

水道用ポリエチレン単層管の寿命予測 (FNCT 試験法による既設単層管の残存寿命推定)

平成 30 年 5 月

1. はじめに

本報告書は、「給水用ポリエチレン管の耐久性」に関する京都工芸繊維大学西村研究室と日本ポリエチレンパイプシステム協会との共同研究に於ける報告の「第2部：給水ポリエチレン単層管の寿命予測（FNCT試験法による既設単層管の残存寿命推定）」である。水道用ポリエチレン単層管は、埋設後30数年が経過しこれ等配管の維持、管理の観点より今後の使用可能期間は水道事業者にとって強い関心事である。本報に於ける報告内容は、32年間使用後の回収単層管について JIS K6774-2013¹⁾、ISO16770²⁾（規格詳細は4. 寿命予測の方法参照）による評価、解析より予測式を導出し、回収した水道用ポリエチレン単層管へその導出式の適用を試みたものである。なお、破壊のメカニズムについての詳細は「給水用ポリエチレン管の耐久性評価」日本ポリエチレンパイプシステム協会、【技術資料 No.17-01】を参照頂きたい。

2. ポリエチレン管のクリープ破壊

一般的に、プラスチックは粘弾性体であるので、ポリエチレン管内部の流体の内圧や、或いは地盤変動による曲げ及び埋め戻し時の突き固めによる土圧等の2次応力によるクリープ変形や、施工時の不備による点石等を起点とした、亀裂の生成および成長が起り、破壊に至ると言われている。図-1にポリエチレン管の一般的なクリープ破壊の概念図を示す³⁾。ポリエチレン管の破壊形態は延性破壊、脆性破壊および化学劣化による破壊と、大きく3つに分類できる。延性破壊はクリープ変形により大きなひずみを伴う。脆性破壊は低速亀裂成長破壊（Slow Crack Growth, SCG）とも呼ばれ、一旦生成した亀裂が徐々に成長して破壊に至る現象で、クリープ変形により生じるひずみが小さく脆性的に破壊する。化学劣化による破壊は温水用途の管に見られる現象で、高温下での長期間の使用により、ポリエチレン管が劣化して低い応力状態でも急激に破壊する。

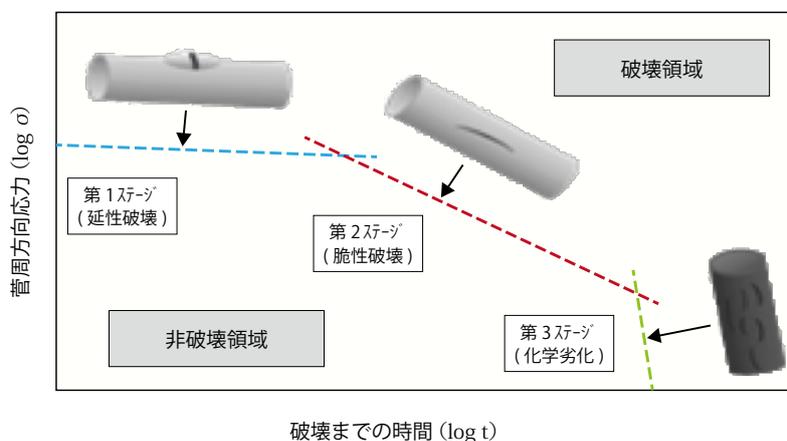


図-1 ポリエチレン管の破壊形態

3. 寿命予測の考え方

Gas Technology Institute Report⁴⁾によれば、破壊の大多数は、SCGによるものであり、過大な内部圧力による延性破壊は約1%であった、と報告されている。

更に、表-1に示す様に近時当協会が調査依頼を受けた漏水した水道用ポリエチレン単層管の破壊原因も全てSCGによるものであった。これ等の事から、水道用ポリエチレン単層管の実用的な寿命は、図-1に第2段階として示されるSCG領域を評価する事により推定が可能であると考えられる。

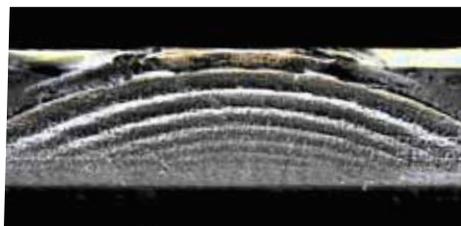
表－１ 単層管の漏水事故事例

| No | サイズ | 使用年数（年） | 破壊のタイプ | 亀裂長さ（mm） |
|----|-----|---------|--------|----------|
| 1 | 13 | 34 | 脆性 | 軸方向 40mm |
| 2 | 40 | 31 | 脆性 | 軸方向 25mm |
| 3 | 25 | 33 | 脆性 | 軸方向 35mm |
| 4 | 20 | 33 | 脆性 | 軸方向 20mm |
| 5 | 20 | 36 | 脆性 | 軸方向 — |
| 6 | 25 | 32 | 脆性 | 軸方向 — |

