

水道配水用ポリエチレン管路の 100年寿命の検証

《技術報告書》

はじめに

日本の水道は普及率97%を越え、国民生活、日本経済を支える基盤インフラとして重要な役割を担っている。この水道施設資産全体の約70%を占める水道管路は、大半が昭和30年代後半から40年代の水道整備拡張時代に布設されたもので、約50年が経過し、当然の様に老朽化が進んできている。そのため順次、配管更新がされているが、全国平均で1%強の更新率でしかなく、このままでは平成37年には更新需要が投資額を上回り、更新が滞る予想がなされている。そこで近年、水道管路の基盤インフラとしての機能低下を招かない様に持続可能な管路更新を実現するために、100年以上の寿命を有した水道管路が要望されている。

水道配水用ポリエチレン管は、日本では平成7年から使用が開始され、既に17年経過しており、その優れた特長から全国の水道事業者での採用を大きく伸ばしているが、管路の耐久性については、50年以上ということを示すのみで、実際にそれ以上、どの程度の寿命を有しているか、ということが明らかでなかった。

そこで配水用ポリエチレンパイプシステム協会(ポリテック)では、平成20年11月に技術委員会の下部組織として、「長期寿命検討サブワーキング」(SWG)を設置し、検討を開始することとした。本サブワーキングには、プラスチック材料、製品の強度、寿命等に高い知識と見識を有され、世界的に著名な山形大学大学院理工学研究科の栗山教授に参加頂くことが出来た(サブワーキングメンバーを下表に示す)。

以降、約4年に渡って、サブワーキングでは会合を重ね、水道配水用ポリエチレン管路が100年以上の寿命があることの検証を目指し、多岐に亘る実験、検討を行ってきたが、この度、実験及び検討が完了したので、その内容について報告する。

区 分	委員名	所 属
	栗山 卓 教授	山形大学大学院理工学研究科
主 査	栗尾 浩行	積水化学工業(株)
	水川 賢司	積水化学工業(株)
	鎗水 隆良	クボタシーアイ(株)
	齋藤 聡	積水化学工業(株)
	中田 賢太郎	三井金属エンジニアリング(株)
	広田 久雄	日立金属(株)
	若宮 喜一郎	(株)イノアックコーポレーション
	山本 祐司	POLITEC 技術委員長

目次

1. 水道配水用ポリエチレン管について	6
1-1. 水道配水用ポリエチレン管の変遷と特徴	6
1-2. 水道用ポリエチレン管の改良経緯	8
1-3. 水道配水用ポリエチレン管の材料特性：PE100	10
1-4. 水道配水用ポリエチレン管・継手の規格	11
2. 100年寿命の検証に対する基本的な考え方	13
2-1. 100年の寿命が要求される背景	13
2-2. 水道配水用ポリエチレン管路の100年寿命検証の目的	13
2-3. 水道配水用ポリエチレン管路の寿命要因	14
2-4. 100年寿命の検証における想定条件	14
3. 内圧・外圧に対する100年寿命の検証	15
3-1. 内圧、外圧に対する100年寿命の照査方法	15
3-1-1. 限界状態の分類	
3-1-2. 有効応力の解析方法	
3-1-3. 照査基準	
3-1-4. 照査手順	
3-2. 限界状態ごとの許容応力の算出	18
3-2-1. 終局限界状態での許容応力	
3-2-2. クリープ状態での許容応力	
3-2-2-1. ISO 9080とISO 12162とは	
3-2-2-2. 20℃での許容応力	
3-2-2-3. 圧力低減係数の妥当性検証	
3-2-3. 疲労限界状態での許容応力	
3-2-3-1. 内圧の変動による疲労の照査	
3-2-3-2. 輪荷重による疲労の照査	
3-2-4. 許容応力のまとめ	
3-3. 形状係数の検討	27
3-3-1. 管の傷による応力集中の影響	
3-3-2. 継手の形状による応力集中の影響	
3-3-3. 形状係数の決定	
3-4. 素材係数の決定	31
3-5. 内圧、外圧に対する100年寿命の照査結果	32

4. 耐震性について	33
4-1. 水道配水用ポリエチレン管の被災調査結果	33
4-2. 地震に対する100年以上の耐久性検証	34
4-2-1. レベル2地震動に対する耐震計算	
4-2-2. 地震によるダメージが管の耐久性に与える影響	
5. 耐塩素水性について	36
5-1. 耐塩素水性の経緯	36
5-2. 塩素水の想定条件	36
5-3. 塩素水による水泡発生時間の予測	36
5-3-1. 無負荷状態	
5-3-2. 応力負荷状態	
5-4. 塩素水の影響を受けた管の水質に及ぼす影響	43
5-5. 耐塩素水性の照査結果	43
6. 結論	44
【参考文献】	44
【用語の解説】	45
おわりに	47

1. 水道配水用ポリエチレン管について

1-1. 水道配水用ポリエチレン管の変遷と特徴

表1-1の内容を基本仕様とする水道配水用ポリエチレン管・継手は、日本では1995年(平成7年)から使用が開始され、すでに17年が経過している。管路は一体構造管路であり、管体自体に可とう性を有するため、地震などの地盤変状に破壊することなく追従し、高い耐震性を有している。

表1-1 水道配水用ポリエチレン管・継手の基本仕様

- | |
|---|
| ①材料は「PE 100」(第三代高密度ポリエチレン)を使用 |
| ②管の接合方法は電気融着接合(EF接合)が基本 |
| ③管厚をSDR=11で設計(※SDRとはStandard Dimension Ratioの略で基準外径と最小厚さの比) |
| ④色は青色 |

水道配水用ポリエチレン管・継手は、1997年に呼び径75~150について日本水道協会規格JWWA K144(管)、JWWA K 145(継手)が制定された。それ以降の水道配水用ポリエチレン管・継手の変遷は表1-2の通りである。

これまでに、水道配水用ポリエチレン管・継手が布設された地域でも震度6以上の大地震が発生しているが、被害がなかったことが確認され、その耐震性が実証されている(詳細は4章参照)。そのような経緯の中で、水道ビジョンや水道事業ガイドラインにおいて耐震化率算定管材として認定された。

