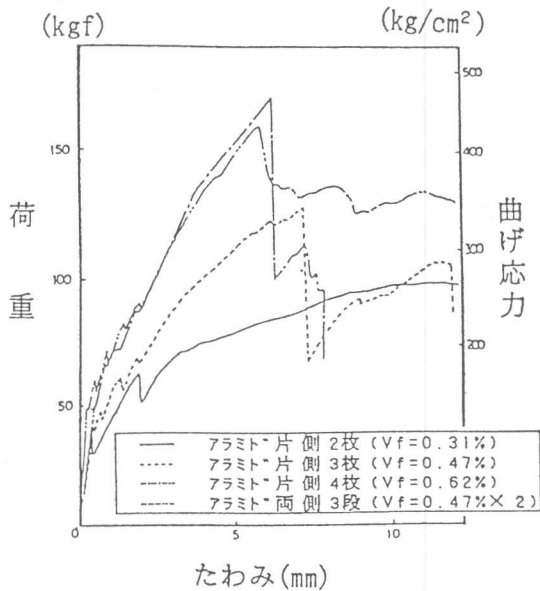
試験体 番号	マトリックス 配合	使用繊維	補強量		LOP kg/cm ²	MOR kg/cm ²	
			メッシュ 枚数	繊維 体積率 (%)			
1	w/c=27%	プレーン	—	—	130	—	
2	s/c=50%	アラミド 3軸	3A21	片側1	0.14	144	143
3			片側2	0.27	144	255	
4			プレーン	—	—	132	—
5	w/c=30% s/c=70%	アラミド 3軸	3A31	片側2	0.42	118	390
6			両側2	0.84	118	390	
7		3A32	片側2	0.31	118	240	
8			片側3	0.47	121	346	
9			片側4	0.62	134	423	
10		3A33	両側3	0.94	130	394	
11			片側4	0.42	117	338	
12		ビニロン 3軸	3V21	片側2	0.27	113	120
13			片側3	0.40	114	187	
14			片側4	0.54	116	240	
15	ガラス 2軸	2G11	両側2	0.8	108	236	
16			2G12	両側2	1.22	91	449
17	w/c=45% s/c=70%	アラミド 3軸	3A21	片側2	1.22	115	239
18			プレーン	—	—	132	—
19			3A21	片側2	0.27	105	257
20	ビニロン 2軸	2B11	片側2	0.20	107	107	

曲げ試験体寸法は 250×50×15mmで、スパン 200mmの中央集中載荷で試験を行った。

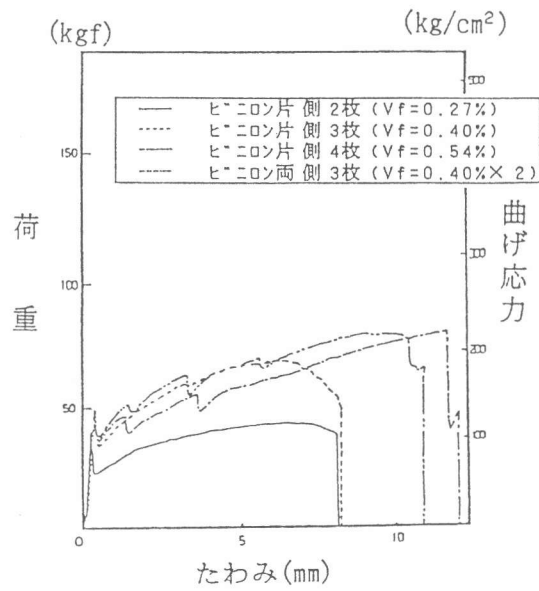
表-3に曲げ載荷試験において測定された比例限界 (LOP:曲げひびわれ発生荷重に相当) 及び曲げ終局強度(MOR) を示す。曲げ載荷試験において得られた主な結論は以下の通りである。

ひびわれ荷重： 試験体はいずれもモルタル打設時に真空脱水しているが、曲げひびわれ発生荷重 (LOP) はw/cが大きくなると低下している。プレーンモルタルでは真空脱水すると w/cによる曲げ強度の影響はほとんど認められなかった。これは、複合体になると繊維の存在が余剰水の脱水を妨げ、自由水が多いと脱水時の繊維界面に水分が集まり付着の弱い層ができることが原因と考えられる。このため、補強繊維が存在する場合真空脱水を行うのであっても、高い LOPを得るためにはできるだけ小さいw/cを採用することが望ましいと考えられる。