注：－ は亀裂の長さは不明

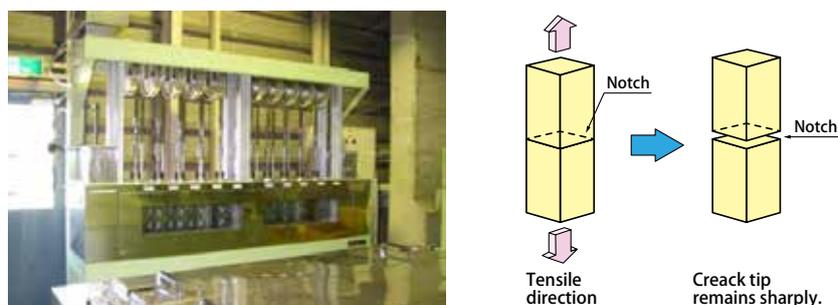
4. 寿命予測の方法

SCG は、酸化劣化に起因する内面の微小クラック、不適切な施工による点石、埋め戻し時の管体傷、または肉厚中の異物（例えば、顔料の微小粒塊）等、使用に先立ち管体に与えられた損傷部を起点とし、内圧、或いは曲げ配管による拘束、埋め戻し時の突き固めによる土圧等により応力が継続して負荷された場合に、亀裂が成長し破壊に至るプロセスである。よって ISO 16770 として規格化されている全周ノッチ式引張クリープ試験法（Full-notch creep test、FNCT 試験法とも呼ばれる）は、事前に予亀裂（即ち、管体に与えられた損傷部に相当する）を導入した供試体を用いる事により SCG の評価が可能な方法であり、ポリエチレン管クリープ破壊の第 2 ステージをシミュレートできる試験法として極めて有用である。従って、水道用ポリエチレン単層管の寿命予測の方法として本試験法を採用する事とした。図－2⁵⁾ に SCG による破壊断面の一例を示す。



図－２ SCG による破壊断面事例

FNCT 試験法は、管から切り出した規定寸法の短冊状試験片の全周に剃刀でノッチを入れ、一定荷重を付加して、破断するまでの時間を測定する方法である。図－3 に試験装置及び試験片の模式図を示す。



図－３ 試験装置及び試験片

5. 水道用ポリエチレン単層管の全周ノッチ式引張クリープ試験及び寿命予測式の導出

5.1 全周ノッチ式引張クリープ試験

表-2に示す特性を有する現場より回収した32年間使用の未破損水道用ポリエチレン単層管を用い、JIS K 6774:2013、及びISO 16770に準拠して90℃、80℃、60℃で実施した全周ノッチ式引張クリープ試験の測定結果を図-4に示す。

表-2 回収給水用ポリエチレン単層管特性

| 呼び径 | 密度 | MFR (g/10min) | 回収時使用年数 (年) | 使用送水圧 (MPa) |
|-----|------------------|------------------|----------------|----------------|
| 31 | 0.928 (含カーボン) | 1.66 (含カーボン) | 32 | 0.28 |

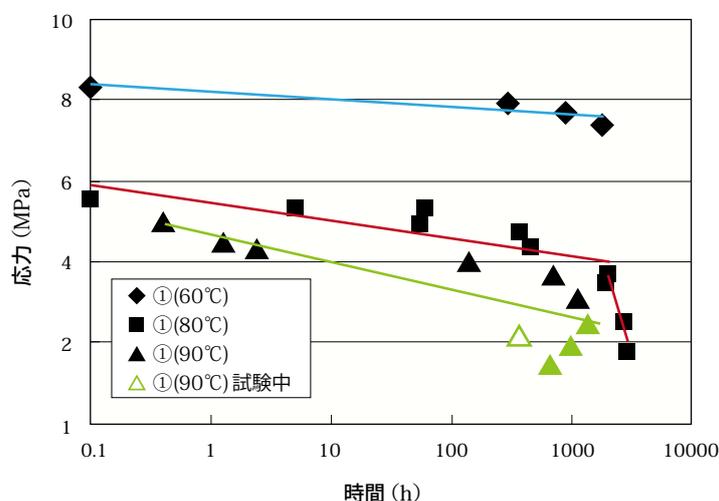


図-4 回収給水用ポリエチレン単層管のFNC T試験結果

5.2 寿命予測式の導出

寿命予測式は以下の様な一般式で示すことができる。

$$\log t = 1/T \times (C_1 - C_2 \log \sigma) - C_3 \quad \text{----- (1) 式}$$

ここで、t：試験時間、T：絶対温度、 σ ：応力、 C_1, C_2, C_3 ：定数

図-4のクリープ線図中90℃、80℃の脆性破壊領域(SCG領域)より測定データを選定し、(1)式を用いて定数、 C_1, C_2, C_3 を導出した。

$$\log t = 1/T \times (4080 - 193 \log \sigma) - 7.94 \quad \text{----- (2) 式}$$

5.3 寿命の算出

以下に導出寿命予測式を回収給水用ポリエチレン単層管へ適用した例を示す。

1) 送水圧（内圧）しか負荷されていない場合

寿命を算出するには、使用温度、及び送水圧を管寸法に応じて求めた円周応力を(2)式に代入すれば良い。

2) 外圧を考慮した場合

ここでは外圧として、管路の曲げ変形に起因する曲げ応力のみを考慮した（埋め戻し時の突き固めによる土圧等は見積もりが困難であるため）。従って、寿命算出には1)で得た円周応力に曲げ応力を加えた応力を適用する。

