空洞断面を有するセメント系押出成形部材の曲げ性状に関する実験的研究

AN EXPERIMENTAL STUDY ON FLEXURAL BEHAVIORS OF EXTRUDED
CEMENTITIOUS COMPONENTS WITH HOLLOW

眞方山 美穂*1, 馬場 明生*2, 守 明子*3, 堀口 昌利*4, 渡部 嗣道*5

*Miho MAKATAYAMA, Akio BABA, Akiko MORI,
Masatoshi HORIGUCHI and Tsugumichi WATANABE*

It is able to produce cementitious components with various sectional geometries, hollow, ribbed and so on, by extrusion moulding. This paper deals with a comprehensive experiment on the effect of hollow ratio in the area of extruded cementitious components on flexural strength by using chrysotile and hydrophilically treated polypropylene fiber. The following items are clarified.

- 1) First cracked flexural strength can be determined on the basis of cement water ratio theory or cement void ratio one regardless of hollow ratio.
- 2) Ductility after cracking is confirmed for hollow type composite using hydrophylically treated polypropylene fiber.

Keywords : *cementitious components, extrusion moulding, hollow type components,
first cracked flexural strength, ductility, equivalent flexural strength*

セメント系材料、押出成形、空洞断面部材、ひび割れ発生曲げ強度、靱性、換算曲げ強度

1. はじめに

現在、建設廃棄物の排出総量を低減するための取り組みが盛んに進められており、鉄筋コンクリート工事における打込み型枠工法は、その一つと捉えることができる。打込み型枠部材に用いる材料には、ガラス繊維や合成樹脂系混和材による高強度セメント系部材をはじめ、フラットデッキなどの鋼板等、様々な種類のものがあるが、セメント系押出成形部材は、曲げ比強度が大きい型枠部材の厚さを小さくすることが可能であり、またコンクリートとの一体性確保の点で有利な溝型やリブ付き断面形状とすることができるので、打込み型枠部材として適した材料である。

躯体の外皮を構成する打込み型枠部材にとって、曲げ強度は重要な性能であり、運搬・搬入時のみならずコンクリート打設時の施工荷重に対抗する安全性ならびに地震動時の構造安全性を考えると、面外曲げ強度が大きいことが望まれる。また、現場での施工のしやすさや大型の揚重機が使えない狭隘な敷地での施工を考えると、部材の軽量化が必要となってくる。

部材の軽量化を達成する方法としては、素材の曲げ強度を向上させ、断面を空洞化する方法がある。断面の空洞化による部材の軽量化については、守らの研究¹⁾の中で理論的な検討結果が報告されている。その一つに、外部形状を同一として部材の最大抵抗曲げモー

メント一定という条件の下で素材強度を2倍に改善した場合、部材の嵩密度は約25%と飛躍的に小さくできるという試算結果がある。これが実際の製造においても成り立つならば、部材の軽量化にあたって断面を空洞化することは非常に有効である。セメント系材料を対象とした場合、このような断面の空洞化は、押出成形法においてのみ可能な技術であり、材料調合を工夫して素材を高強度化し、空洞化などの適切な断面設計を行うことにより、高い曲げ比強度を実現することも可能と考えられる。

ここでは、材料条件、押出成形機の機械条件および試験条件等を変化させて得られた、空洞断面を有するセメント系押出成形部材の曲げ強度および靱性に関する包括的な一実験研究結果について報告する。ここで得られた成果は、部材断面を変化させた場合の強度性状を定量的に検討する際の基礎資料となるものである。

2. 既往の研究

押出成形法は、プラスチック材料や金属材料の加工において広く適用されている成形法であるので、これらの材料を対象とした製造特性に関する研究は数多く報告されている。一方、セメント系材料を対象にした押出成形に関する研究データは筆者らの知る限りにおいて極めて少なく、製造特性に関する研究^{2)~7)}、中実断面部材の

*1 独立行政法人建築研究所第4研究部 主任研究員・工修

*2 山口大学工学部感性デザイン工学科 教授・工博

*3 名古屋工業大学工学部社会開発工学科 教授・博士(工学)

*4 昭和電工建材(株)石岡工場生産・技術部 副主席

*5 山口大学工学部感性デザイン工学科 助手・工修

Senior Research Engineer, Building Research Institute, M. Eng.

Prof., Dept. of Perceptual Sciences and Design Engineering, Faculty of Engineering, Yamaguchi Univ., Dr. Eng.

Prof., Dept. of Architecture and Civil Engineering, Faculty of Engineering Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

Senior Research Engineer, Showa Denko Kenzai K.K.

Assist. Prof., Dept. of Perceptual Sciences and Design Engineering, Faculty of Engineering, Yamaguchi Univ., M. Eng.