曲げ耐力： 曲げ耐力は補強繊維量に比例して増加するが、破壊形態や補強効率は繊維の特性や繊維とマトリックスの付着性状によって多少異なっている。図-4 (a)(b)に示すアラミド繊維とビニロン繊維の曲げ応力-変位曲線によれば、アラミド繊維の方がビニロン繊維に比べて同じ補強材量でも高い曲げ耐力が得られると共に、 LOP以後高い曲げ剛性が得られている。これは補強繊維の弾性率が高いことに起因しているが、薄いパネルの場合には設計荷重レベルでの変位に対する安全率を確保する上でも重要な要素である。またパネルの製造上も少ないメッシュ量で所要性能が確保できることにつながる。



(a) アラミド繊維



(b) ビニロン繊維

図-4 繊維補強セメント板の荷重-たわみ曲線

繊維の加工形態の影響： 2軸メッシュは繊維束を加工した後に樹脂含浸しているのに対して、3軸メッシュは樹脂の接着のみによって加工している。そのため製造コスト的には3軸メッシュの方が有利である。また、両者の主な違いは繊維の配向性であり、複合体にした場合、作用応力の方向によってその曲げ耐力に影響が見られる。図-5に主方向繊維の角度を変えて行った曲げ試験結果を示す。繊維角度に対して角度0°の場合の曲げ耐力を

100とした比率で表した。この結果より3軸メッシュの方が2軸のものよりも方向性による強度低下の比率が小さく、その領域も小さいことがわかる。こうした特性は本型枠のようにセパレータ部分で点支持されるパネルでは、作用応力の分布を考えると特に重要な要素となる。

セパレータ近傍の補強： セパレータ近傍についてはコーン状の補強を行うこととし、補強材料、形状、板への接着方法等をパラメータとした載荷実験を行った。ガラス短繊維混入のコーンは十分な補強効果を示し、接着剤による板への貼付部分も十分な付着力を有することが明らかとなった。

以上の検討結果から、力学的性能、施工性、経済性などを総合的に判断して薄板永久型枠の仕様を表-4のように設定した。

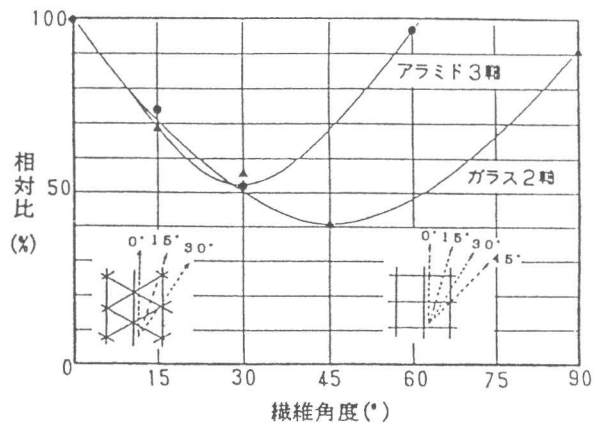


図-5 メッシュの配向角度と曲げ強度の関係

表-4 薄板型枠の標準的な仕様

部位	項目	仕様
パネル部分	寸法	2 x 1 m, 15mm厚
	マトリックス	w/c=30%, s/c=70%, Ad.1.5%
	補強材料	アラミド3軸メッシュ 両側2枚, Vf=0.42x2%
	製造方法	モルタル流し込み, 真空脱水併用
	締付金具	セパレータ@450x500mm
セパ部補強コーン	寸法	上面φ120mm 25mm厚さ 下面φ200mm
	マトリックス	w/c=45%, s/c=70%
	補強材料	ガラス短繊維, Vf=5%
	製造方法	ダイレクトスプレー法 パネルに樹脂接着

