

論文 打込型枠とコンクリートとの複合体の曲げ強度解析に関する研究

真方山美穂^{*1}・馬場明生^{*2}・在永末徳^{*3}・森村 毅^{*4}

要旨：コンクリートの約3倍の曲げ強度を持つ押出成形部材を床スラブ等の水平部材に適用した複合体の曲げ試験を行い、同種の部材を複合した場合の曲げ強度とその強度を予測する手法に関して基礎的な検討を行った。その結果、高曲げ強度部材とコンクリートとの複合体の曲げ強度は、コンクリートの曲げ強度の3～5倍の強度となること、また部材の表面に加工を施すことによって破壊時の強度を大きく向上できること、および引張側に配置した型枠部材の引張強度を用いて複合体の曲げ強度を概ね予測ができることが明かとなった。

キーワード：打込型枠、複合体、曲げ強度、引張強度、構成比

1. はじめに

現在、建設業においても他の産業分野と同様に合理化、省人化のための技術開発が進められている。また、環境問題に対する意識の高まりとともに、建設工事において発生する産業廃棄物、熱帯雨林保護等を考慮した技術も要求されている。打込型枠構法は、型枠脱型作業、湿潤養生工程、外部仕上げ期間を不要とするため、これらの問題に対して有効な構工法であると考えられる。この打込型枠構法を用いた建築物は、型枠部材とコンクリートとの複合体で構成されている。したがって、同構法を適用するためには、複合体の力学性状や耐久性能を明らかにしておく必要がある。

これまで、渡部らによって高い曲げ強度を持つ□形断面の押出成形部材とコンクリートとの複合梁型モデル試験体の曲げ試験が行われている[1]。その中で、複合体の曲げ引張縁に曲げ強度約600kg/cm²の□形部材を補強させることによって、複合梁のひび割れ強度をコンクリート梁の3～4倍程度まで向上できたことが報告されている。この結果から、打込型枠構法の型枠材として曲げ強度の大きな押出成形部材を複合させることにより、通常の鉄筋コンクリート部材と比較して大きく曲げ強度を向上できることが予測できる。しかし、複合体の曲げ性状に与える各材料のヤング係数、強度の影響等については、まだ十分には明らかにされていない。

ここでは、打込型枠として曲げ強度の高い押出成形部材を床スラブ等の水平部材に適用した複合体の曲げ試験を行い、型枠部材の複合効果と複合体の曲げ強度を予測する手法に関して基礎的な検討を行った。

2. 曲げ試験

2. 1 型枠部材

打込型枠構法に適用できる型枠部材には、セメント系の薄板や鉄板などいろいろな材料が考えられる。特に、この構法は施工の合理化を期待しているため、床用の打込型枠には、コンクリート打設後早期における作業床としての性能、無省支保工化を可能とするための性能、さらに大型

*1建設省建築研究所第4研究部研究員・工修(正会員) *2同所同部施工管理研究官・工博(正会員)
*3近畿大学工学部建築学科教授・工博(正会員) *4同大学同学部建築学科助教授・工博(正会員)

の揚重機を用いることなく施工できるように軽量な材料でなければならない、等の条件を満足する材料であることが望まれる。

今回、複合体曲げ試験に使用した型枠部材は、空洞断面の押出成形品である。この材料の主原料は、セメント等と同じく無機系の材料であるが、同型枠部材の曲げ強度はたいへん大きくなっている。また、この部材は押出成形によって製造されるので、空洞断面とするなどの断面形状に何らかの工夫を施すことによって型枠材料をより軽量化することも可能な材料である。

2. 2 試験体

曲げ試験は、図1に示す型枠部材を用いて行った。使用した型枠部材は厚さ15mmとかなり薄く小型なので、実際にはコンクリートではなく、モルタルを複合させた試験体を作製した。

型枠部材の寸法は、厚さ15mm、幅200mm、長さ900mm、型枠部材および打設コンクリートの諸性能は表1に示すとおりである。型枠部材には中空部に達するまで溝を切り、空洞部分に打設コンクリートが充填されるよう工夫をした。また、コンクリートとの界面における接着性の効果を検討するため、図1に示す3種類の表面加工を施し、試験体を作製した。

