経年戸建住宅及び各種機械用回転軸の高耐震化技術の発展と 地下埋設パイプの健全性評価技術の確立に関する研究グループ

ヘルスモニタリング機能を有する地下埋設複合材パイプの開発と評価

1. 諸言

現在,日本の多くの地下インフラ設備(ガス 管,上下水道など)は高度成長期に作られた物 で,耐用年数に近づくのため,近年はそれら の老朽化による事故が社会問題の一つとなっ ている(2007年北見市の地下ガス漏れなど)¹⁾.

これらの事故の原因として,設計当時に想 定した耐用年数以上の使用だけではなく,設 備の健全性の情報がないことにより,事前に 明確な予防措置が取りにくいことが主な原因 だと考えられる.特に,地下に埋設したイン フラ設備の多くは道路や歩道下を占用するた め,補修や交換などの工事を実施するために は,道路の掘り返しや車道掘削が必要であり, これらの措置に伴うコストや制約により,地 下管路の管理が困難となり,老朽化による事 故の一つの原因となっている.この課題を解決 方法として,地下インフラ設備にヘルスモニ タリングを持たせる方法がある²⁾.

ヘルスモニタリング機能を持たせるという ことは、構造物の健全性評価に基礎情報をいつ でも取得できるセンサネットワークと、その情 報をもとに健全性を評価するためのプロセッ サを備えさせることと考えられている.その目 的はライフサイクルコストを下げながら、構造 物の信頼性と安全性を高めることにある³⁾.

そこで本研究では、近年に耐震性、耐食性に 評価された高密度ポリエチレン⁴⁾を母材とし て、損傷によるその電気抵抗の変化⁵⁾を利用し た構ヘルスモニタリング機能を持つパイプ用 の導電性複合材料の開発について報告する. 邊 吾一(日大生産工・教授) 高橋 進(日大生産工・教授 藤井 秀美((株)藤井製作所・社長)

2. 実験

2.1 使用材料

マトリックス樹脂には高密度ポリエチレン HDPE(以下PEと略す)のパウダー(旭化成ケミカ ルズ,マイクロサンテックS360CP, 嵩密度 0.35 g/cm³)を使用した.

2.2 CNTフィラー

カーボンナノチューブ (CNT) には、気相法炭 素繊維 (VGCF) (昭和電工、VGCF-S、繊維径80nm、 繊維長さ10 μ m,嵩密度0.02g/cm³,体積抵抗率 10⁻⁴ Ω cm)を使用した.

2.3 非CNTフィラー

CNT以外の導電性フィラーでは, 顆粒状カー ボンブラック(CB)(ケッチェン・ブラックイン ターナショナル,ケッチェンブラックEC300J, 嵩密度0.13g/cm³,体積抵抗率10⁻²Ωcm),お よび山武杉木炭の粉末(CP)(佼和テクノス,サ ンブスギ木炭,嵩密度0.394g/cm³)を使用した. ただし,山武杉木炭は単体のフィラーとして 導電性を得られにくいため,本研究ではサブ フィラーとして使用した.

2.4 溶融混練

導電性複合材料の成形には2軸押出機(テクノ ベル製, KZW15TW-45MG)(図1)を使用した.溶融 混練法において,2軸押出機の機械的なせん断 力により,マトリックスのPEの中にフィラー を分散させ,導電性複合材料のペレットを製 作した.PEに対して,フィラーの割合は, VGCF(6,8,10,12,14wt%),CB(6,8,10,12,14wt%), 及びCB(10wt%)+(CP10,20wt%)に計量し,押出 機に投入した.溶融混練の成形条件は,樹脂 温度210℃,スクリューの回転数は100rpmに設 定した.溶融混練法により得られた導電性複 合材料のペレットを図2に示す.



図1 2軸押出機



図2 導電性複合材料のペレット

2.5 加熱圧縮成形

導電性評価用試験片(図3)は溶融混練法によ り製作した複合材料のペレットをホットプレ スで加熱圧縮成形し,製作した.表1に成形条 件を示す.加熱圧縮成形は2回行う事で表面を 滑らかにし,抵抗率を測定し易くした.加熱 圧縮成形より得られた厚さ0.5(mm)のシートは ダイヤモンドカッターを用いて,JIS規格K 7194の試験片寸法(80mm×50mm)に切断した.



図3 導電性評価用試験片およびその寸法

表1 加熱圧縮成形の成形条件

	一回目	二回目
予熱(210℃)	5(min)	0(min)
加熱(210℃)	10(min)	10(min)
加熱圧力	5.0(MPa)	5.0(MPa)

2.6 射出成形

引張り特性を測定するためのダンベル型試験 片(厚さ4mm, JIS K7162 1A形)(図4,図5)は射 出成形機(住友重機械,SE75DUZ-C250,スクリ ュー径36mm)を用いて成形した.成形条件はノ ズル温度210℃,射出圧120MPaである.