ここで、水道用ポリエチレン単層管について、曲げ変形に対応して発生する曲げ応力のデータがないことから、ガス用ポリエチレン管の実効公称応力³⁾を考慮して1.8MPaとした。

即ち、ガス用ポリエチレン管の曲げ弾性率は約800MPa程度であり、一方、水道用ポリエチレン単層管は、約290MPa前後である。又曲げ半径15Dでのガス用ポリエチレン管の実効公称応力は5.0MPaである。（給水PE管の許容曲げ半径は20Dであるが、ガス用ポリエチレン管には20Dのデータがない為15Dを適用した）。従って、 $5.0\text{MPa} \times 290\text{MPa} / 800\text{MPa} = 1.8\text{MPa}$ となる。

3) 回収水道用ポリエチレン単層管の寿命算出例

(2)式をA市水道事業体より提供された未破損の回収水道用ポリエチレン単層管に適用した場合の20℃に於ける寿命算出例を以下に示す（個々の単層管についてその詳細な使用条件を把握する事は困難なのでそれらは考慮外とし、一律に(2)式を適用した）。

表-3 回収水道用ポリエチレン単層管の寿命算出例

| No. | 呼び径 | 回収時使用年数 (年) | 使用送水圧 (MPa) | 内圧のみ (年) | 内圧+外圧 (年) |
|-----|-----|----------------|----------------|-------------|--------------|
| 1 | 40 | 32 | 0.28 | 110 | 57 |
| 2 | 40 | 24 | 0.38 | 96 | 53 |
| 3 | 40 | 26 | 0.40 | 93 | 52 |
| 4 | 40 | 25 | 0.42 | 88 | 51 |
| 5 | 40 | 28 | 0.42 | 89 | 51 |

注)：試料No.1は、寿命予測式を導出する為に使用した回収給水用ポリエチレン単層管である。

6. 結論

1) FNCT試験法では、管肉厚に規定の深さのノッチを全周に入れるため、経時に伴う内表面劣化層の影響は無視できる（本試験では何れの供試管ともノッチ深さは1mmであり、管内表面に形成される劣化層の厚みは $40\mu\text{m}$ と報告⁶⁾されている）。従って、No.1の供試管について、全周ノッチに相当するような鋭い傷が生成した場合、現段階では未だ測定途中ではあるが実用的な送水圧のみの負荷では、残存寿命は約78年(110年-32年)、また外圧として曲げ荷重だけを想定した場合は、約25年とそれぞれ推定される結果が得られた。

2) 本結果は、一種類の回収管より導出したモデル式を各回収水道用ポリエチレン単層管への適用を試みたものであるが、配管施工時に管体に対して損傷等の付与がなければ、相当期間その健全性が保持可能である、と推察される。尚、配管施工時、管体への損傷等が無い場合の長期強度推定に関しては、「水道用ポリエチレン二層管の長期（100年）寿命の考察」日本ポリエチレンパイプシステム協会、【技術資料 No.17-03】を参照頂きたい。

7. おわりに

水道用ポリエチレン単層管に就いて FNCT 試験法を用いて評価した。今後、FNCT 試験を継続実施する事により更なるデータの蓄積を図り、より信頼性の高い寿命予測の実施を考えている。

最後に、本研究実施に際し、終始ご指導頂いた京都工芸繊維大学大学院工芸科学研究科、西村教授、並びに水道用ポリエチレン単層埋設管サンプルをご提供頂いた水道事業者の方々にお礼を申し上げます。

8. 参考文献

- 1) JIS K 6774:2013 ガス用ポリエチレン管
- 2) ISO 16770:2004 Plastics – Determination of environmental stress cracking (ESC) of polyethylene pipes under displacement – Full-notch creep test (FNCT)
- 3) ガス用ポリエチレン管技術資料、日本ガス協会（2006）
- 4) Gas Technology Institute、Plastic Pipe Failure, Risk, and Threat Analysis 2009
- 5) Final Report “Plastics pipe Failure, Risk, and Threat Analysis” GTI Project Number 20385, (2009)
- 6) 水道用ポリエチレン管二層管開発経緯【技術資料 No.95-01】、日本ポリエチレン工業会

給水用ポリエチレン単層管の寿命予測 技術資料

平成 30 年 9 月 3 日 初版発行

編集 日本ポリエチレンパイプシステム協会 技術委員会

発行 日本ポリエチレンパイプシステム協会

〒 103-0007 東京都中央区日本橋浜町 3 丁目 3 番 2 号

TEL 090-3302-3725 FAX 03-5695-3189

非売品 不許転載

本技術資料記載の内容については変更することがありますのでご了承ください