曲げ性能に関する研究^{8), 9)}、ポリプロピレン短繊維を用いた部材の高靱性化メカニズムに関する研究¹⁰⁾、ならびに親水性化加工したポリプロピレン繊維により靱性を付与し、さらに部材厚さの影響について検討した研究¹¹⁾などがある。しかしながら、部材断面の空洞化に関しては、守らによる理論的な検討¹²⁾が報告されているにすぎず、空洞断面部材の実験的検討に関するデータは、筆者らが知る限りにおいて公表されていない。

部材断面の空洞化について理論的に整理されたデータが一般的になっていないこともあり、実機プラントにおいて断面形状を変更するに際しては、製品の形状のみならず、部材の力学的性能とも密接に関係している材料調査もあわせて試行錯誤的に検討し、所要の性能を得ているのが現状である。

3. 実験方法

3.1 モルタル試料

セメントには普通ポルトランドセメント (M 社製 (JIS R 5210)) を、細骨材には豊浦硅砂を用いた。セメント系材料の押出成形においては製造時の可塑性を確保するため、通常のもルタルを構成する材料の他に増粘剤および繊維質添加材が必要である。ここでは、増粘剤としてメチルセルロース (S 社製 90SH-4000) を、繊維質添加材としてセメント系材料の押出成形で標準的物質として筆者らが用いてきたクリソタイル 6D (JIS M 8602)ならびに押出成形において靱性付与が確認された繊維表面を親水性化加工したポリプロピレン繊維 (SD 社製、以下、親水性化 PP と記す。)を用いた。繊維質添加材の物性を Table 1 に、モルタル調合を Table 2 に示す。モルタルの水量比*は、クリソタイルを添加したモルタルについては 0.13, 0.15, 0.20, 0.25 の 4 水準とし、親水性化 PP を添加したモルタルについては 0.13, 0.15, 0.175 の 3 水準とした。

*ここで、水量比とは、使用材料のうちセメント、細骨材、水の総質量に対する水の質量比である。

3.2 押出成形実験

3.2.1 部材断面形状

Table 3 に部材の断面形状を示す。これまで筆者らはセメント系押出成形部材の曲げ性能に関する実験においては、部材幅 60mm を基本として部材厚さを 12mm、15mm、25mm とした中実断面の部材を成形し、試験を行ってきた。ここでは、部材断面の空洞率が曲げ強度に

及ぼす影響を明らかにするため、部材厚さを 25mm 一定とし、部材幅 60mm、100mm で空洞率を 0%、33.8%、および 45.0%とした。部材断面のシェルやウェブの厚さは、空洞部の形状が正方形とすることにより決めた。

3.2.2 押出成形工程と成形機械

押出成形の工程を Figure 1 に示す。各材料を強制ミキサーで混合した後、混練機 (ニーダ) で混練し、Table 4 に示す真空押出成形機を用いて所要の断面形状を有する部材を押し出した。なお、ここでは、60mm 幅の部材の成形にはバレル径 50mm の押出成形機を使用し、部材幅 100mm の部材の成形にはバレル径 75mm のものを使用した。

押出成形機には、混練された材料を給材する際にその量を調整する目的で、押出成形機のミルと真空脱気室の間に仕切りとして、「目皿」と呼ばれる丸い孔が空いた部品が取り付けられている。混練された材料の水量比が小さく、硬いものを押し出そうとした場合に、この目皿の孔の径によっては成形が困難になることがある。今回の部材成形においては、目皿は予め成形機にセットされていたものを使用することとし、部材幅 60mm については孔の大きな目皿を、部材幅 100mm については孔の小さい目皿を標準として実験を行った。なお、モルタル試料の水量比が小さい場合には、前述したように成形が困難となることも予想されるため、その時には目皿を交換できるよう準備をして、成形に取りかかることとした。

3.2.3 モルタル調合

本研究で押し出した曲げ強度測定用の供試体は、部材幅により繊維質添加材、空洞率および水量比の組み合わせが異なる。幅 60mm の部材のモルタル調合を Table 5(a)示す。繊維質添加材としてクリソタイルを用いた部材は、水量比 0.13、0.15、0.20 および 0.25 の 4 水準について、また親水性化 PP を用いた部材については水量比 0.15 の 1 水準について各空洞率の部材を成形した。幅 100mm の部材のモルタル調合を同表(b)に示す。クリソタイルを用いた部材は幅 60mm の部材と同じく水量比 0.13 から 0.25 の 4 水準について各空洞率の部材を成形した。親水性化 PP については、水量比 0.13 の空洞率 33.8%の部材を除いた、水量比 0.13、0.15 および 0.175 の 3 水準について各空洞率の部材を成形した。成形された供試体は、20℃の室内で 1 日封かん養生した後、20℃の水中で 28 日の材齢まで養生し、曲げ強度測定用供試体とした。