さらに、両材料の構成比の影響を検討するため、コンクリート厚を型枠材の厚さに対して1倍（15mm）、2倍（30mm）、3倍（45mm）として各々の型枠部材について試験体を作製した。曲げ試験は材令3日および28日において実施し、打設したコンクリートのヤング係数による影響についても検討した。試験体水準は、表2に示すとおりである。なお、試験方法は、単純支持でスパン750mmで3等分2線載荷とした。

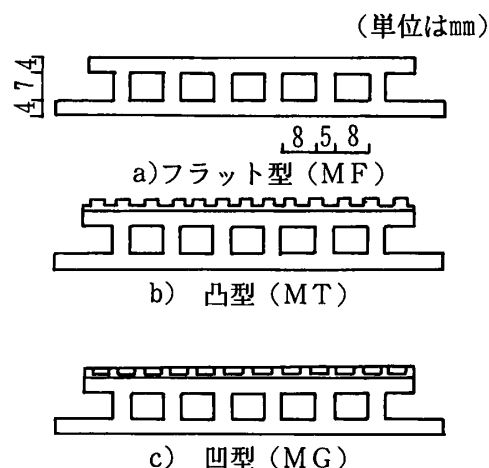


図1 型枠部材の断面形状

表1 材料の力学性能

材 料 名	圧縮強度 (kg/cm ²)	曲げ強度 (kg/cm ²)	引張強度*1 (kg/cm ²)	ヤング係数 (x10 ⁵ kg/cm ²)
型枠部材	—	185.2	135.9	3.54
モルタル (材令3日)	125	—	—	1.30
モルタル (材令28日)	250	—	—	1.50

*1 型枠部材の引張強度は、割裂試験によって求めた

表2 試験体水準

型枠部材	試験体記号
フラット型(MF)	MF1T、MF2T、MF3T
凸型(MT)	MT1T、MT2T、MT3T
凹型(MG)	MG1T、MG2T、MG3T

*表中の試験体記号の1T、2T、3Tは型枠部材に打設したモルタルの厚さを示し、それぞれ15mm、30mm、45mmである。

2. 3 試験結果

表3にひび割れ荷重とその時の曲げモーメントを示す。複合体の荷重は、試験時材令のコンクリート強度から計算した同断面のコンクリート試験体のひび割れ荷重のおおよそ3～5倍程度となり、曲げ強度の大きい型枠部材を複合することによって曲げ性能が大きく向上できたと考えら

れる。型枠材とコンクリートとの構成比が同じ場合、型枠表面が加工されているMG、MT両シリーズのひび割れ荷重はほぼ同程度で、いずれも表面がフラットなMFシリーズに比べて20%～30%程度ひび割れ荷重が大きくなっている。

今回、型枠部材の表面がフラットなタイプの試験体であってもひび割れ荷重がコンクリート単体の場合に比べて数倍も大きくなったのは、空洞部分にまでコンクリートが充填され、界面だけでなく型枠部材のウェブ部分においてもコンクリートとの接着効果が得られ、より一体化が向上したと考えられる。なお、全ての試験体において、コンクリート界面ではなく型枠部材の引張縁が先に破壊していた。

3. 曲げ強度解析

3. 1 前提条件

2. で示した曲げ試験の結果をもとに、曲げ強度の解析手法について検討を行った。2つの材料か

らなる複合体は、それらのヤング係数比や強度、および2つの材料の構成比によって破壊のパターンが決定される。筆者らのこれまでの研究[2]によると、今回の実験に使用した高い曲げ強度を持つ型枠部材では、実用上、型枠部材の引張縁先行破壊とした方が複合体の曲げ性能上において有利であると考え、この破壊パターンについて検討を行った。また、型枠材の断面は断面の中心軸に対して対称なので、解析は対称断面として行った。

曲げ強度解析は、複合体の断面において平面保持の法則が成り立つとし、破壊時まで弾性的に挙動していくものと仮定した。なお、破壊時までには打込み型枠とコンクリートは十分に一体化しているものとする。解析に用いた材料の諸性能値は表1に示すとおりである。