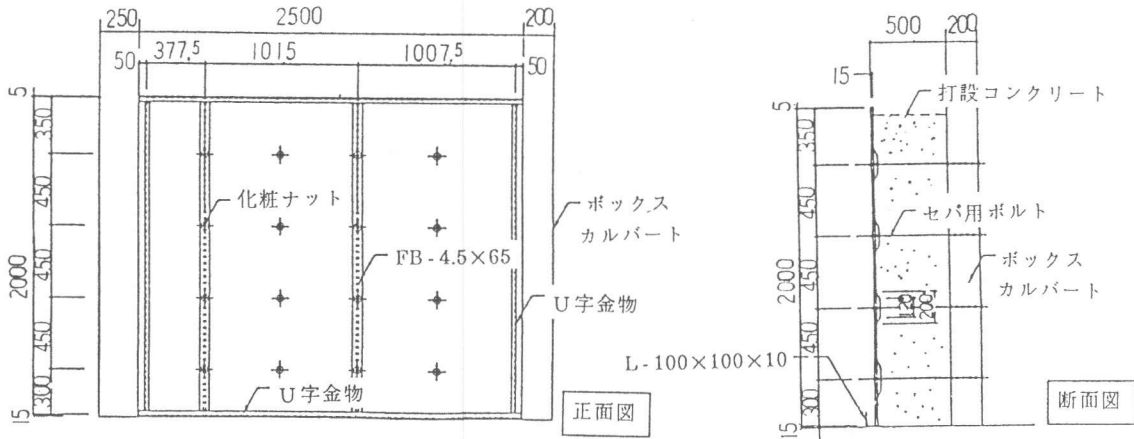


図-6 実大施工実験の型枠配置状況

6. 実大施工実験

実大永久型枠の性能を確認すると共に支持条件や側圧分布など解析で不明瞭な点を明らかにするため、実施工状態での応力や変位状態を実大実験で測定することとした。実験は図-6に示すようにボックスカルバートの中を型枠で仕切るようにセットし上部よりコンクリートを打設する方法を採用した。測定は作用応力の厳しい型枠の下部を中心に、型枠両面のひずみ、変位、セパレータのひずみ等を計測した。

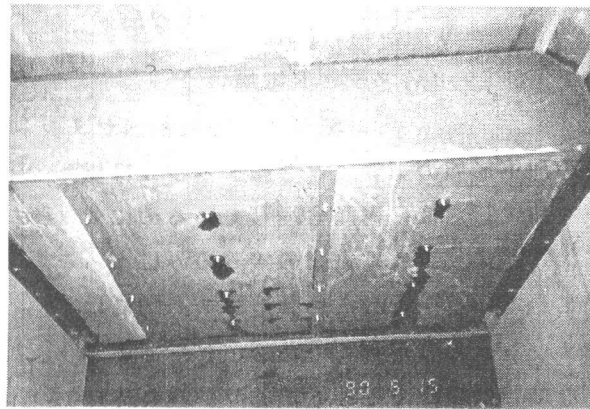


写真-2 打設終了後の状況

打設コンクリートはなるべく設計条件に近い液圧状態を得るためにスランプ21cmのものを使用し、バケットにより上部から自由落下させて打設した。一方、測定結果では最下段コーン裏側の引張応力がパネルの LOP(130kgf/cm²)を越え、支持条件をピン支持とした場合の解析値に近い値となった。しかしセパレータ間の中央部での応力が解析値よりも高い値となり、板周辺の固定度を解析では正しく評価することが困難であることを示している。実験では実際のコンクリート打設条件よりもかなり厳しい条件を敢えて選んだが、解析値の 1.2mm に対し変形の測定値はセパレータ部を基準として最大 0.7mm となり、目標値を十分達成していた。打設後の状況も写真-2に示すように非常に良好で型枠としての機能は十分に発揮できることが確認された。

7. まとめ

本研究では、高強度長繊維を用いることにより、従来よりも薄肉化・軽量化を図った打込型枠の開発を目的とし種々の検討を行った。その結果、型枠の適切な位置にセパレータを配置すると共に、その部分の板厚を部分的に厚くした形状を採用した。さらに、高強度化と生産性向上の観点からマトリックスに低水セメント比の高強度モルタルを使用し、真空脱水によって繊維を固定する製造法を採用した。一方、補強材としては破壊性状や繊維の補強効果などの観点からアラミド3軸メッシュが有効であることが明らかになった。また、実大の薄板型枠を用いた打設実験において、永久型枠として十分に性能を発揮できることが確認された。