Table 1 Properties of fiber used in the experiments

Kind of fiber	Density (g/cm ³)	Diameter	Aspect ratio(-)	Tensile strength (MPa)	Young's Modulus (GPa)	Elongation (%)
Chrysotile	2.74	7 Å	—	1863	70-140	—
Polypropylene (Hydrophilic fiber)	0.91	17-19 μm	158-176	588	6.37	35-45

Table 2 Mix proportions of mortar used in the experiments

Kind of fiber	Sand cement ratio(s/c)	Water content ratio(-)	Water cement ratio(-)	Methylcellulose content ratio(-)	Fiber content ratio(-)
Chrysotile	1.00	0.13-0.25	0.299-0.667	0.01	0.05
Polypropylene (Hydrophilic fiber)	1.00	0.13-0.175	0.299-0.424	0.01	0.0166*1

(Note) *1 In case of Polypropylene, fiber volume is the same of Chrysotile.

3.3 曲げ試験

曲げ試験は Figure 2 に示すように単純支持、二等分点中央載荷とし、曲げスパン (L) は供試体厚さ (t) の 10 倍となるように設定した。載荷は、1mm/min の変位制御とし、荷重ならびに載荷点における変位 (δ) を測定した。得られた荷重-たわみ曲線からをひび割れ発生曲げ強度、終局曲げ強度および換算曲げ強度を算出した。終局曲げ強度は、ひび割れ発生後のいわゆる靱性を示す部分におけ

Figure 1 Flow chart for extrusion process and measuring points of some kinds of density

Table 3 Geometries of products in the experiments

Geometry of products (mm) (Hollow ratio %)	Shell thickness (mm)	Area of geometry of products (cm ²)
60x25	25	15.0
60x25 (33.8)	6	9.93
60x25 (45.0)	5	8.25
100x25	25	25.0
100x25 (33.8)	6	16.55
100x25 (45.0)	5	13.75

Table 4 Specifications of extruder used in the experiments

Maker	Model	Installed mortar (kw)	Conveying capacity (l/h)	Vacuum pump (l/min)	Barrel diameter (mm)
Honda	DE-50	0.75 (Pug-mill) 1.50 (Barrel)	12-25	60	50
Honda	DE-75D	0.75 (Pug-mill) 1.50 (Barrel)	15-40	60	75

Table 5(a) Experimental combinations between materials and geometries of products at barrel diameter 50mm

Kind of Fiber	Water content ratio(-)	Geometry of product (mm)		
		60x25 Solid	60x25 Hollow (33.8%)	60x25 Hollow (45.0%)
Chrysotile	0.13	○	○	○
	0.15	○	○	○
	0.20	○	○	○
	0.25	○	○	○
Polypropylene (Hydrophilic fiber)	0.13	—	—	—
	0.15	○	○	○
	0.175	—	—	—

る上に凸の荷重-たわみ曲線の極値より求めた。換算曲げ強度は、日本コンクリート工学協会「繊維補強コンクリートの試験方法に関する基準」¹³⁾に準拠し、たわみ (δ) がスパン (L) の 1/150 となるまでの荷重-たわみ曲線下の面積をこのたわみ量 (δ) で除して得られた平均荷重から算出した。

3.4 有効セメント水比

筆者らのこれまでの研究^{8), 9)}により、水量比により押出成形直後の供試体に含まれる空気量は異なっていること、また、この空気量が曲げ強度に影響を与えていることが明らかになっている。そこで、押出成形された部材の緻密化程度を把握するため、押出成形直後 (Figure 1 中の(2)) に試料を採取し、質量および寸法を測定した。それらの値から押出成形直後の表乾密度を算出した。その後、105°C のファン付き乾燥機にて恒量になるまで乾燥させ、再度質量を測定し、絶乾密度を算出した。求められた表乾密度と絶乾密度の差から成形直後の供試体中の水量比を求めた。

一方、各モルタル試料の密度から混合開始時のモルタルの表乾密度を算定し (Figure 1 中の(2))、設計密度とした。この設計密度と先に求めた成形直後の表乾密度との差から成形直後の供試体に含まれる空気量を算出した。

これらの方法で求められた空気量から、押出成形直後の部材の有効セメント水比を算定し、各種曲げ強度との関係を検討した。ここで有効セメント水比とは、Talbot のセメント空隙比説¹⁴⁾に基づいて押出成形後の供試体中に含まれる空気量を同体積の水として換算し、これを実際に成形された供試体中に含まれる水量に加えた値でセメント量を除して算出されるものである。