3. 2 型枠材の応力状態

ヤング係数の異なる2つの材料で構成された複合体の中立軸の位置は、厳密にはヤング係数比、断面の形状や寸法によって決まるが、ここでは型枠部材の空洞部分は考慮せず、両材料の構成比(=型枠材厚/全断面厚)とヤング係数比を用いて検討を行った。

中立軸が複合体上部のコンクリート断面内にあれば、型枠部材の全断面は引張応力状態であり、型枠材中にあれば型枠断面は純曲げと引張の中間的な応力分布となる。図2に複合体の応力分布を示す。そこで、コンクリートとの界面における型枠側の応力と、型枠引張縁の応力の比を応力

表3 複合体の曲げ試験結果

試験体記号		材令	ひび割れ荷重 (kg)	曲げモーメント (kg・cm)
MF	1 T	3 日 28 日	1 9 0 2 4 5	2 3 7 5 3 0 6 3
	2 T	3 日 28 日	3 3 0 4 6 0	4 1 2 5 5 7 5 0
	3 T	3 日 28 日	6 8 0 8 0 0	8 5 0 0 1 0 0 0 0
MG	1 T	3 日 28 日	2 3 0 2 7 5	2 8 7 5 3 4 3 8
	2 T	3 日 28 日	4 0 0 6 1 0	5 0 0 0 7 6 3 1
	3 T	3 日 28 日	1 1 6 0 1 1 0 0	1 4 5 0 0 1 3 7 5 0
MT	1 T	3 日 28 日	2 3 0 2 6 0	2 8 7 5 3 2 5 0
	2 T	3 日 28 日	4 7 0 5 1 0	5 8 7 5 6 3 7 5
	3 T	3 日 28 日	8 0 0 7 4 0	1 0 0 0 0 9 2 5 0
MOR*	1 T	3 日 28 日	4 8 * 6 8 *	6 0 4 * 8 5 4 *
	2 T	3 日 28 日	1 0 9 * 1 5 4 *	1 3 5 8 * 1 9 2 1 *
	3 T	3 日 28 日	1 9 3 * 2 7 3 *	2 4 1 5 * 3 4 1 5 *

- ・表中の1 T、2 T、3 Tは打設モルタル厚さを表し、型枠材の厚さの1 倍(15mm)、2 倍(30mm)、3 倍(45mm)である。
- ・MOR* は、全断面モルタルとした場合の打設したモルタルの圧縮強度から求めた計算値である。

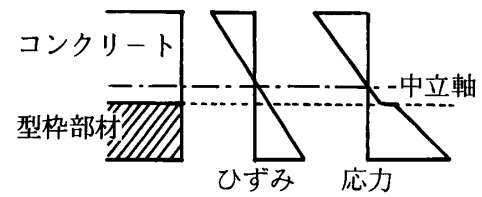
分布係数とすると、応力分布係数 μ は、複合体の構成比 β と全断面に対する中立軸比 λ を用いて次式のように与えられる。

$$\mu = \frac{1 - \lambda - \beta}{1 - \lambda} \quad (1)$$

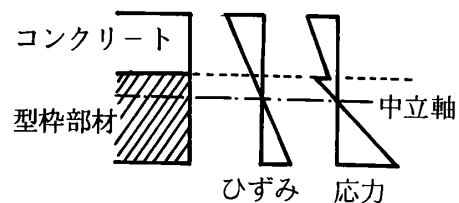
(1)式において β が限りなく0に近くなる場合、つまり複合体に占める型枠部材の構成比が極めて小さい場合は $\mu = 1$ となり、型枠の断面が一様に引張応力となることを示す。また、 $\beta = 1$ の時、つまり全断面が型枠材で占められている場合においては、型枠材の断面が曲げ応力状態になると考えられる。なお、ヤング係数比を一定として(1)式を構成比 β で計算すると、ヤング係数のとり方によっては、型枠材の引張縁近くに中立軸がくるような値が求められる場合もある。しかし、今回の解析では、3.1で述べたように型枠材の引張縁が先に破壊するパターンを仮定し検討していること、実際には純曲げの状態では引張縁よりも圧縮縁が破壊することはないこと等から、このような場合はないと考えた。