表1-2 水道配水用ポリエチレン管・継手の変遷

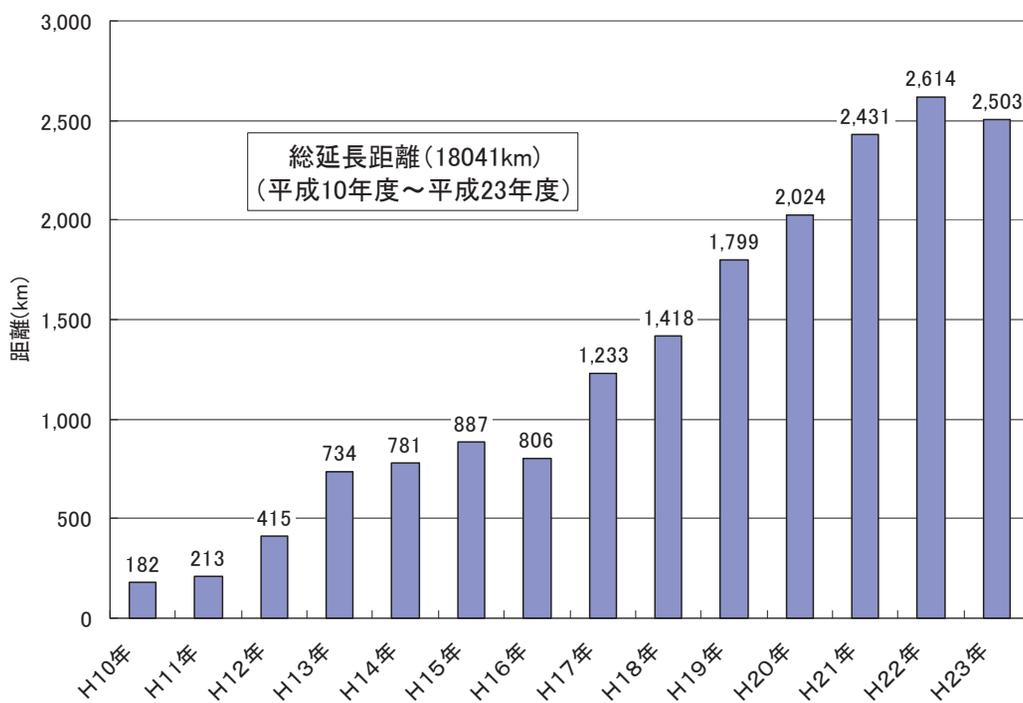
年次	内容
1997年(H9年)9月	呼び径75~150について、日本水道協会規格(JWWA K 144・145)が制定される。
1998年(H10年)4月	水道実務必携(全国簡易水道協議会発行)記載のポリエチレン管布設工の歩掛に、呼び径75~200の記載が追加される。
1998年(H10年)9月	日本水道協会より「水道配水用ポリエチレン管・継手に関する調査報告書」が公表される。
1999年(H11年)4月	建設省(現国土交通省)の通達において、水道管等の公道下への埋設深さを従来より浅くできる適合管材として水道配水用ポリエチレン管が明記される。
2001年(H13年)3月	総務省の通達により地方公営企業法において配水管の耐用年数が40年に統一される。
2004年(H16年)6月	厚生労働省より公表された水道ビジョンでポリエチレン管が耐震化率算定対象管材に認められる。
2005年(H17年)1月	水道事業ガイドライン(JWWA Q 100)で水道配水用ポリエチレン管(熱融着継手)が耐震化率算定対象管材として認定される。
2006年(H18年)4月	水道配水用ポリエチレン管の2団体が統合し、配水用ポリエチレンパイプシステム協会(POLITEC)が発足する。
2006年(H18年)11月	呼び径50が日本水道協会規格(JWWA K 144・145)に追加制定される。
2009年(H21年)9月	水道施設耐震工法指針・解説(日本水道協会発行)が改訂され、水道配水用ポリエチレン管の耐震計算法が記載される。
2009年(H21年)11月	JWWA K 144・145が改正され、継手の寸法が標準化されるとともに、EF受口付直管が品目に追加される。

これまでの実績を通じて、耐震性以外にも水道配水用ポリエチレン管路の特長が確認されており、主なものを表1-3にまとめた。

表1-3 水道配水用ポリエチレン管・継手の特長

- 1) 耐震性に優れる(地盤変状に追従する)
- 2) 耐食性に優れる(錆びない、腐食しない)
- 3) 耐久性(長期性能)に優れる
- 4) 施工性に優れる(軽量)
- 5) 生曲げ(小角度曲げ)配管が可能である
- 6) 水質衛生性に優れる
- 7) 環境負荷が小さい

また、図1-1に平成10年以降の水道配水用ポリエチレン管の普及推移をしめした。特に水道配水用ポリエチレン管が耐震管としての認知が広がった平成17年以降は、普及率は大きく伸長している。



(出典：日本水道協会水協雑誌 水道用品検査実績「配水用ポリエチレン管」より／備考：パイプ1本を5mと仮定して算出)

図1-1 水道配水用ポリエチレン管の普及推移

1-2. 水道用ポリエチレン管の改良経緯

水道配水用ポリエチレン管・継手は、ポリエチレン管の度重なる改良を通じて高い性能と品質を有するに至った。以下に改良の経緯を述べる。

(1) 給水管としてのポリエチレン管の使用

ポリエチレンを管材料として使用する検討は1940年代より始められた。1953年頃から呼び径50以下の給水管として低密度ポリエチレンを使用した1種管(軟質)が使用され、1955年頃には第一世代高密度ポリエチレンを使用した2種管(硬質)も使用されるようになった。呼び径50以下の水道用ポリエチレン管は、1958年1月に日本水道協会規格として制定され、1959年7月に日本工業規格(JIS K 6762)に移行した。

(2) 過去の給水用ポリエチレン管の事故例と改良

ところが、1970年代に入り、第一世代高密度ポリエチレンを用いた2種管のき裂漏水事故が発生し、さらに1975年頃には低密度ポリエチレンを用いた1種管の水泡はく離事故が発生した。

2種管のき裂漏水事故の原因は、使用される材料の長期クリープ特性および耐環境応力き裂特性が低いためと考えられた。そこで、長期クリープ特性および耐環境応力き裂特性の向上が検討され、1980年頃には第二世代高密度ポリエチレンが開発された。また、JIS K6762の性能試験に環境応力き裂試験が追加された。しかし、2種管に対する不信心は払拭されず、第二世代高密度ポリエチレンを用いた2種管は仮設配管以外で採用されることはほとんどなかった。

一方、1種管の水泡はく離事故に関しては、各種調査の結果、ポリエチレン管に耐候性を付与するために添加されていたカーボンブラックが主な原因と判明した。カーボンブラックが触媒の作用をして、水道水中の塩素がポリエチレン樹脂と反応して水泡の発生を引き起こし、はく離に至ったことが分かった。対策として、ポリエチレン原料を汎用の低密度ポリエチレンから直鎖状低密度ポリエチレンに変更するとともに、水道水に接する管内面はカーボンブラックを添加しないナチュラル層、外層は耐候性をもったカーボンブラックを添加した黒色層の二層管が開発された。1998年の規格改定においては、黒色単層管を管構造から除外し、規格名を「水道用ポリエチレン二層管」とした。直鎖状低密度ポリエチレンを使用する1種管は耐環境応力き裂特性に優れているため、き裂による破損事故の心配がなく、給水管として着実に拡大してきた。

(3) 配水管としてのポリエチレン管の使用

しかし、剛性・強度が比較的低い直鎖状低密度ポリエチレンを呼び径75以上の配水用ポリエチレン管へ適用するには、耐圧性を確保するために管厚を厚くする必要があり、経済性、施工性等の面で困難であった。ところが、樹脂合成における技術の進歩は目ざましく、剛性および強度が高く、さらに長期クリープ強度と耐環境応力き裂特性に優れている第三世代高密度ポリエチレン「PE100」が、1988年海外で開発され、1990年代に入って国内でも開発されるに至った。

そのような折、1995年1月17日に阪神淡路大震災が発生し、水道管路を含むライフラインの被害は甚大であったが、その中でガス導管として一部使用されていた熱融着接合タイプのポリエチレン管に被害が無かったことから、熱融着接合タイプのポリエチレン管の耐震性が注目された。そして1995年、第三世代高密度ポリエチレン「PE 100」を材料とし、管の接合方法として電気融着接合を用いた水道配水用ポリエチレン管・継手が国内で開発されるに至った。

