特集1

現在のアスベスト問題－環境負荷の低減のために－

アスベスト代替技術開発
－セメント系押出成形建材－

神 尾 典*

キーワード：アスベスト代替技術，無石棉化，補強繊維，押出成形，セメント系建材

1. はじめに

モルタルやコンクリートは元来、引張りや曲げ強度に弱い脆性材料であるため、鉄筋や各種の繊維などの複合によって強化する方法がとられている。

従来、セメント系建材の繊維複合強化材として石綿繊維が主力をなしてきたが、健康障害防止を目的に1986年のILO(国際労働機関)総会で「石綿の利用における安全に関する条約」が採択された。

過去の石綿の世界産出量を調べると、1978年には年産550万トンを超え、国別産出量はソ連がトップで次にカナダ、南アフリカ、ジンバブエ、ブラジル、イタリア、中国と続き、これらで95%を占めていたという。わが国の輸入量は1985年に約28万トンで内60%は石綿スレートに消費され、ついでケイ酸カルシウム板、押出板等の建材、また石綿紙や紡織品、摩擦材に使用されていた。

したがって、わが国の関連業界では、石綿含有率の低減化の自主規制ならびに無石棉化の対策が盛んに進められてきた。しかしながら、表1に示すように石綿代替繊維はいずれも石綿繊維の性状とは異なり、従来の製品に比較して、成形性や物性の低下が避けられず、コストの問題を含めて普及していく上での課題を残している。

石綿輸入量の大半は建築関係に使用されていたと言われているが、その理由として、石綿が持つ以下の優れた諸特性があるからである。

- ・引張り強さがきわめて大きい(高抗張力)
- ・表面積が大きくセメント等との密着性に優れている(親和性)
- ・燃えないで高温に耐える(不燃・耐熱性)

- ・酸、アルカリ等の薬品に侵され難い(耐薬品性)
- ・腐らないで変質し難い(耐久性・耐候性)
- ・柔軟でかつ摩耗に耐える(耐摩耗性)
- ・他の繊維に比べて安価である(経済性)

このように物理的、化学的性質を持ちマトリックスの補強繊維として他にみられない多くの有用性を持っている¹⁾。一方、近年ますます建造物のプレハブ化が進み、多くのサイディング材が生産されるようになった。その製造方法は、型枠流し込み成形法、加圧成形法、抄造法さらに押出成形法などがあるが、中でも押出成形法は中空構造や異形断面形状の設計が任意であり、長尺な製品の成形に用いられ、生産性の高い成形法である。押出成形建材は1971年に(株)ノザワが開発、「アスロック」の商品名で販売したのが最初であるが、新規企業の参入に伴い販売実績も前年度比15～20%増の着実な伸びを示してきた。現在の押出建材はビルや工場・倉庫などの外壁材が中心であるが、一般住宅にも普及するに至っている。耐火、耐震、遮音性に優れるだけでなく、乾式工法により施工が容易で工期短縮できることが評価されたことや、同じ乾式外壁材のALCよりも強度、耐水性が高く、デザイン性に優れていることも好調な要因となっておりALCの市場規模以下ではあるが、成長率はALCを上回っており、今後の市場拡大が注目されている建材である²⁾。

ここでは、無石棉化建材について、代替繊維を用いたセメント系押出建材の製造法の研究を行い、上記の諸問題である繊維の分散性、配向性、成形性及び物性を改善する2～3の方法を試みた結果の概要を紹介する。

The asbestos alternative technology-Cement system extrusion building material-

* ケイテック研究所 Tsukasa KAMIO

表1 抄造製品及び製造面からみた各種補強繊維の比較¹⁾

期待する性能 または必要性能	石綿	代替繊維									
		耐アルカリ ガラス	E グ ラス	ビニ ロン	パルプ	サイ ザル	ナイ ロン	カー ボン	ロック	スラグ	ワラスト ナイト
寸法安定性					×	×					
曲げ強度	◎	△	×	○	○	○	△	△	×	×	×
衝撃強度	△	◎	×	◎	△	△	◎	◎	×	×	×
耐水性	◎	◎	◎	◎	×～△	△	◎	◎	◎	◎	◎
耐アルカリ性	◎	◎	×	◎	△	△	◎	◎	×	×	◎
耐薬品性	◎	△	△	◎	△	△	◎	◎	△	△	◎
防火性	◎	◎	◎	×	×	×	×	◎	◎	◎	◎
不燃性	◎	◎	◎	×	×	×	×	◎	△	△	◎
親水性	◎	×	×	◎	◎	◎	×	×	△	△	◎
濾水性	○	◎	◎	◎	△	△	◎	◎	△	△	△
抄造性	◎	×～△	×～△	△～○	○	○	△～○	×～△	×～△	×～△	△
価 格	◎	△	△	△	◎	◎	△	×	◎	◎	◎
円／kg	50～ 100	500～ 700	300～ 400	550～ 650	80～ 90	120～ 150	400～ 500	3000～ 25000			70～ 100
技術的可能添加 量 max%	40	3	3	3	15	15	3	3	5	5	15
不燃性からみた 可能添加量 max%	40	3	3	2	7	7	2	3	5	5	15