3.3 複合体の曲げ強度の検討

ここで、複合体の曲げ強度を検討するにあたり、以下に示す3種類の仮定に基づいた曲げモーメントをそれぞれ算定し、実験で得られたモーメントをこれらの値で基準化してその傾向について検討を行った。



a) コンクリート部分に中立軸がある場合



b) 型枠部分に中立軸がある場合

図2 複合体断面のひずみと応力分布

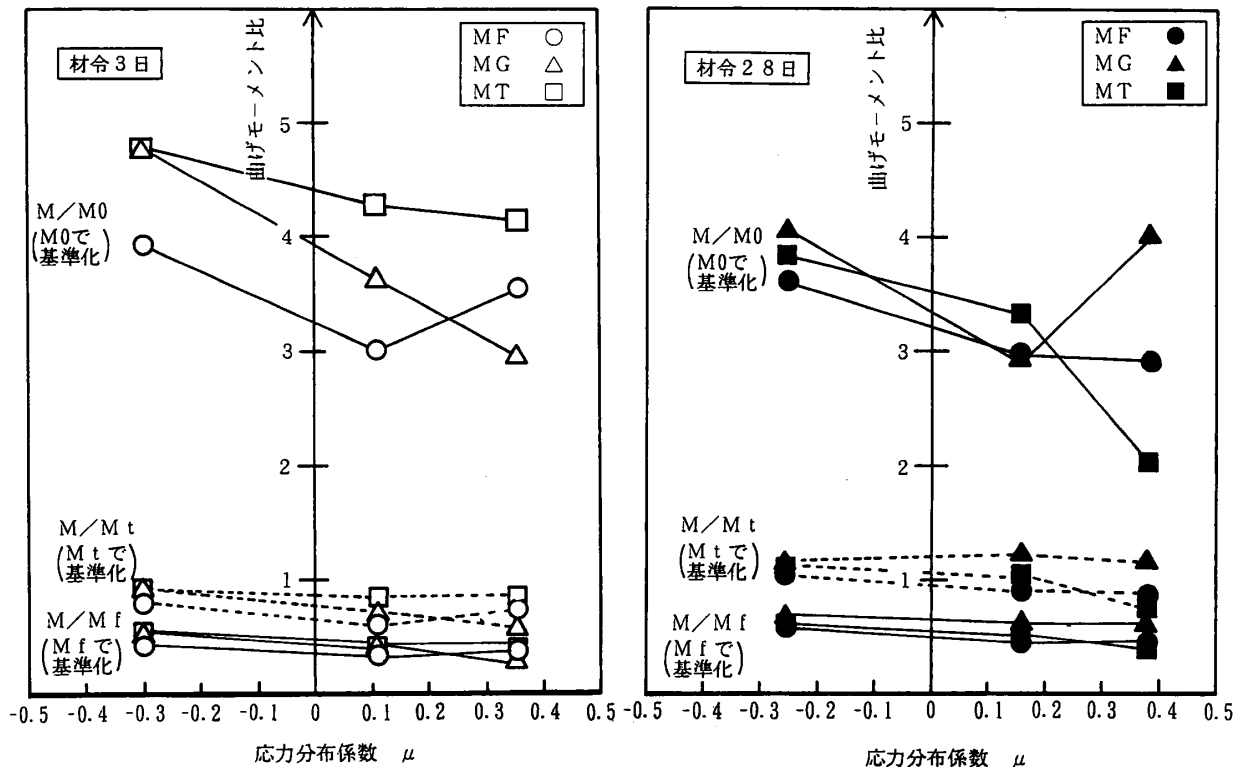


図3 応力分布係数 μ と曲げモーメント比との関係

(仮定)

- ① 全断面がコンクリートであると仮定した場合の曲げモーメント： M_0 。
- ② 全断面が型枠材であると仮定した場合の曲げモーメント： M_1 。
- ③ 型枠材の引張強度を用い、両材料の構成比、ヤング係数から算定した曲げモーメント： M_2 。