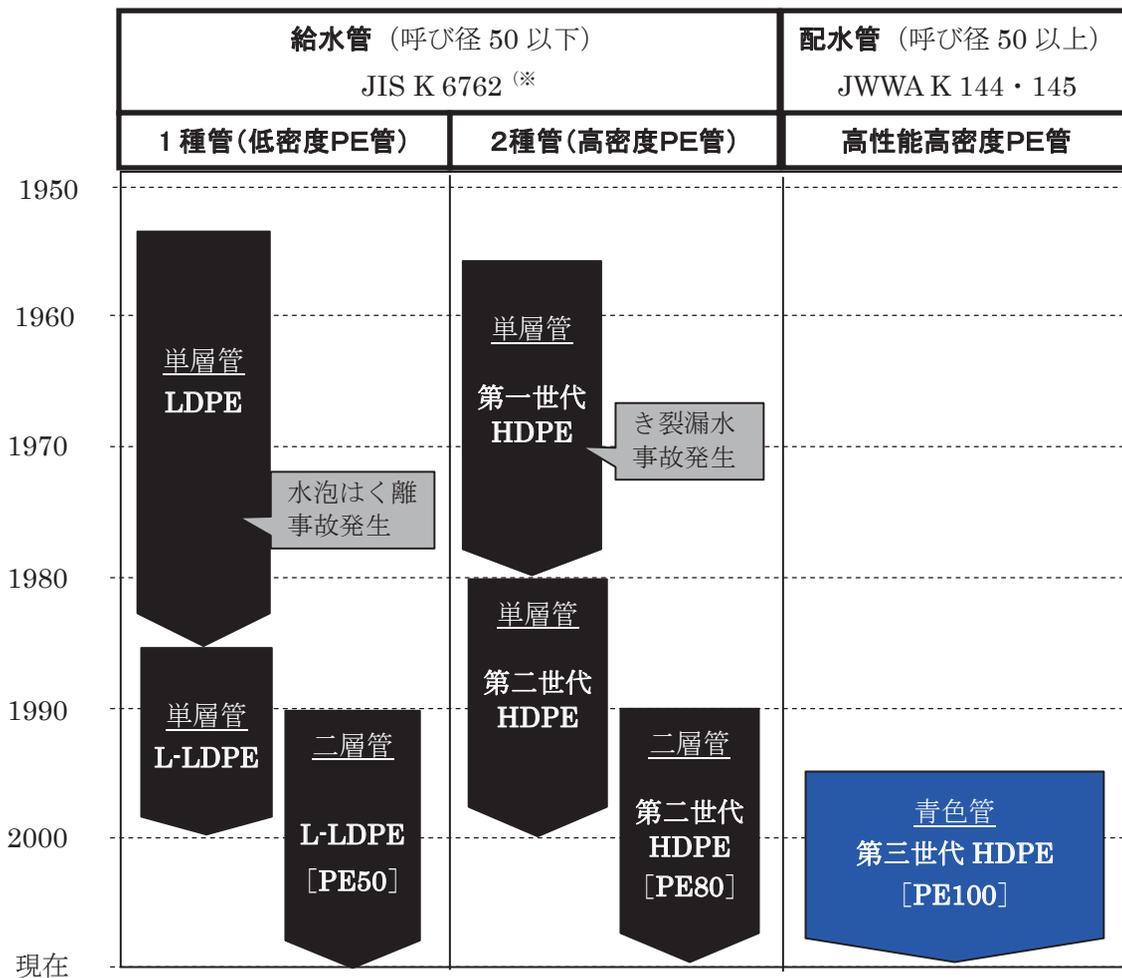


図1-2 水道用ポリエチレン管の改良経緯

※ JIS K 6762は、1959年の制定から現在までに8回の改正を経ている。制定時は管の種類として1種管、2種管で分類されていたが、1998年の改正で単層管を管構造から除外して二層管構造とし、1種二層管、2種二層管とした。2004年の改正では3種二層管が追加され、使用材料として1種二層管はPE 50、2種二層管はPE 80と規定された。

1-3. 水道配水用ポリエチレン管の材料特性：PE100

JWWA K 144・145では、使用する材料はISO 9080(1992年制定、2003年・2012年改訂)の外挿方法及びISO 12162(1995年制定、2009年改訂)の分類表でPE 100に分類される高密度ポリエチレンであることが規定されている。

長い時間、一定の力を加え続けると次第に変形が進行する現象をクリープといい、高温になるにつれてクリープは生じやすく、程度も大きくなる。一般に樹脂管は金属管に比べてクリープが大きい。上水道用途に使用される管については、管内水圧のために管壁には常時一定範囲の周応力が発生しているため、長期にわたって使用した場合、クリープ現象により短期的な破壊圧力よりも小さな圧力で管が破壊することがある。従って、水道配水用ポリエチレン管の管厚設計にはクリープ特性を十分考慮している。

クリープ特性の評価方法はISO9080「プラスチック配管及び管路システム—管形状の熱可塑性材料の外挿法による長期水圧強さの測定」に規定されている。この評価方法では、熱間内圧クリープ試験を行って、管が20℃で50年間の使用に耐え得る周方向応力(長期静水圧強度または最小要求強度：Minimum Required Strength：以降MRSと記す)を算出する方法が規定されている。PE 100に分類されるポリエチレン樹脂はMRSが10MPa以上を有している。

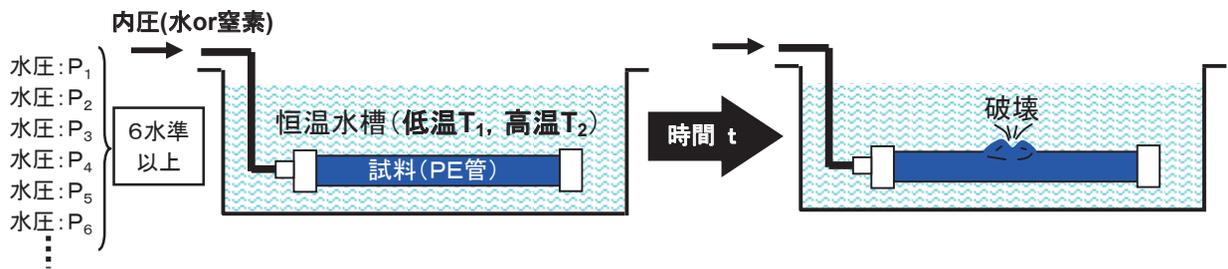


図1-3 熱間内圧クリープ試験の概要

各試験温度で、一定の内圧を負荷し続け、破壊するまでの時間を下のグラフのようにプロットする。1年以上の試験結果を用いて、50年後のクリープ強度を外挿により求める。

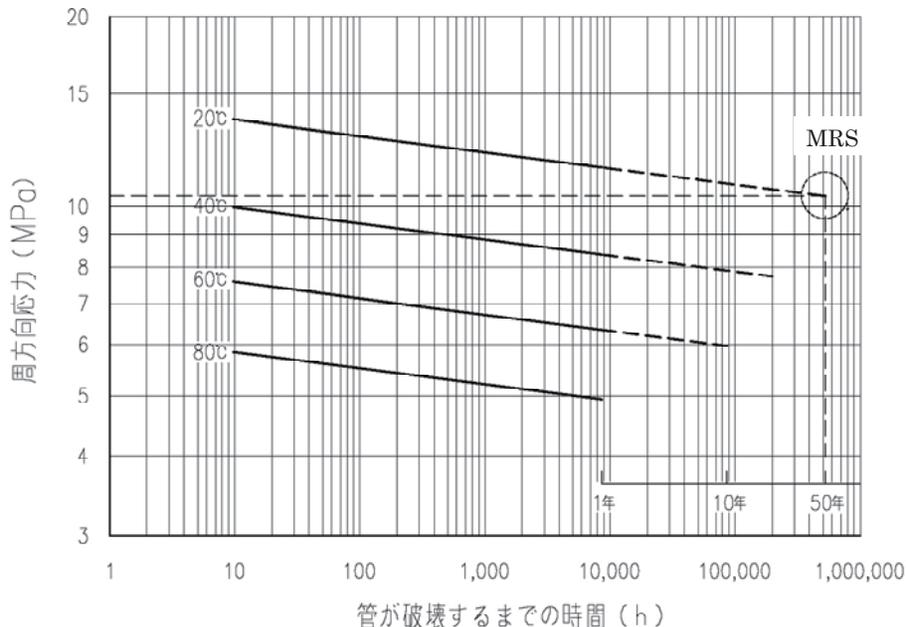


図1-4 熱間内圧クリープ曲線

1-4. 水道配水用ポリエチレン管・継手の規格

1-4-1. ISO 4427とJWWA K 144・145の比較

水道配水用ポリエチレン管・継手の国内規格は、国際標準規格ISO 4427 (Polyethylene (PE) pipes for water supply – Specifications/1996年制定) に準拠して日本水道協会規格JWWA K144・145として1997年に規格化された。(※ISO 4427は2007年の改訂で、規格名称がPlastics piping systems – Polyethylene(PE) pipes and fittings for water supply – Part 1 : General, Part 2 : Pipes, Part 3 : Fittings, Part 5 : Fitness for purpose of the systemとなる4部構成となった。)