Figure 2 Flexural test apparatus

Table 5(b) Experimental combinations between materials and geometries of products at barrel diameter 75mm

Kind of Fiber	Water content ratio(-)	Geometry of product (mm)		
		100x25 Solid	100x25 Hollow (33.8%)	100x25 Hollow (45.0%)
Chrysotile	0.13	○	○	○
	0.15	○	○	○
	0.20	○	○	○
	0.25	○	○	○
Polypropylene (Hydrophilic fiber)	0.13	○	—	○
	0.15	○	○	○
	0.175	○	○	○

4. 実験結果および考察

4.1 荷重－たわみ曲線

Figure 3に空洞断面を有するクリソタイルを用いた部材の荷重－たわみ曲線の一例として、水量比 0.15、空洞率 0%、33.8%、45.0%の部材の結果を示す。同図より、部材幅および空洞率に関係なく全ての部材がひび割れ発生と同時に破断し、ひび割れ発生荷重は部材幅とは無関係に空洞率が大きいほど低下する傾向となっていることがわかる。ここには示していないが、同じ空洞率の部材と比較すると、水量比が小さいほど荷重は大きくなる傾向を示し、この関係は、これまでに筆者らが行った中実断面部材の実験結果¹⁰⁾と同様であった。

Figure 4に親水性化PPを用いた空洞断面部材の曲げ試験結果の一例として、水量比 0.15、空洞率 0%、33.8%、45.0%の部材の荷重－たわみ曲線を示す。同図より、親水性化PPを用いると部材断面を空洞化した部材についてもひび割れ発生の後、破断に至るまでたわみを生じており、靱性が付与されていることが確認できた。また、ひび割れ発生荷重は、断面の空洞率が大きいほど小さくなっており、この点はクリソタイルを用いた部材と同じ結果となった。当然のことながら、部材幅 100mmの方が幅 60mmの部材よりもひび割れ発生荷重は大きくなるが、幅 60mmの部材はひび割れ後においても荷重を保ちながら変形し続けており、部材幅が小さい方が変形性能は優れているという結果となった。

次に空洞率別に整理した荷重－たわみ曲線について、Figure 5に部材幅 60mmの結果を、Figure 6に部材幅 100mmの結果を示す。総じて水量比が小さいほど、ひび割れ発生曲げ荷重が大きくなる傾

向を示し、また、一部の水量比については実験データが揃っていないが、同じ空洞率の断面について比較すると、ひび割れ発生後の変形能力は水量比が大きい方が優れているという結果となった。特に、Figure 6に示した部材幅 100mmについては、水量比 0.175のひび割れ発生後の変形能力は他の水量比に比べて非常に大きくなった。終局荷重については、Figure 5に示す幅 60mmの部材は、水量比 0.15が最も大きくなった。幅 100mmの部材については、Figure 6に示すとおり空洞率 0%についてのみ水量比 0.175の終局荷重が非常に大きくなる結果を示したが、他の空洞断面部材については水量比に関係なく終局荷重はほぼ同じ程度となった。

4.2 ひび割れ発生曲げ強度

4.2.1 断面の空洞率とひび割れ発生曲げ強度

Figure 7にひび割れ発生曲げ強度と空洞率との関係を示す。同図(a)は、繊維質添加材としてクリソタイルを用いた部材の部材幅 60mmの結果、また、同図(b)は部材幅 100mmの結果である。部材幅 60mmについては、水量比 0.13のみ断面を空洞化することによって、ひび割れ発生曲げ強度の低下が認められたが、それ以外の部材は断面に占める空洞の割合が増えてもひび割れ発生曲げ強度の低下はほとんど見られない。部材幅 100mmについては、同図(b)を見る限りでは、全体的な傾向として、部材断面を空洞化することによって、ひび割れ発生曲げ強度は小さくなっている。しかしながら、その程度は水量比により異なっており、水量比 0.25の部材については空洞化によりひび割れ発生曲げ強度が低下する割合は僅かに小さくなる程度であるが、水量比が小さくなるとともに空洞断面部材と中実部材

Figure 3 Flexural load - deflection relationships (Chrysotile, water content ratio 0.15, 28days)

Figure 5 Flexural load - deflection relationships (Polypropylene, width 60mm, 28days)

Figure 4 Flexural load - deflection relationships (Polypropylene, water content ratio 0.15, 28days)

Figure 6 Flexural load - deflection relationships (Polypropylene, width 100mm, 28days)