図3より、高曲げ強度型枠部材を複合することによってコンクリートのみとした場合のおよそ3倍以上の強度が得られるという結果を読みとることができる。全断面がコンクリートである場合および型枠材である場合としてモーメントを算定すると、コンクリートとした場合は小さく算定し、また、型枠材として算定した場合はかなり大きく算定する。複合体を構成する型枠材の応力状態は、曲げと引張の中間的な状態であることを考えると、同図に示しているとおり、型枠部材の引張強度を用いて複合体の曲げモーメントを算定したもののの方が実験値に近い値を示していると考えられる。

次に、図4に曲げ強度と係数 μ との関係を示す。図4(a)は複合体を単一の材料と仮定して算定したみかけの曲げ強度との関係を表し、同図(b)は複合体の引張縁の応力度との関係を示したものである。図4(a)、(b)中の破線は、今回の実験で使用した型枠部材の引張強度値と曲げ強度値を示している。同図(a)より、見かけの曲げ強度は、材令3日のもので型枠部材曲げ強度の $1/3$ 以上、材令28日のものについては約 $1/2$ 以上の曲げ強度となり、曲げ強度の高い部材を複合することにより、著しく高い強度が得られることを示している。同図(a)、(b)ともに型枠部材の応力分布が純引張状態に近くなるにしたがって、見かけの曲げ強度および複合体の引張縁の応力度は小さくなる傾向を示している。

図中の太線は、全断面が型枠部材とした場合の曲げ強度と、複合した型枠部材の断面が引張状態となった場合の引張強度を結んだもので、型枠部材とコンクリートとの付着状態が良好であると仮定した場合の複合体の曲げ強度の予測値である。

見かけの曲げ強度および複合体の引張縁の応力度は、この直線よりも小さくなっているが、概ねこの直線に平行するように分布している。また、型枠材の表面を図1に示したような凸型や凹型と加工した試験体の方が何も加工をしていない試験体よりも曲げ強度が予測値に近づいていることを考えると、複合体を構成している型枠部材とコンクリートとの接着状態を改善すること

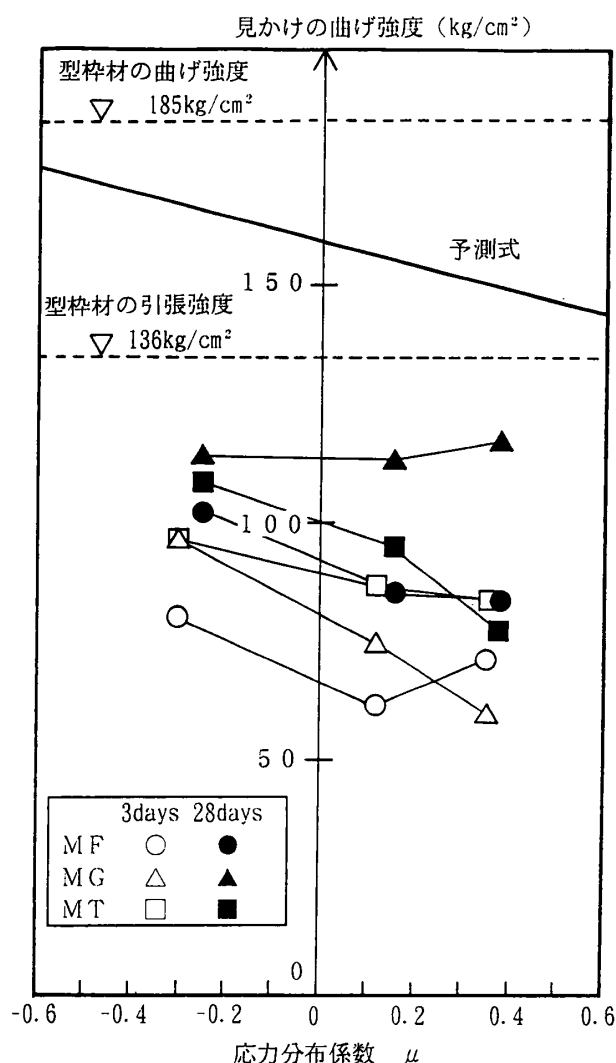


図4(a) 応力分布係数 μ と複合体の見かけの曲げ強度

によって、曲げ強度はこの太線、すなわち予測値に近づくものと考えられる。

4. まとめ

高い曲げ強度を有する押出成形部材とコンクリートとの複合体の曲げ試験を行い、両材料の構成比や、複合させる型枠部材の表面形状の影響および構成比が曲げ強度に与える影響について検討し、さらに曲げ強度について基礎的な解析を行った。これらの結果をまとめると、以下に示すとおりである。