ISO 4427ではポリエチレン原料のMRS (最小要求強度) から最低の安全率1.25を用いて設計応力を規定しているのに対し、JWWA K 144では安全率2を用いて設計応力を規定しており、国内規格は国際標準規格に比べてより厳しい基準で規定している。

表1-4にそれぞれの規格で規定されている設計基準の概要を示した。ISO 4427では、4種類のMRSを有するポリエチレン原料に対して、各種のSDR (SDRとは基準外径を基準管厚で割った値) を規定し、それぞれについて設計水圧が示されている。

表1-4 ISO 4427とJWWA K 144の比較

規格		ISO 4427				JWWA K 144
PEの分類		PE 100	PE 80	PE 63	PE 40	PE100
最小要求強度(MPa)		10.0	8.0	6.3	4.0	10.0
安全率		1.25以上				2.0
最大設計応力値(MPa)		8.0	6.3	5.0	3.2	5.0
設計水圧 (MPa)	SDR = 6	-	2.5	-	-	
	SDR = 7.5	2.5	2.0	-	1.0	
	SDR = 9	2.0	1.6	-	0.8	
	SDR = 11	1.6	1.25	1.0	-	1.0
	SDR = 13.6	1.25	1.0	0.8	0.5	
	SDR = 17	1.0	0.8	-	0.4	
	SDR = 21	0.8	0.6	0.5	0.32	
	SDR = 26	0.6	0.5	0.4	0.25	
	SDR = 33	0.5	0.4	0.32	-	
	SDR = 41	0.4	0.32	0.25	-	

1-4-2. JWWA K 144、JWWA K 145における性能規定

JWWA K144 水道配水用ポリエチレン管、JWWA K145 水道配水用ポリエチレン管継手では、JIS K6762により得られた、日本国内での水道用ポリエチレン管に必要とされる性能を踏まえた性能規定を行っている。各々の規格より性能を規定した表を抜粋し、表1-5、表1-6として記載する。

各性能項目の試験・測定方法の詳細については、JWWA K144およびJWWA K145を参照。

表1-5 JWWA K144 水道配水用ポリエチレン管性能

項 目		性 能
耐圧性		漏れ、破損があってはならない。
破壊水圧強さ	MPa	4.0以上
熱安定性		酸化誘導時間20以上
浸出性	味	異常でないこと。
	臭気	異常でないこと。
	色度	度 0.5以下
	濁度	度 0.2以下
	有機物[全有機炭素(TOC)の量]	mg/L 0.5以下
	残留塩素の減量	mg/L 0.7以下
熱間内圧クリープ性		漏れ、破損があってはならない。
耐塩素水性		水泡発生がない。
耐環境応力き裂性		き裂発生がない。
耐候性	外観	き裂発生がない。
	熱安定性	分 酸化誘導時間10以上
	引張破断伸び	% 350以上
融着部相溶性		漏れ・破損があってはならない。
引張降伏強さ	MPa	20.0以上
引張破断伸び	%	350以上
加熱伸縮性	%	±3以内
低速き裂進展性		漏れ・破損があってはならない。
耐はく離性		受口接合部のぜい性はく離長さ比率が1/3以下

表1-6 JWWA K145 水道配水用ポリエチレン管継手 性能

項 目		性 能
耐圧性		漏れ、破損があってはならない。
破壊水圧強さ	MPa	4.0以上
熱安定性		酸化誘導時間20以上
浸出性	味	異常でないこと。
	臭気	異常でないこと。
	色度	度 0.5以下
	濁度	度 0.2以下
	有機物[全有機炭素(TOC)の量]	mg/L 0.5以下
	残留塩素の減量	mg/L 0.7以下
熱間内圧クリープ性		漏れ、破損があってはならない。
耐塩素水性		水泡発生がない。
耐環境応力き裂性		き裂発生がない。
耐候性	外観	き裂発生がない。
	熱安定性	分 酸化誘導時間10以上
	引張破断伸び	% 350以上
融着部相溶性		漏れ・破損があってはならない。
耐はく離性		受口接合部のぜい性はく離長さ比率が1/3以下

2. 100年寿命の検証に対する基本的な考え方

2-1. 100年の寿命が要求される背景

図2-1に水道事業における投資額と更新需要の推移を示した。昭和50年頃までに集中的に整備された水道管路施設は、年月の経過とともに老朽化が進み、一方で投資額は減少傾向となっているため、いずれ更新需要が年間あたりの投資額を上回ることが予測される。現在多くの水道事業体が財政的に厳しい状況となる中、老朽管路に対する現在の更新率は全国平均で1%程度しかない。そこで、管路の機能低下を招かないよう持続可能な管路更新を実現するためにも100年以上の耐久性を有する水道管路が必要とされている。

一方、寿命の1つの指標として法定耐用年数があり、2001年4月の地方公営企業法施行規則（総務省）の改正で、材質にかかわらず水道配水管の法定耐用年数は40年となっている。しかし、あくまで資産としての経済的な償却年数を示すものであって実質的な耐久性とは異なるため、管路更新の時期は各水道事業体の判断に委ねられている。そのため、水道管路の長期的な更新計画を策定するためにも、管種ごとの実質的な耐久性能を明確にすることが要望されている。

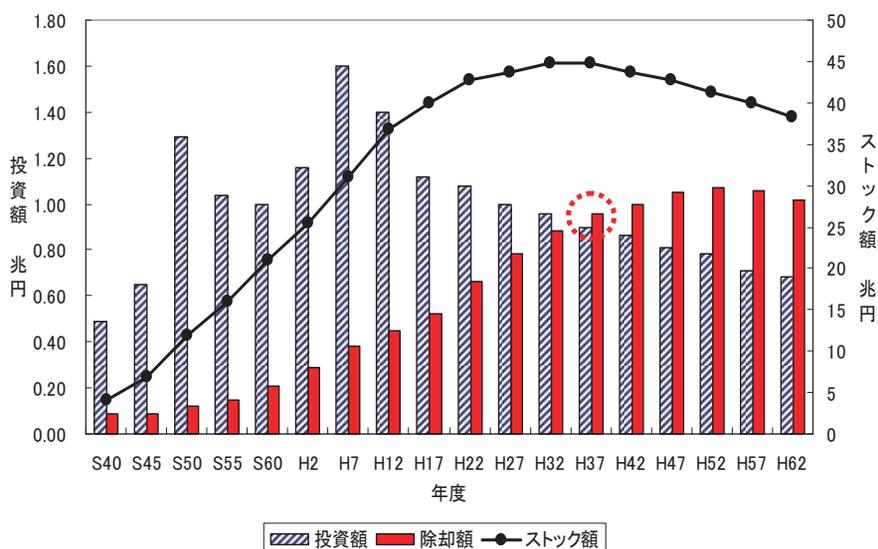


図2-1 水道事業における投資額と更新需要の推移
(出典：水道ビジョンフォローアップ検討会資料/2007年 厚生労働省健康局水道課)