のひび割れ発生曲げ強度の差は大きくなる傾向が認められた。

繊維質添加材として親水性化 PP を用いた部材の結果について、同図(c)に部材幅 60mm、(d)に同 100mm の結果を示す。部材幅 60mm については水量比 0.15 の 1 水準のみであるためこの結果のみですべての傾向を論じることはできないが、親水性化 PP を用いた部材の全体的な傾向として、幅が 60mm、100mm とともに同一水量比の場合、空洞化率増大に伴いひび割れ発生曲げ強度は低下し、水量比が大きいものほど、空洞率の増大に伴って曲げ強度が低下する割合は大きくなる傾向となった。

4.2.2 断面の空洞化による部材の緻密化傾向

4.2.2.1 押出成形直後における部材の空気量と水量

押出成形直後における部材の緻密化傾向を把握するために、「3.4 有効セメント水比」において述べた手順で部材に残存する空気量と水量を算出した。Figure 8 の上段に空気量、同図下段に設計時の水量に対する混練・成形工程において散逸した水量の割合を示す。同図(a)、(b)は繊維質添加材としてクリソタイルを、同図(c)、

(d)は親水性化 PP を用いた部材の結果である。なお、同図(a)に示すクリソタイルを用いた部材幅 60mm のシリーズに関して、空洞率 0% の水量比 0.15、0.20、および空洞率 45.0% の水量比 0.13 については、各測定値が適切に得られなかったため、図中にはプロットされていない。

同図(a)、(b)より、繊維質添加材としてクリソタイルを用いた部材において、部材幅 60mm、100mm とともに空気量の混入が認められたのは空洞率 0% の中実断面の部材のみであり、空洞率 33.8%、および 45.0% については部材中に空気はほとんどなかったという結果となった。また、この空洞率 0% の部材の空気量は、水量比が大きい方が小さくなる傾向を示すことがわかった。散逸した水の割合についても、空気量と同様に、水量比が大きくなるとともに小さくなる傾向にあることがわかった。これは、水量比が小さくなると部材を押し出す際の圧力が上昇し、摩擦により熱が発生し、水が蒸発しやすくなったことによるものと考えられる。また、散逸した水の割合は、部材の空洞率と反比例の関係となり、空洞率 0% の部材が最も大きくなった。この傾向は幅 60mm、100mm のいずれの部材とも共通した。

同図(c)、(d)より、押出成形直後の部材に含まれる空気量は、繊維質添加材として親水性化 PP を用いた部材の方がクリソタイルを用いた部材よりも大きくなる傾向にあることがわかる。同図(c)の部材幅 60mm については、空洞率 0% に部材の空気量が非常に小さくなり、クリソタイルの部材とは異なる傾向を示した。クリソタイルを用いた部材の場合は、全体的に水量比が大きくなるとともに空気量が小さくなる傾向となったが、同図 (d) に示す親水性化 PP の結果を見る限りは、この傾向は明らかではなく、水量比が 0.13 から 0.15 になる段階では空気量は減少しているが、さらに水量比が 0.175 になると空気量は一転して増大した。また、クリソタイルを用いた空洞断面部材については、いずれの水量比においても空気量はほぼ 0% であったが、同図(c)、(d)に示されたとおり親水性化 PP については非常に高い割合で部材中に空気が含まれているという結果となった。散逸した水量については、幅 60mm の部材はほぼ 0% という結果となったが、幅 100mm の部材は水量比が大きくなるほど減少する傾向にあり、この点については、クリソタイルを用いた部材と同じ傾向で

Figure 7 Relationships between first cracked flexural strength and hollow ratio (28days)

Figure 8 Results of air content ratio and water reducing ratio after extrusion to design

あった。

以上の結果より、混練・成形工程で散逸する水量や空気の入混量は断面の空洞率によって違いがあり、散逸する水の割合が大きい中実断面は混入する空気量も大きく、また散逸する水の割合が小さい空洞断面は混入する空気はほとんどないということがわかった。

4.2.2.2 水量比と表乾密度

Figure 9 に水量比と表乾密度との関係を示す。同図より、いずれの調合、断面形状においても、水量比が大きくなるとともに表乾密度が小さくなっている。しかしながら、同図において水量比毎に空洞率による表乾密度を比較した場合、空洞率が異なっても表乾密度の値には大きな差は認められず、この図から空洞率による表乾密度の影響を見出すことはできなかった。

4.2.2.3 調合設計時と押出直後の水セメント比

Figure 10 に Talbot のセメント空隙比説¹⁴⁾に基づいて算出した有効水セメント比と水量比との関係を示す。なお、同図中の実線は、調合設計時の水セメント比である。同図(a)より、クリソタイルを用いた部材は、有効水セメント比が調合設計時のものに比べて小さくなっており、これは成形工程における散逸する水の割合が大きいためであると考えられる。同図(b)に親水性化 PP の結果を示すが、水量比 0.13、0.15 についてはほぼ設計時の水セメント比と同じであったが、水量比 0.175 については散逸する水量の割合に対して混入する空気量が多くなったため、設計段階の水セメント比よりも有効