*この表はマトリックスとして、セメント、(ケイ酸カルシウム)、スラグ石膏を使用した時
◎…同等もしくはそれ以上の性能を持つ代替繊維 ◎…石綿同様親和性がある代替繊維
○…やや劣るが代替品として採用可能な代替繊維 ◎…代替性のある繊維
△…劣る代替繊維
×…かなり劣る代替繊維

2. 繊維強化複合理論（力学的物性の複合則）

繊維強化セメントの製造において最も重要な要因は、空激率を増大させずに、いかに繊維の含有量を多くして補強効果を得るかということと、繊維の方向性である。一般的な流し込み成形法では繊維は3次元ランダムに並ぶため、その補強効果は小さいものとなる。しかし二次元法から一次元連続に繊維を配向することにより補強効果を大きく増加させることができる。したがって、製品の性能は同じ繊維の含有率でも製造方法により全く異なる。このことは繊維強化理論式で算出してみると表2のような傾向を示すことがわかる。なお、理論式及び定数にはいくつかの前提があるため曲げ強度の絶対値は実際より異なるが相対的には強度の傾向を認識できるものと思われる。

表2 繊維複合強化の傾向

	繊維の分散状態	複合成型法	曲げ強度 (kg/cm ³)
			Vm=0.9 Vf=0.1
1		短繊維混合 (流し込み成形)	134
2		短繊維混合 (積層流し込み成形)	232
3		短繊維混合 (抄造法)	304
4		短繊維混合 (成形法未開発)	448
5		長繊維混合 (九工試式押出成形)	828
6		長繊維混合 (有機ポリマー含浸)	1090～ 2180

Vm：複合材単位断面積中のマトリックスの占める面積
Vf：複合材単位断面積中の繊維の占める面積

3. 無石棉化の考えとその対策

(1) 無石棉化の条件

- ・ 現有設備をそのまま活用する
- ・ 原料面で経済的負担をかけない
- ・ 生産能率を減少させない
- ・ 製品の物性を低下させない

(2) 押出成形における石綿の果たす役割

- ・ 押出原料組成物（分散性、保水性）
- ・ 押出成形（滑性、流動性の付与、亀裂防止材）
- ・ 押出成形品（繊維強化材、耐火材、保形性の保有）

(3) 無石棉化の対策・改善

上記のように大別できるが、これら多くの性質を有する石綿を他の単一繊維で代替することは不可能である。したがって幾種類かの材料の組合せで限りなく石綿の性質に近づける探究（ノウハウ）が必要である。例えば、微粒粉末（流動性）、マイカ（保水性）、合成繊維、パルプ繊維、炭素繊維（強化材、保形性、亀裂防止材、耐火性）の組合せ等が考えられる。

4. 実験の方法と結果

押出成形は他の成形方法に比べて、水／セメント比が小さく、また増粘剤などの使用が不可欠なため、石綿繊維以外の各種代替繊維を使用した場合、共通していえることは繊維の分散性が問題となる。繊維の分散性が悪いと押出成形性が悪く（圧力上昇・速度低下）、安定した成形ができない、またファイバボールの発生で補強効果が低減し、かつ成形体の表面が荒れて製品にならない。これらの解決法がまず先決である。

4.1 微小繊維複合強化の適用性³⁾

セメント系に使用する各種繊維は、一般的に数mm～二十数mmのチョップド繊維を原料とプリミックスの状態で複合化する。

繊維の種類や添加量にもよるが、ファイバボールが生じ均一分散ができず悪影響を及ぼすとすれば繊維の長さを短くする方法、即ち、パルプ繊維に激しい機械的衝撃を加えて、フィブリル化することによって得られるもので、この微小フィブリル化繊維は、平均径 $0.1\mu\text{m}$ で長さ $10\sim 40\mu\text{m}$ と $700\sim 800\mu\text{m}$ の2種類を試作し、押出成形を試みた。比較のため市販の長さ3mmパルプ繊維と

石綿繊維を用いた。その結果を図-1に示す。

成形圧力は繊維の添加量が増すにつれそれぞれ上昇する傾向にあるが、3mmのパルプ繊維は微小繊維に比べて高く、また成形体の曲げ強度は3mmのパルプ繊維に比べて微小繊維が効果的であることが判った。

このことは分散性の悪いパルプ繊維を微小繊維にすることによって改善し、また微小繊維のアスペクト比(L/D)が影響したものと思われる。微小繊維は成形体表面の平滑性も著しく改善できる。

4.2 粉殻粉末複合強化の適用性⁴⁾

粉殻を焼成して得られる灰はケイ酸が主成分であり、工業原料として利用することが知られている。粉殻粉末そのものの利用としては、これまで主に燃料、家畜肥料または各種のフィラーとして用いられてきた。一方、粉殻の構造は緻密でかつ多