図4 ダンベル型試験片



図5 ダンベル型試験片の寸法

3. 結果および考察

3.1 導電性評価

抵抗率は抵抗率計(三菱アナリテック製, LorestaGP, ASPプローブチェッカー(図6),体積 抵抗率測定範囲10^{7~}10⁻³Ωcm)を使用し,JIS K7194(導電性プラスチックの四探針法)に基づ いて,試験片の体積抵抗率を測定した.体積 抵抗率ρνを式で表す式(1)のようになる.

$$\rho v = R \times \frac{w}{l} \times t \tag{1}$$

ここで、Rは試験片の抵抗で、w,1,tはそれぞれ 試験片の幅,長さおよび厚さである.図7に四探 針法の概要図を表す.試験片は1種類の複合材 料に対し5枚用意した.測定は1枚の試験片に対 し5箇所測定し,その平均値を求めた(図8).



図6 四探針法の概要図ASPプローブチェッカー







図8 導電性評価の結果

図8が示すように、導電性フィラーの添加量 が8wt%以上になると、PE/VGCFとPE/CB複合材料 はPEの中に分散されたVGCFとCBが導電性ネッ トワークを構成する事により、導電性を持ち (10¹Ω cmオーダー)、体積抵抗率が測定可能と なる.また、複合材料の抵抗率は添加量の増 加と共に大きく低下した.ただし、添加量が 10wt%を超えるのを境に、抵抗率の低下は顕著 ではなくなった. また、CBに比べ高い電気伝導率を持つVGCFは 複合材料に最も低い抵抗率をもたらすと考え られたが、図8が示すように、フィラーの添加 量が同じの場合、PE/VGCFとPE/CB 複合材料の 抵抗率に大きな差は生じなかった.

ー方,サブフィラーとしての木炭の粉末(CP) を添加したPE/CB/CP複合材料はCPの添加量が 20wt%のとき,最も低い抵抗率(10°Ω cmオーダ ー)を示し,この結果により,CPはサブ導電性 フィラーとして適切である事を確認した.

3.2 引張試験

射出成形により得られたダンベル型試験片を 用いて、JIS K6922(ポリエチレン成形用および 押出し材料)およびJIS K7161(プラスチック-引張特性の試験方法)に基づいて、引張試験を 行い、引張強さおよびヤング率を測定した、 試験機械はオートグラフ(島津製作所,AG-1)を 用いた.ヤング率の測定には伸び計を使用した. 試験条件は引張強さの測定に試験速度が 50mm/minで、ヤング率の測定に試験速度が 1mm/minである.試験片は引張強さおよびヤン グ率の測定にそれぞれ5本を用意し、平均値を 求めた(図9~12).



図9 PE/VGCF複合材料の引張強さ

図9と図10から、VGCFの添加量の増加につれ、 PE/VGCF複合材料の引張強さとヤング率はPEだ けの場合に比べ大きく向上した.特にヤング 率は、VGCFの添加に伴って向上し、VGCFの添加 量が10wt%のときは92%向上する結果になった. VGCFの添加により、複合材料の引張特性が大



図10 PE/VGCF複合材料のヤング率



図 11 PE/CB 及び PE/CB/CP 複合材料の強さ



図 12 PE/CB 及び PE/CB/CP 複合材料のヤング率

きく向上したのは、VGCFが持つ高いアスペク ト比と機械的特性による補強効果が原因と考 えられる.

また、図11と図12から、PE/CB複合材料におい て、PEよりヤング率は向上したが、引張強さは 若干低下する結果になる.CBはプラスチックに 対して導電性付与が使用目的であり、補強効 果がないことは周知である.一方、PE/CB/CP複 合材料において、CPの充填量が10wt%の場合は PE/CB複合材料と同じく、補強効果はあまりな いが、CPの充填量が20wt%になると、引張強さ とヤング率は大きく向上した.CPの充填量の増 加による複合材料への影響を確認するために、 PE/CP複合材料の引張試験を行った.試験結果 は図13およぶ図14に示す.



図13 PE/CP複合材料の強さ



図 14 PE/CP 複合材料のヤング率

図13と図14が示したように、複合材料の引張 強さおよびヤング率はCPの充填量に比例し、 向上することを確認した.引張強さにおい て、CPの10wt%の充填ではほとんど補強効果は 見られなく、15wt%以上の充填量で明確な補強 効果があり、CPの30wt%の充填で、PE/CPの引張 強さは31.5MPa(22.1%の向上)で、PE/CB/CP複合 材料(CP充填量20wt%)の引張強さの向上 (20.5%)とほぼ同じくなり、この結果により、 CPは充填量の増加と共に引張強さに補強効果 があることを確認した.

一方, ヤング率において, PE/CP のヤング率 は CP の充填量に比例し増加したことを確認し た(10wt%で40.1%の向上, 20wt%で79.3%の向上, 30wt%で142%の向上). この結果により, CP の 充填量の増加が PE/CB/CP 複合材料のヤング率 が大きく向上する原因であることが確認した.