水セメント比が大きくなったと考えられる。

これらの結果より、本研究で成形した部材の調合および断面形状の範囲において、クリソタイルを用いた部材は水量比に関係なく緻密化されやすいこと、また、親水性化 PP を用いた部材は水量比が大きくなると緻密化されにくい傾向にあることがわかった。なお、前項同様に、有効水セメント比においても部材断面の空洞化による水セメント比の差を認めることはできなかった。

4.2.2.4 繊維質添加材とひび割れ発生曲げ強度

クリソタイルと親水性化 PP を用いた部材のひび割れ発生曲げ強度を、同一水量比・同一断面形状について比較すると、全体的にクリソタイルの方が強度は大きい。一般的に、ひび割れが発生するまでの繊維とマトリックスとが弾性的に挙動する領域では、ひび割れ発生時の強度は繊維の量や繊維の弾性係数の影響を受け、弾性係数の大きな繊維を用いた部材の方が強度は大きくなるとされているが、新素材繊維を用いたセメント系押出成形部材の既往の研究⁴⁾では、必ずしもこのような結果とはなっておらず、弾性係数が大きな繊維を用いても結果として部材が緻密化されず、強度は向上しなかったという結果が出ている。今回用いた親水性化 PP の弾性係数はクリソタイルに比べて小さいが、Figure 8 に示すとおり空気の入混量も大きく、緻密化の程度も低いという結果出ており、親水性化 PP のひび割れ発生曲げ強度がクリソタイルを下回った要因としては、緻密化の程度が大きく影響しているものと考えられる。

4.2.3 有効セメント水比とひび割れ発生曲げ強度

4.2.3.1 有効セメント水比とひび割れ発生曲げ強度

Figure 11 に有効セメント水比とひび割れ発生曲げ強度との関係を示す。同図(a)は繊維質添加材としてクリソタイルを、同図(b)は同様に親水性化 PP を用いたものである。

同図(a)より、クリソタイルを用いた部材の幅 60mm および 100mm の空洞率 0% の部材、高セメント水比領域を除いた幅 60mm の空洞断面部材、および低セメント水比領域にある幅 100mm の空洞断面部材のひび割れ発生曲げ強度については、有効セメント水比と一つの直線関係となることが明らかとなった。なお、部材幅 100mm の空洞断面部材については、セメント水比が大きくなっても、すなわち水量比が小さくなってもひび割れ発生強度は向上せず、強度発現が困難な傾向にあり、他とは若干異なる結果となった。

同図(b)より、親水性化 PP を用いた部材については、部材幅には関係なく、ひび割れ発生曲げ強度は有効セメント水比と直線関係にあることがわかったが、その関係は唯一ではなく、中実部材と断面空洞部材とはそれぞれ異なっていることがわかった。

4.2.3.2 ひび割れ発生曲げ強度に及ぼす成形工程の要因

押出成形では製造機械の特性を考慮せずに工程を進めていくと、材料調合と機械特性の相互のバランスが崩れ、押し出された部材の表面には、波打ちやひび割れといった欠陥が生じる。今回の成形した部材に関しては、外見的にこのような欠陥は観察されなかった。

しかしながら、幅 100mm の部材を成形するとき材料の押し出しが困難となる状態となった。今回の成形にあたっては材料の押し出し易さを考慮して実験計画を立てたが、クリソタイルを用いた幅

Figure 9 Relationships between water content ratio and surface dry density (after extrusion)

Figure 10 Effective water cement ratio and design one

100mm の部材を成形する際に給材不足の傾向となり、水量比が最も小さい0.13の部材については、成形途中で材料が閉塞した。この原因として考えられるのが、材料の給材を調整する「目皿」であった。

「3.2.2 押出成形工程と成形機械」で記述したとおり、幅 60mm と 100mm では使用した成形機は異なり、幅 100mm の部材についてはもともと成形にセットされていた孔の径が小さいタイプの目皿を使用した。そのため、水量比が小さい材料の成形時に閉塞したと考えられる。その後、すぐに径の大きな目皿に交換し、成形を続けることができた。親水性化 PP の幅 100mm の部材についてはこの後に成形したので、このような問題は起こらなかった。

Figure11(a)に示したクリソタイルの幅 100mm の空洞断面部材について、ひび割れ発生曲げ強度は有効セメント水比が大きくなっても横這い、もしくは若干低下するという傾向であったのに対して、同図(b)の親水性化 PP では有効セメント水比の増大とともにひび割れ発生曲げ強度は向上するという結果となった。このような差が出た要因として、成形工程での「目皿」の影響があったものと考えられる。