図-1 微小繊維補強による成形性と物性

くの組織から構成されている。電子顕微鏡で観察すると、魚の骨の形をした繊維質や保水性に適したフレーク状の物質などを見出すことができる。

本実験は、その2つの点に着目し、繊維質を補強材として、またフレーク状の物質を押出原料の保水材（現在使用している増粘剤の役割の一部）に適用が可能か否か試みた。予備実験の結果から、粗穀繊維での補強は顕著な効果が得られなかった。また、フレーク状の保水性については、押出原料に不可欠な増粘剤を低減できるほどの期待した効果は得ることができなかった。しかしながら図-2に示すようにパルプ繊維と粗穀粉末を併用することによって、押出成形性を改善することができ、さらに、粗穀粉末の添加は押出成形体の表面荒れを著しく平滑に改善する効果的な素材であることが判った。使用する粗穀粉末の粒径は微細であるほどその効果は大きく、パルプ繊維2.5%添加によるファイバーボールの表面荒れは粗穀粉末3%を加えることで石綿繊維を使用したものと同様な表面平滑な成形体を得られる。しかし粗穀粉末の粒径が $300\mu\text{m}$ より大となると、それなりに成形体表面がざらつく。これらの理由については明らかにするに至っていないが、パルプ繊維に比べて粗穀粉末の吸水率が小さく、適度な保水性を有し、他の押出原料との混合・分散を助長し、また押出成形機のシリンダー内側面と原料間の摩擦抵抗を低減するスキン相を形成することなどによるものと考えられる。

4.3 マイカの複合強化適用性³⁾

天然マイカ（雲母）は複雑なケイ酸アルミニウム系の鉱物であり、古くから電気絶縁材料として使用されてきた。偏平状マイカはプラスチックの強度、弾性率などの物性を大幅に改良し、また、反りのない寸法精度の優れた製品を得ることができるため、最近ではセメント系建材にも使用されている。押出建材へ適用する着眼点は、マイカの偏平粒子が押出成形によって流れ方向に配向することを利用し、ファイバーボールの生じやすい石綿代替繊維を随伴させることにあり、その実験の結果を図-3に示す。

押出成形性については、マイカ及びビニロン繊維単独の場合、添加量を増すに従い成形圧力は上昇し、速度は低下する傾向にあるが圧力上昇の差

図-2 粗穀粉末の配合による成形性と物性

はマイカが大きい。これは一定の含水率によるマイカとビニロン繊維の表面積の差によるものと思われる。またマイカとビニロン繊維を併用したものは、それぞれ単独の場合と異なり、押出圧力はマイカ及びビニロン繊維単独の圧力と相殺され速

図-3 ビニロン繊維とマイカの配合による成形性と物性

表3 各種繊維複合の実用性

1. 有機繊維
一般にコンクリートに比べて繊維の弾性率が小さいが、靱性を与えたり、耐衝撃性を高める。ビニロン繊維は高弾性で伸びが小さく親水性に優れた繊維の開発で、これまでのイメージを変えている。
2. 金属繊維
均一混合分散が問題。繊維がからみ合ってボール状となる。この現象はアスペクト比(繊維長/繊維径)に関係し、アスペクト比60以下が好ましい。また、混入量が多いと混合が困難で4 vol%程度が限度、実用的には2 vol%である。
3. 耐アルカリ性ガラス繊維
スプレーサクシオン法が最も効果的であるが、耐アルカリ性といっても完全ではなく、徐々に侵されて強度を低下させる。また、短繊維では十分な脆性改善は困難である。
4. 炭素繊維
弾性率と引張り強さは銅や石綿とほぼ等しく熱にも強い。高価であるため一般的使用が待たれているが、優れた性能のセメント系複合材料が可能となろう。マトリックスとの接着性に若干難点があるようである。
5. パルプ
安価であるが、分散性が悪くボール状となる。引張り強さが小さく補強の面で難点がある。しかし、軽量化と釘打加工性に効果がある。

度の急激な変化はみられず安定した成形性を示している。一方、曲げ強度はマイカ及びビニロン単独の強度と比較して併用した場合の強度は著しく上昇していることが判る。これは押出成形によりマイカが配向しながら周辺のビニロン繊維を随伴し、繊維が一方向的に配向するためであり、成形体内部組織の電子顕微鏡観察で確認している。したがって、○△×記号で示す成形体の表面平滑性の評価はビニロン繊維の添加量の多い配合に比べ、少ないほど随伴効果が大きいと考えられる。これらの効果はパルプや炭素繊維にも活用できる。

なお、筆者らは、経験にもより、表3のとおり各種繊維複合の実用性をまとめた。参考にしていただければ幸いである。ただし、成形の方法により調整を要する。

参考文献

- 1) 財建材試験センター：「石綿代替製品調査研究報告書」。(1991/3)
- 2) 産業統計研究所：「建材レポート」。(1991/3)
- 3) 神尾典，井上雄次郎，木之下成彦。押出成形用強化セメント組成物。特公平6-99173。1994-12-17。
- 4) 神尾典，井上雄次郎，川村弘一。押出成形用セメント組成物。特公平5-57224。1993-8-23
- 5) 神尾典，清水映，池田耕太郎。押出成形用セメント組成物。特公平7-57703。1995-6-21。