3.3 SEM観察

複合材料の導電性特性はフィラーの分散状態 に大きく影響されるため、走査型電子顕微鏡 (SEM)を使い、試験片の断面を観察した(図15 ~18).



図 15 PE/VGCF 複合材料



図 16 PE/VGCF 複合材料

図 15 より、VGCF は複合材料によく分散されて いる事が確認された.また、図 16(図 15 の白 い円の部分を拡大した図)より、PE/VGCF では、 VGCF の長さが $2^{-3}\mu$ m であり、 溶融混練を行 う前の長さ(10μ m)より短くなった.この結果 により、溶融混練法のせん断力はフィラー (VGCF)を複合材料によく分散させただけでは



図 17 PE/CB 複合材料



図 18 PE/CB/CP 複合材料

なく,同時にVGCFを切断する事を確認した. 図17により,PE/CB複合材料では,数μmサイ ズのCB粒子(白い円が囲ったもの)が複合材料 に分散している事を観察し,この結果により, 元々数百μmサイズの顆粒状のCBが溶融混練法 のせん断力により分解されたと考えられる.

図18が示したPE/CB/CP複合材料では、CP(白い 円が囲ったもの)は数十から数百μmサイズの 粒子として分散している事を観察した.

3.4 メルトマスフローレイト(MFR)試験

メルトマスフローレイト (Melt mass flow rate) (以下 MFR と略す)とは,熱可塑性プラス チックの溶融時の流動性を表す数値である. 本研究は MFR 試験を用い,複合材料の溶融特性 を調べ,本研究で作製した複合材料がパイプ の押出成形に適しているかどうかのを確認す る.試験機はメルトインデクサーを使用した. 規格 JIS K7210 の A 法(熱可塑性プラスチック の MFR の試験方法)およびその PE の関連規格(D コード)を参考し,温度を210℃,予熱を300s, 試料切り取り時間間隔を 120s と設定した. 表 2 その結果を示す.

Matrix/Filler	Weight(%)	MFR(g/10min)
PE powder	100	0.800
PE pellet	100	0. 200
PE/VGCF	94/6	0.050
PE/VGCF	92/8	0. 025
PE/VGCF	90/10	0.015
PE/CB	94/6	0.400
PE/CB	92/8	0. 383
PE/CB	90/10	0.250
PE/CB/CP	80/10/10	0. 217
PE/CB/CP	70/10/20	0. 167

表2 PEの各複合材料のMFR結果

表2より、全体の複合材料の流動性はPEの元 の流動性(0.8g/10min)より低下する傾向があ る. 複合材料の流動性の低下の原因は、フィ ラーによるものと考えられる. 各種複合材料は フィラーの充填量の増加と共に流動性が低下 した.特にPE/VGCF 複合材料の流動性はほかの 複合材料に比べ、大きく低下した. これは VGCF の形状によるものと考えられる. VGCF の 形状は繊維であり、複合材料に分散した VGCF 繊維の絡みが複合材料の流動性を低下させた と考えられる.一方、粒状のCBまたは無定形状 の CP を充填した複合材料は VCGF のように絡み の影響が無いため、複合材料の流動性は低下 したもののパイプ成形の最適値の MFR(0.3g/10min)の値の前後となった.また, 原材料の PE のパウダーの MFR は溶融混練によ り低下した(0.2g/10min)が、パイプ成形の最 適値の MFR(0.3 程度)の値の前後にある. この 結果により、溶融混練後の PE ペレットは原材 料の PE のパウダーよりパイプ成形に適してい ることを示している.

4. 結言

- 本研究に使われた溶融混練法はフィラー (VGCF, CBおよびCP)を樹脂によく分散させ る方法である.
- 溶融混練法において、8wt%以上のフィラーの添加により、PE/VGCFまたはPE/CB複合材料に導電性を確認した.
- CPはサブ導電性フィラーとして使用可能で ある.
- 4) VGCFおよびCPはフィラーとして,補強効果 がある.
- 5) PE/CBおよびPE/CB/CP複合材料はパイプ成形に適している.

参考文献

- 小林恭一,施設の老朽化と維持管理の時代, Voice, Vol. 12, (2007), P. 1-2
- 川合克実,地下管路設備の耐震化・長寿命化, 日本非開削技術協会, No-Dig Today, No. 73 (2010.10), P.5
- 3) 丸山孝志,地下管路設備のいま,日本非開 削技術協会,No-Dig Today, No. 72 (2010.7), P.4
- 4) 村山英晶、ヘルスモニタリング、強化プラスチックス、 Vo1.55, No.4, (2009)、
 P.136-141
- 5) 鈴木剛史,高い耐震性と長寿命化を実現す る下水道用ポリエチレン管,日本非開削技 術協会,No-Dig Today,No.73 (2010.10), P.11-15
- 6) 轟章,電気抵抗変化によるひずみ/損傷モニタリング,構造ヘルスモニタリング,
 (2005), P. 33-35