4.2.3.3 ひび割れ発生曲げ強度に及ぼすバレル径と部材幅の関係

フレッシュなモルタル試料は、押出成形のバレル内のスクリーによって加圧され、塑性加工されながら所定の断面形状の部材になる。部材幅 100mm についてはバレル径 75mm の押出成形機を、幅 60mm についてはバレル径 50mm のものを使用しており、成形時における材料の形状の変化、つまりモルタル試料がバレルから部材幅方向に引き伸ばされる割合は、部材幅 100mm についてはバレル径の 1.33 倍、同 60mm についてはバレル径の 1.2 倍である。

Figure11 を見る限りでは、ひび割れ発生曲げ強度に及ぼす部材幅、およびバレル径と部材幅との比の影響は小さいと考えられる。

しかしながら、空洞断面部材で部材の幅が大きくなると、成形機の見皿等をはじめとする機械特性を適切に管理していなければ、成形が困難となることが起こり、強度の低下を引き起こすなどの問題

Figure 11 Relationships between first cracked flexural strength and effective cement water ratio (28days)

が発生しやすくなるものと考えられる。

4.2.3.4 ひび割れ発生曲げ強度の推定

クリソタイルを用いた部材では、空洞断面部材であっても、ひび割れ発生曲げ強度は有効セメント水比で概ね予測できることがわかった。一方、親水性化 PP を用いた部材のひび割れ発生曲げ強度は、空洞断面部材の方が同一水量比の中実部材の強度よりも小さくなり、中実部材と空洞断面部材とでそれぞれに有効セメント水比とひび割れ発生曲げ強度との関係が成立するという結果となった。

ポリプロピレン繊維は、弾性係数が基材であるモルタルに比べて小さいので、ひび割れ発生曲げ強度の向上よりも、ひび割れを分散させる効果の方が大きいと言われている。今回の部材についても、小さなひび割れを分散させながら荷重は増大していったと考えられる。ここで成形した空洞断面部材のフェイスシェル厚さは、空洞率 45.0%で 5mm、同 33.8%で 6mm である。空洞断面ではフェイスシェルが極めて薄いため、微細なひび割れが繊維の位置で捕捉されず、容易に空洞部まで貫通し、それが部材の挙動を決定的なものとする部材のひび割れになったと考えられる。

筆者らの既往の研究¹¹⁾において、中実断面部材であれば部材厚さが 12mm あるいは 25mm であっても、ひび割れ発生曲げ強度はほぼ等しいと言う結果を得ている。今回の結果のみでは強度低下を起こさない部材厚さを推定することはできないが、部材設計をおこなうために、今後、この点についての検討が必要と考えられる。

4.3 換算曲げ強度と曲げ比強度

繊維質添加材としてクリソタイル、ならびに塑性付与が確認された親水性化 PP を用いた部材の換算曲げ強度と水量比との関係を Figure 12 に示す。同図(a)は部材幅 60mm、(b)は部材幅 100mm における結果である。同図(a)および(b)より、クリソタイルを用いたセメント系押出成形部材のひび割れ発生曲げ強度は一般のセメント系部材と比較して非常に大きい値を示すものの、換算曲げ強度を算定すると、親水性化 PP のおよそ半分程度と小さく評価されることがわかる。また親水性化 PP の空洞率 45.0%の部材は、水量比が高くなると換算曲げ強度が低下する傾向を見せるが、全般的に水量比の増大とともに大きくなる傾向を示した。空洞率の影響については、同一水量比で比較すると換算曲げ強度は空洞率が大きいほど小さくなり、この点は、ひび割れ発生曲げ強度の場合と同様となった。なお、幅 60mm の空洞断面部材と幅 100mm の部材とを比較すると、僅かではあるが部材幅が小さい方が換算曲げ強度は大きくなっているが、これは、「4.1 荷重-たわみ曲線」において述べたように、部材幅 60mm の方が 100mm よりもひび割れ発生後の変形性能が優れ、変形に伴う荷重の低下が緩やかであったことによると考えられる。

繊維質添加材としてクリソタイルを用いた幅 60mm の部材について、水量比 0.13 を除いた部材のひび割れ発生曲げ強度を部材の嵩密度で除して得られた曲げ比強度を Figure 13 に示す。同図より、空洞率 33.8%の部材にあっては空洞率 0%の部材の約 1.5 倍、空洞率 45.0%については約 1.8 倍に向上するという結果が得られた。これまでは部材断面の空洞化による曲げ比強度の向上は理論的な検討結果のみが報告されていたが、本研究において実験的に確認することができた。