2-2. 水道配水用ポリエチレン管路の100年寿命検証の目的

上記のような水道事業における要望を受け、当協会では2008年11月に「長期寿命検討サブワーキング」を設置し、水道配水用ポリエチレン管路の100年寿命の検証に着手した。本研究の主な目的は、水道配水用ポリエチレン管路の実質的な工学的耐久性能を明確にするために、100年の耐久性を検証することにある。

検証にあたっては、水道管路の寿命を水道管路が有するべき性能・機能を十分に満足できない限界状態に至る時期と捉え、埋設された水道配水用ポリエチレン管路の寿命要因から見直した。また、水道管路の寿命は埋設条件や使用条件によって左右されるので、想定条件を設定した上で100年寿命の照査基準の検証を試みると同時に、新たな評価スキームを提案したので以下に詳細を報告する。

2-3. 水道配水用ポリエチレン管路の寿命要因

道路下に埋設されたポリエチレン管路には、常時内側からは水圧がかかり、外側からは土圧および輪圧がかかっている。ポリエチレン管路の寿命に影響を及ぼす要因として、1つ目に管路にかかる荷重が挙げられる。

2つ目の要因としては、地震などの地盤変状が挙げられる。これまで、特にレベル2地震動の大地震において水道管路の甚大な被害が発生している。

3つ目の荷重以外に寿命に関わる要因としては、耐塩素水性が考えられる。耐塩素水性は、1975年頃に一部の都市において単層ポリエチレン管(PE 50以下)布設後、数年経過した後に管の内面に水泡が発生し、稀な例として水接合管壁が薄片状に剥離した問題に由来する。

そこで、水道配水用ポリエチレン管路の100年寿命を検証するには、下記3つの寿命要因に対して100年以上の耐久性を検証することになる。

- 1) 内圧・外圧に対する耐久性(耐内圧・耐外圧)
- 2) 地震に対する耐久性(耐震性)
- 3) 残留塩素に対する耐久性(耐塩素水性)

2-4. 100年寿命の検証における想定条件

水道配水用ポリエチレン管路の100年寿命を検証するにあたり、想定条件は以下の通りである。設計水圧および使用温度範囲は、JWWA K 144、JWWA K 145にも規定されている。

- 1) 内圧・外圧(耐内圧・耐外圧)
 - 設計水圧 : 静水圧0.75MPaに水撃圧0.25MPaを加味して、1.0MPaとする。
 - 使用温度範囲 : 0℃から40℃までとする。
 - 埋設深さ : 土被り60cm以上
 - 輪荷重 : 25tトラック車両が繰り返し通過。
 - 許容傷深さ : 管厚の10%以下とする。
 - 許容曲げ半径 : 管外径の75倍以上とする。
- 2) 地震(耐震性)
 - 被災確率 : 100年の間に地震動レベル2の地震を少なくとも1回経験する確率。
- 3) 残留塩素(耐塩素水性)
 - 残留塩素濃度 : 最大1ppmとする。

3. 内圧、外圧に対する 100 年寿命の検証

3-1. 内圧、外圧に対する100年寿命の照査方法

埋設された水道配水用ポリエチレン管路が内圧、外圧に対して100年以上の寿命を有するかどうかを検証するための一般的な手法は、管路に発生する有効応力が100年の寿命を担保する許容応力 σ_c を上回らないことを照査すればよい。

3-1-1. 限界状態の分類

照査に必要な許容応力 σ_c を算出するに際し、管路の寿命に至る形態によって許容応力の大きさは異なると考えられるので、本照査では管路の寿命に至る形態(以下、限界状態とする)の分類をおこなった。図3-1に示すように、埋設された水道配水用ポリエチレン管路に作用すると考えられる荷重の特性から、限界状態を下記の3つに分類した。

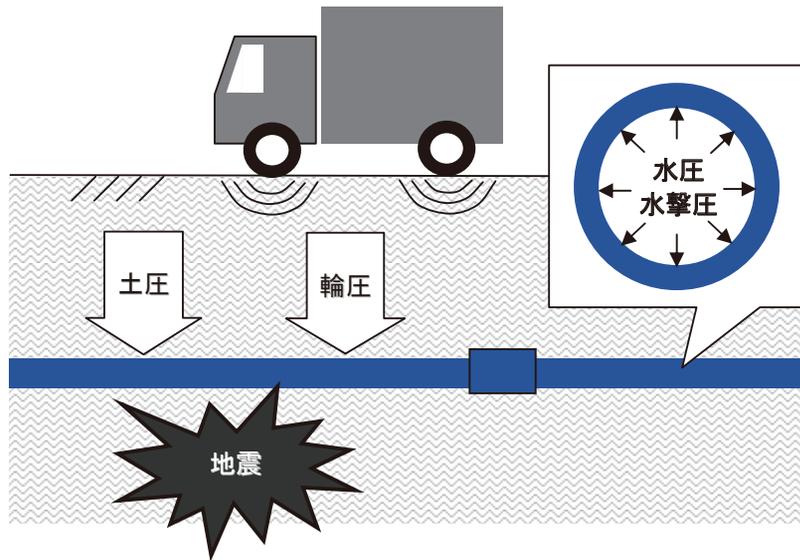


図3-1. 水道配水用ポリエチレン管路に作用する荷重

3-1-2. 有効応力の解析方法

管路に作用する荷重により発生する応力は、一般に表3-2に示す応力計算式によって算出できる。しかし実際の埋設管路では、継手部や異形部があったり、管路に傷が発生したり、素材にばらつきがあったりするなど、応力に影響を及ぼす因子が考えられる。そこで、本照査においては、有効応力の算出にあたり、これまで十分に考慮されていなかった次の3因子を考慮した。

- 1) 継手や異形管の形状因子による応力集中
- 2) 外面傷の発生による応力集中
- 3) 素材や成形のばらつき

具体的には、式3.1に示すように、形状因子による応力集中に基づく形状係数(C_f)と素材や成形のばらつきに基づく素材係数(C_m)を各荷重による算出応力に乗じて有効応力とした。

有効応力=算出応力×形状係数C_f×素材係数C_m (式3.1)

表3-1 応力を求める式(抜粋)

		管周方向の応力計算式	管軸方向の応力計算式
内圧	水圧	Nadayの式 $\sigma_{ic} = \frac{P_i}{2} \times \left(\frac{D_o}{t} - 1\right) \times A$	Nadayの式 $\sigma_{ii} = \frac{P_i}{4} \times \left(\frac{D_o}{t} - 1\right) \times A$
外圧	土圧	マーストンの式 $P_e = \frac{1 - e^{-2K' \cdot \tan \phi \cdot H/B}}{2K' \cdot \tan \phi} \times \rho \times B_w \times C_c \times A$ スパングレーの式(修正式) $\sigma_{ie} = 12(r/t)^2 [K - F_R \cdot E \times r^3 / 12(E \times I + 0.0061 \times E \times r^3)] \times P_e$	曲げ歪みの式 $\sigma_{fi} = E_2 \times \varepsilon \times A$
	輪圧	ブーシネスクの式 $P_t = \alpha \times (1 + i) \times Q \times \beta \times C_c$ スパングレーの式(修正式) $\sigma_{ie} = 12(r/t)^2 [K - F_R \cdot E \times r^3 / 12 \times (E \times I + 0.0061 \times E \times r^3)] \times P_t$	分散の式 $W_m = \frac{2 \times Q \times g \times D_o \times \beta}{2.75 \times (a + 2 \times h \times \tan \theta)} \times (1 + i) \times C_i$ $\sigma_{ii} = \frac{0.322 \times W_m}{Z} \sqrt{\frac{E \times I}{K_v \times D_o}}$