- ①高曲げ強度部材を複合することによって、コンクリートの3～5倍の曲げ強度が得られた
- ②界面の型枠材表面を加工することにより、加工無しのものよりも強度は20～30%程度向上する
- ③型枠部材の引張縁先行破壊とした場合、複合した型枠材断面の応力状態は、曲げ引張の応力状態となっており、強度の評価をする際には型枠材の引張強度を用いた方が安全側に評価できる
- ④複合体の曲げ強度は、応力分布係数 μ がマイナスからプラスへ変化するに従い、つまり、型枠部材の応力分布が曲げから全断面引張へ移動するにしたがって、弱くなる傾向にある
- ⑤型枠部材とコンクリートとの接着状態を改善することは、複合体の曲げ強度を向上させる方法として有効である

謝辞

本研究は、建設省総合技術開発プロジェクト施工新技術の開発「建設事業における施工新技術の開発」（建築分野）の中に設置されている、型枠新材料評価WG（委員長：山本康弘博士）において実施されたものである。関係各位に感謝する。

参考文献

- 1]渡部嗣道、他4名：自動化適合型鉄筋コンクリート構法の開発(19) 床構法の開発（その3）ARC床構法の面外曲げ性能に関するモデル実験、日本建築学会（北陸）、pp817-818、1992.8
- 2]渡部嗣道、他2名：自動化適合型鉄筋コンクリート構法の開発(3) 型枠・鉄筋構工法の開発（その3）コンクリート系板補強複合材料の面外曲げ性状に関する一考察、日本建築学会（東北）、pp119-120、1991.9

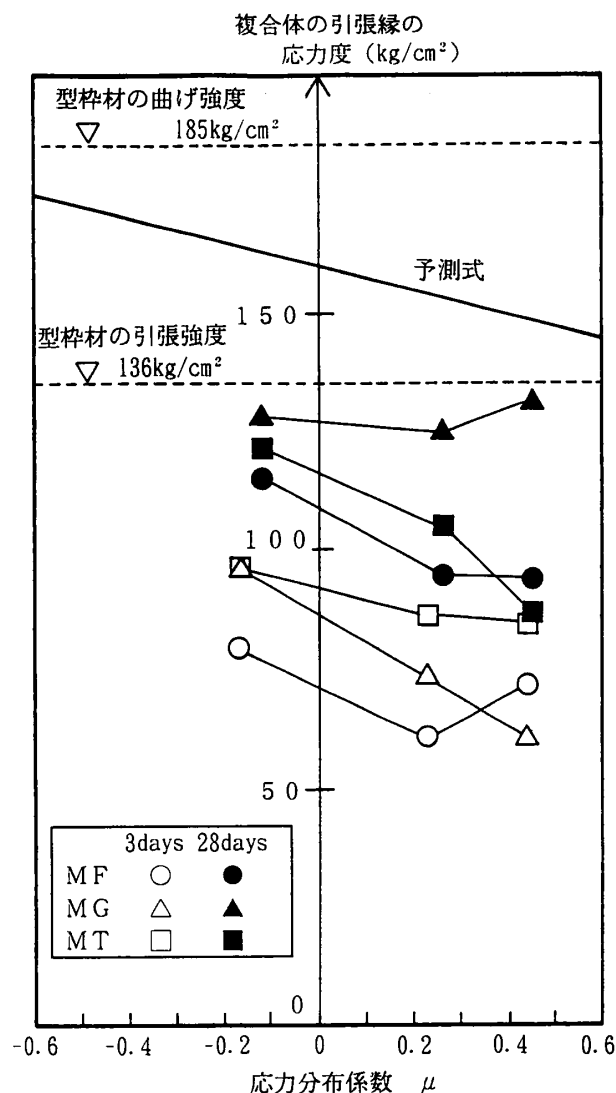


図4(b) 応力分布係数 μ と複合体の引張縁の応力度