Figure 12 Relationships between equivalent flexural strength and water content ratio (28days)

Figure 13 Relationships between effective cement water ratio and flexural strength ratio of hollow to solid (First cracked flexural strength, 28days)

5. まとめ

セメント系押出成形部材の断面を空洞化することによる曲げ性能について実験的検討を行った。その結果、以下の点が明らかになった。

- 1) 繊維質添加材としてクリソタイルを用いたセメント系押出成形部材のひび割れ発生曲げ強度は、断面形状に関係なく有効セメント水比と直線関係になり、強度は有効セメント水比により予測できる。
- 2) 繊維質添加材として親水性化ポリプロピレンを用いたセメント系押出成形部材のひび割れ発生曲げ強度は、有効セメント水比と直線関係となる。しかし、クリソタイルを用いた部材とは異なり、中実断面部材と空洞断面部材とでそれらの関係は異なる。
- 3) ひび割れ発生強度に及ぼす部材幅の影響は小さい。
- 4) 靱性付与が確認された親水性化ポリプロピレンを用いると、クリソタイルを用いた部材に比べて換算曲げ強度は飛躍的に向上する。また、断面の空洞率が大きくなると換算曲げ強度は小さくなる。

なお、今後は部材を構成する各種材料のヤング係数等の材料特性値とひび割れ発生曲げ強度の関係について取りまとめる予定である。

【謝辞】

本報告は、(社)建築研究振興協会「コストダウン構工法研究委員会(馬場明生委員長)」において実施された研究成果の一部を取りまとめたものである。本研究の遂行にあたり、(株)日本製鋼所 時久昌吉氏、林 政枝氏、昭和電工(株) 松永豊治氏および黒住忠利氏に協力を頂いた。記して謝意を表す。

【参考文献】

- [1] Mori A., Baba A. and Matsufuji Y. ; An Application of High Strength Extruded Cementitious Materials to Automation - Oriented Reinforced Concrete Buildings, Proceedings of the Third International Symposium on NOTEWORTHY APPLICATIONS IN CONCRETE PREFABICATION, Singapore, pp.111~118, 1992.7
- [2] 守 明子、馬場明生；セメント系建築材料の押出成形における製造プロセス制御方法の開発、日本建築学会構造系論文集、No.456、pp.1~10、1994.2
- [3] 守 明子、馬場明生；一面剪断試験によるセメント系建築材料

の押出成形性の評価方法、日本建築学会構造系論文集、No.461、pp.1~10、1994.7

- [4] 守 明子、馬場明生；新素材繊維を混入したセメント系材料の押出成形性、日本建築学会構造系論文集、No.484、pp.1~6、1996.6
- [5] 馬場明生、守 明子；セメント系材料の押出成形における成形圧力を予測するためのダイ開口形状の幾何学的評価方法の提案、日本建築学会構造系論文集、No.501、pp.1~6、1997.11
- [6] 馬場明生、守 明子、堀口昌利；セメント系押出成形部材のプロセス制御システムの開発、日本建築学会構造系論文集、No.513、pp.1~8、1998.11
- [7] 堀口昌利、馬場明生、守 明子；押出成形のためのプロセス制御システムの各種セメント系材料への適用性、日本建築学会構造系論文集、No.523、pp.1~8、1999.9
- [8] 守 明子、馬場明生；押出成形により製造されるセメント系建築材料の曲げ強度決定要因、日本建築学会構造系論文集、No.456、pp.11~19、1994.2
- [9] 馬場明生、守 明子；新素材繊維を混入したセメント系材料の押出成形による緻密化と曲げ強度、日本建築学会構造系論文集、No.486、pp.1~8、1996.8
- [10] 山田寛次、三橋博三；ポリプロピレン短繊維補強セメント系押出成形材料の高靱性化のメカニズムに関する考察、日本建築学会構造系論文集、No.520、pp.1~8、1999.6
- [11] 眞方山美穂、馬場明生、守 明子、堀口昌利、渡部嗣道；セメント系押出成形部材の曲げ強度および靱性に及ぼす割合および部材厚さに関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No.527、pp.1~8、2000.1
- [12] 守 明子、馬場明生、渡部嗣道；薄肉打込み型枠材料の工場生産技術の開発(その3 押出成形部材の断面設計 中空断面) 自動化適合型鉄筋コンクリート構法の開発(23)、日本建築学会大会学術講演梗概集、北陸、1992.8
- [13] 繊維補強コンクリートの試験方法に関する基準、JCI-SF-4、日本コンクリート工学協会
- [14] Talbot and Richard ; Bull,137, Univ. of Illinois, Engineering Experiment Station, 1923

(2000年7月10日原稿受理、2000年12月21日採用決定)