【一般定数】

- D₀: 管外径(mm)
- t: 管厚(mm)
- r: 管厚中心半径(mm)
- B_w: 管頂部の溝幅(mm)
- P_i: 内水圧(MPa)
- g: 単位体積当りの上載重量(N/mm³)
- h: 土被り(mm)
- P_e: 埋め戻し土による土圧(MPa)
- K': ランキンの主動土圧係数
{K' = (1 - sin φ) / (1 + sin φ)}
- φ: 土の内部摩擦角(°)
- P_t: 輪圧(N)
- W_m: 輪荷重による線土圧(N/mm)
- E: 管材の曲げ弾性率(MPa) { 1000 }
- E₂: 長期での見かけ上の材料の弾性係数 { 100 }
- E': 受動土圧係数
- F_R: 埋設管基礎の支承角係数
- K: モーメント係数
- I: 管材の断面二次モーメント(mm⁴)

- Z: 管材の断面係数(mm³)
- K_v: 鉛直方向地盤反力係数(N/mm³)
- α: トラック荷重による鉛直荷重係数(mm⁻²)
- β: 断面力の低減係数 { 0.9 }
- ε: 土圧による軸方向歪み
{ 許容曲げ半径 R = 75 D₀ を用い、1/2x75 = 0.0067 }
- ρ: 埋め戻し土砂の単位体積重量(N/mm³)
- φ: 埋め戻し土砂の安息角
- a: 接地幅 { 0.2m }
- θ: 荷重分散角 { 45° }
- 【状態依存の定数】**
- Q: トラック 1 後輪片荷重(t)
{ 終局限界状態: 30、クリープ・疲労限界状態: 10 }
- 【荷重係数】**
- A: 内圧・土圧荷重係数
{ 終局限界状態: 1.5、クリープ・疲労限界状態: 1 }
- i: トラック等の衝撃係数 { 0.5 }
- 【実験との補正係数】**
- C_c: 輪荷重の管周方向に関する補正係数 { 0.266 }
- C_i: 輪荷重の管軸方向に関する補正係数 { 0.5 }

3-1-3. 照査基準

水道施設設計指針2000では、水道配水用ポリエチレン管については内圧に対する安全性検討と外圧に対する安全性検討を別個に行う方法(内外圧分離の考え方)を適用することになっている。よって、内圧及び外圧に対する100年寿命の検証は、(式3.2)と(式3.3)を別個に照査した。

【100年寿命の照査基準】

・内圧による算出応力 σ ×形状係数 C_f ×素材係数 $C_m < 100$ 年後の許容応力 σ_c 。 (式3.2)

・外圧による算出応力 σ ×形状係数 C_f ×素材係数 $C_m < 100$ 年後の許容応力 σ_c 。 (式3.3)

(式3.2)、(式3.3)のそれぞれについて、表3-1に示すように、発生応力の方向として管周方向と管軸方向、さらに3つの限界状態について照査することになる。

表3-2 各限界状態における照査基準

荷重	発生応力方向	照査基準		
		終局限界状態	クリープ状態	疲労限界状態
内圧	管周方向	$\sigma_{ic} \times C_f \times C_m < \sigma_{c1}$	$\sigma_{ic} \times C_f \times C_m < \sigma_{c2}$	$\sigma_{ic} \times C_f \times C_m < \sigma_{c3}$
	管軸方向	$\sigma_{il} \times C_f \times C_m < \sigma_{c1}$	$\sigma_{il} \times C_f \times C_m < \sigma_{c2}$	$\sigma_{il} \times C_f \times C_m < \sigma_{c3}$
外圧	管周方向	$(\sigma_{fc} + \sigma_{tc}) \times C_f \times C_m < \sigma_{c1}$	$(\sigma_{fc} + \sigma_{tc}) \times C_f \times C_m < \sigma_{c2}$	$(\sigma_{fc} + \sigma_{tc}) \times C_f \times C_m < \sigma_{c3}$
	管軸方向	$(\sigma_{fl} + \sigma_{tl}) \times C_f \times C_m < \sigma_{c1}$	$(\sigma_{fl} + \sigma_{tl}) \times C_f \times C_m < \sigma_{c2}$	$(\sigma_{fl} + \sigma_{tl}) \times C_f \times C_m < \sigma_{c3}$

σ_{c1} : 終局限界状態の許容応力

σ_{c2} : クリープ状態の許容応力

σ_{c3} : 疲労限界状態の許容応力

σ_{ic} : 内圧 P_i により管周方向に発生する応力

σ_{il} : 内圧 P_i により管軸方向に発生する応力

σ_{fc} : 土圧により管周方向に発生する応力

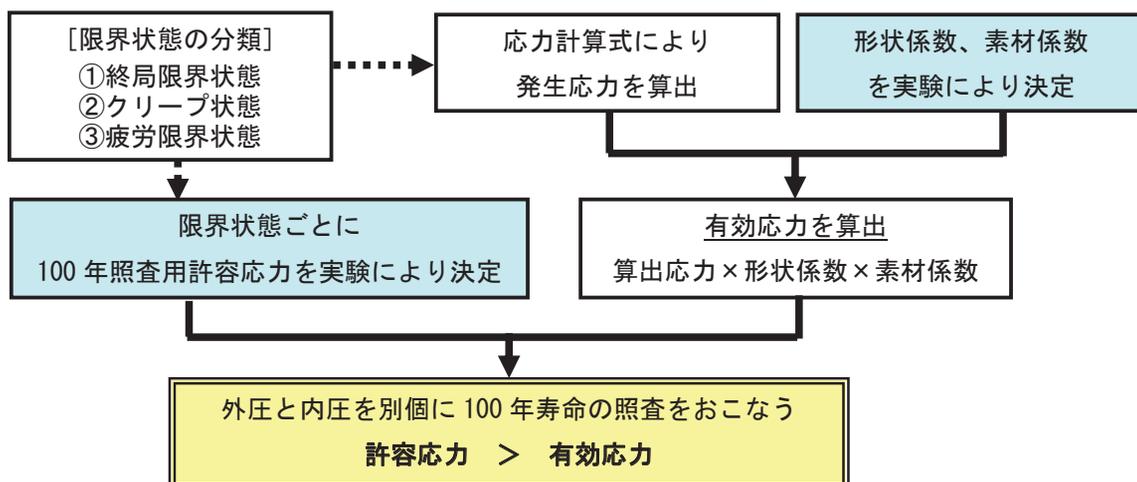
σ_{fl} : 土圧により管軸方向に発生する応力

σ_{tc} : 輪圧により管周方向に発生する応力

σ_{tl} : 輪圧により管軸方向に発生する応力

3-1-4. 照査手順

以上、水道配水用ポリエチレン管路の100年寿命を照査する手順は、以下のようなになる。



3-2. 限界状態ごとの許容応力

本節では、3-1-1節で述べた3つの限界状態(終局限界状態、クリープ限界状態、疲労限界状態)ごとに許容応力を算出し、管路が100年間の使用に耐えられるか否かの検証を行った。

3-2-1. 終局限界状態での許容応力

終局限界状態での破壊は、短期的な応力で延性破壊的に発生するため、材料の引張強度に依存する。当協会では、引張降伏強度の90%を許容応力とした。

なお、JWWA K144では、引張降伏強度は20MPa以上と規定されているため、許容応力は18MPaとなる。

終局限界状態の許容応力=18MPa

3-2-2. クリープ限界状態での許容応力

クリープ限界状態での許容応力はISO 9080及び、ISO 12162に従って設定する。

3-2-2-1. ISO 9080とISO 12162とは

①ISO 9080 (Plastic piping and ducting systems-Determination of the long-term hydrostatic strength of thermoplastics materials in pipe form by extrapolation)

(1992年制定、2003年・2012年改訂)

実使用温度より高い温度でクリープ試験を実施することでクリープを促進し、試験時間よりも長期の静水圧強度を決定する方法について規定している。

(促進試験の考え方)

温度を上げることで、クリープを促進する。実使用温度からの温度差(ΔT)が大きいほど、クリープを促進でき、 k_e 倍(外挿係数)の試験結果を延長できる(表3-3)。

1992年の制定時には k_e は最大50までしか規定されていなかったが、2003年の改訂で k_e が最大100まで規定された。

表3-3 ΔT と k_e との関係 (ISO 9080による)

ΔT (°C)	k_e	ΔT (°C)	k_e	ΔT (°C)	k_e
$T < 15$	2.5	$25 \leq T < 30$	12	$40 \leq T < 50$	50
$15 \leq T < 20$	4	$30 \leq T < 35$	18	$50 \leq T$	100
$20 \leq T < 25$	6	$35 \leq T < 40$	30		

例：20°Cでの長期使用を考え、80°Cで試験した場合

$$\Delta T (\text{温度差}) = 80^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 60^\circ\text{C}$$

$$k_e (\text{外挿係数}) = 100 \text{ 倍}$$

つまり、80°Cで1年間のクリープ試験を実施すれば、20°Cの試験結果を100倍延長(外挿)することができる。

(Knee Pointについて)

ポリエチレン管のクリープ特性では、ある時間で図3-2のように傾きが変化するKnee Pointが現れる場合がある。このKnee Pointは温度が高ければ高いほど短時間で出現する。

Knee Pointが出現した場合、試験はその時間までしか外挿できない。結果として、当協会メーカーのポリエチレン管では、80℃で1年間(8,760hr)のクリープ試験を実施し、Knee Pointが無いことを確認しているので、20℃のクリープ試験を100年後まで延長できる。

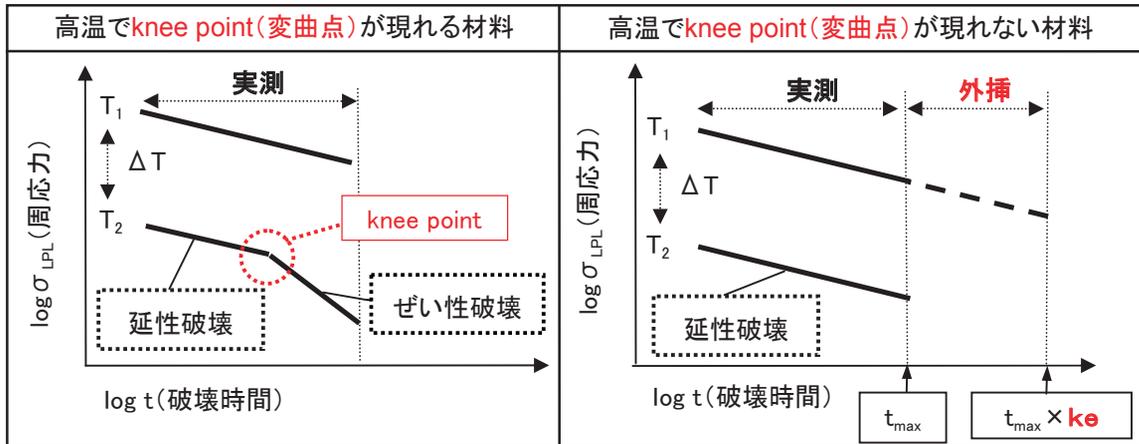


図3-2 加速試験の概念図(ISO 9080による)

②ISO 12162 (Thermoplastics materials for pipes and fittings for pressure applications-Classification and designation-Overall service (design) coefficient)

(1995年制定、2009年改訂)

ISO 9080に基づき算出した長期静水圧(クリープ)強度の値により、管のグレード(PE80、PE100など)をクラス分けしている(表3-4)。

次節では、ISO 12162を用いて、上記で求めたクリープ強度から、クラス分けを実施し、それぞれの許容応力を算出している。

表3-4 CRS_{σ,t}の分類(ISO 12162 TableA.1)

σ_{LPL} (MPa)	CRS _{σ,t} (MPa)
:	:
$6.3 \leq \sigma_{LPL} < 8$	6.3
$8 \leq \sigma_{LPL} < 10$	8
$10 \leq \sigma_{LPL} < 11.2$	10
:	:

3-2-2-2. 20℃でのクリープ限界状態における許容応力

まず、ISO 9080により、20℃、100年後のクリープ強度 $\sigma_{LPL,20^\circ C,100year}$ (LPL:97.5%の下方信頼限界値)を算出した。我々は20℃と80℃での熱間内圧クリープ試験をそれぞれ1年間実施し、表3-3にある ΔT (試験の温度差) = 60℃、及び k_e (外挿係数) = 100を用い、図3-2のように20℃のクリープ試験の結果を外挿(延長)することで、 $\sigma_{LPL,20^\circ C,100year}$ を求めた。次に、得られた $\sigma_{LPL,20^\circ C,100year}$ より、表3-4による分類を行い、 $CRS_{20^\circ C,100year}$ は8MPaとした。

表3-5 20℃の許容応力

POLITEC 会員	20℃		
	$\sigma_{LPL,20^\circ C,50year}$	$\sigma_{LPL,20^\circ C,100year}$	$CRS_{20^\circ C,100year}$
A	10.1MPa	9.9MPa	8MPa
B	10.2MPa	10.0MPa	
C	10.4MPa	10.3MPa	
D	10.9MPa	10.8MPa	

クリープ限界状態(20℃)の許容応力=8MPa

3-2-2-3. 圧力低減係数の妥当性検証

JWWA K144に水道配水用ポリエチレン管及び継手の使用温度は0~40℃と規定されている。ただし、管・継手の耐圧性は温度依存性があるため、JWWA K144及びISO4427には圧力低減係数が設定されており、その係数に応じて圧力を下げて使用するよう規定されている。

本項では、40℃での100年クリープ強度を算出するために圧力低減係数を使用する妥当性を検証した。

(1) ISO 9080に基づく40℃での100年クリープ強度の算出

ISO 9080に基づく、40℃、100年後のクリープ強度 $\sigma_{LPL,40^\circ C,100year}$ を40℃と80℃のクリープ試験結果を用いて算出する場合、温度差 $\Delta T = 40^\circ C$ であるため外挿係数 $k_e = 50$ となり、100年後まで外挿するには2年間以上のクリープ試験データが必要になる。

そこで、我々はA社及びB社の管を用いて、90℃以上のクリープ試験を1年以上実施し、測定データを採取した。その結果、図3-2にあるように、90℃以上でも「Knee Point」が無いことを確認し、40℃のクリープ試験の結果を100年後まで外挿することが可能であることを確認した。(95℃で試験を実施しているの、40℃との温度差 $\Delta T = 55^\circ C$ であり、外挿係数 $k_e = 100$ である。)

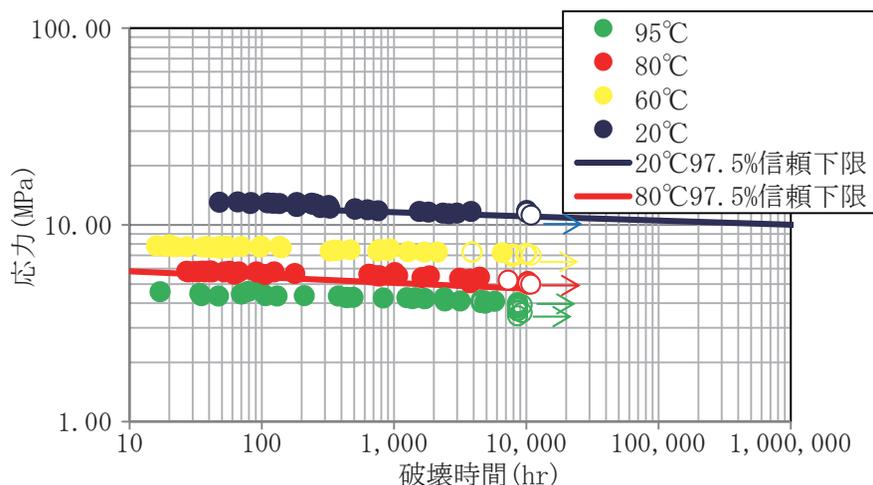


図3-3 A社管の95℃クリープ試験の結果

次に、ISO 9080に基づいて(式3.4を用いて)、40℃における100年後のクリープ強度を算出した。

$$\log_{10} t = c_1 + c_2 / T + c_3 \log_{10} \sigma + c_4 (\log_{10} \sigma) / T + e \quad \text{式3.4}$$

ここに、 t ：破壊時間(h)

T ：温度(K)

σ ：周応力(MPa)

$c_1 \sim c_4$ ：樹脂特性に基づく係数

e ：誤差

40℃、100年後のクリープ強度 $\sigma_{LPL,40^\circ C,100\text{year}}$ の計算結果は、以下の通りである。

A社管 $\sigma_{LPL,40^\circ C,100\text{year}} = 7.6\text{MPa}$

B社管 $\sigma_{LPL,40^\circ C,100\text{year}} = 8.2\text{MPa}$

(2) 圧力低減係数による40℃での100年クリープ強度の算出

表3-6にJWWA K144に規定されている使用温度における圧力低減係数を示した。

表3-6 使用温度に対する圧力低減係数

使用温度	20℃	25℃	30℃	35℃	40℃
圧力低減係数	1.00	0.93	0.87	0.80	0.74

温度 t ℃における使用圧力は、圧力低減係数を用いて式3.5より算出できる。

$$P_t = P \times f_t \quad \text{式3.5}$$

ここに、

P_t ：温度(t ℃)での使用圧力(MPa)

P ：常温での使用圧力(MPa)

f_t ：温度(t ℃)での圧力低減係数

よって、圧力低減係数を用いると、A社及びB社の管の40℃における100年後のクリープ強度は表3-7のようになる。

表3-7 圧力低減係数による40℃での100年クリープ強度

POLITEC会員	$\sigma_{LPL,20^\circ C,100\text{year}}$	$\sigma_{LPL,40^\circ C,100\text{year}}$
A	9.9MPa	7.3MPa
B	10.3MPa	7.6MPa

(3) 圧力低減係数の妥当性

表3-8に、ISO 9080に基づいて式3.4により算出した $\sigma_{LPL,40^\circ C,100\text{year}}$ と、圧力低減係数(式3.5)を用いた $\sigma_{LPL,40^\circ C,100\text{year}}$ とを比較した。圧力低減係数(式3.5)による算出値より、式3.4による算出値の方が高いことがわかり、JWWA K 144に規定されている圧力低減係数を使用して100年クリープ強度を算出しても十分に安全であることがわかった。

表3-8 40℃での100年クリープ強度の比較

POLITEC会員	$\sigma_{LPL,40^\circ C,100\text{year}}$	
	ISO 9080に基づく算出値	圧力低減係数による算出値
A	7.6MPa	7.3MPa
B	8.2MPa	7.6MPa

3-2-3. 疲労限界状態での許容応力

埋設された水道管路に作用する動的応力は、下記の2つが挙げられる。

- ①内水圧の水撃圧による応力
- ②埋設時の輪荷重による応力

本項ではそれぞれの応力に対しての検証試験を実施し、許容応力を設定した。

3-2-3-1. 内圧の変動による疲労の照査

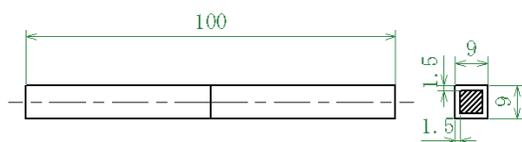
管・継手は、常用の圧力(静水圧)として最大0.75MPaに加えて、水撃圧が最大で0.25MPaのトータルで1.0MPaの最大圧力に耐えうる設計となっているが、水撃圧は繰り返しかかるため、疲労破壊の検証が必要である。ゆえに、JIS K 6774(ガス用ポリエチレン管)に規定されている下表にしめす試験を実施し、繰り返し応力が掛かる際の疲労破壊の検証を実施した。さらに、両試験共に図3-4の試験片にノッチを入れ、高温下で実験することで試験を促進した。

試験方法	試験目的
全周ノッチ式引張クリープ試験(FNCT)	一定応力を掛け続け、材料のクリープ特性を測定
全周ノッチ式引張疲労試験(FNFT)	繰り返し応力を掛け、材料の疲労特性を測定

(1) 試験方法

試験は、図3-5の試験模式図のように実施する。試験片は、図3-4のように管から切り出した供試体により、FNCTの場合は図3-6のように一定応力、FNFTの場合は図3-7のような繰り返し応力の波形を与える。なお、FNCTは破壊に至るまでの時間、FNFTは破壊に至るまでの回数を測定する。

FNFTの繰り返し応力は静水圧(0.75MPa)と脈動圧(0.25MPa)から算出し、図3-7のように最大内圧(0.75+0.25)MPaから算出される最大応力 σ_{max} は10MPaであり、最小圧力(0.75-0.25)MPaから算出される最小応力 σ_{min} は5MPaとし、応力比を $R(\sigma_{min}/\sigma_{max}) \approx 0.5$ とした。なお、水撃圧の波形は2Hzの正弦波とした。また、試験は80℃で加速している。



応力は、斜線部断面積(6mm角)で算出

図3-4 試験片形状

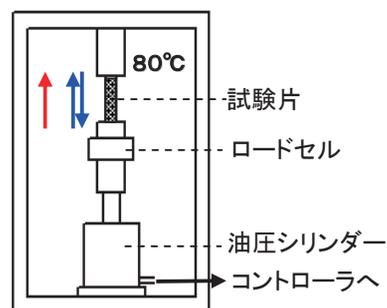


図3-5 試験模式図



図3-6 FNCTの応力波形

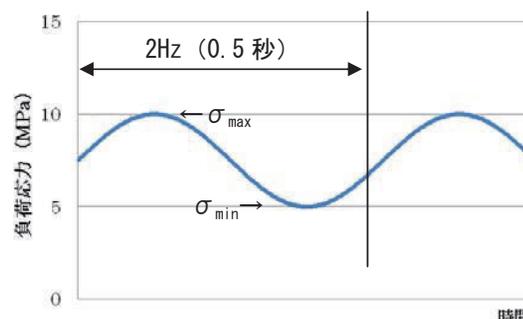


図3-7 FNFTの応力波形

(2) 試験結果

FNFTの試験結果(80℃(2Hz))を表3-9にしめす。

表3-9 全周ノッチ式引張疲労試験結果

破壊回数 (回)	換算時間 (hr) ※	応力 σ (MPa)	σ_{max} (MPa)	σ_{min} (MPa)	R ($\sigma_{min}/\sigma_{max}$) (-)	備考
932,603	129.5	8.2 ± 2.7	10.9	5.5	0.505	
2,185,701	303.6	6.2 ± 2.1	8.3	4.1	0.494	
6,077,706	844.1	5.5 ± 1.8	7.3	3.7	0.507	
110,37,030	1533	4.6 ± 1.5	6.1	3.1	0.508	中断

※振動数2Hz(周期0.5秒/回)より、換算時間(hr) = 破壊回数 × 0.5/3600

図3-8にFNCT、FNFTの結果を示す。FNFTでの σ_{max} の寿命線図は、FNCTクリープの寿命線図を下回らないことが確認できた。つまり、水撃圧を模擬した動的応力を加えても、疲労破壊が促進されないということである。

80℃の促進試験の結果から、20℃の結果を推定しても同様に考えられるので、疲労限界における許容応力は、クリープ限界状態の許容応力(8MPa)とした。

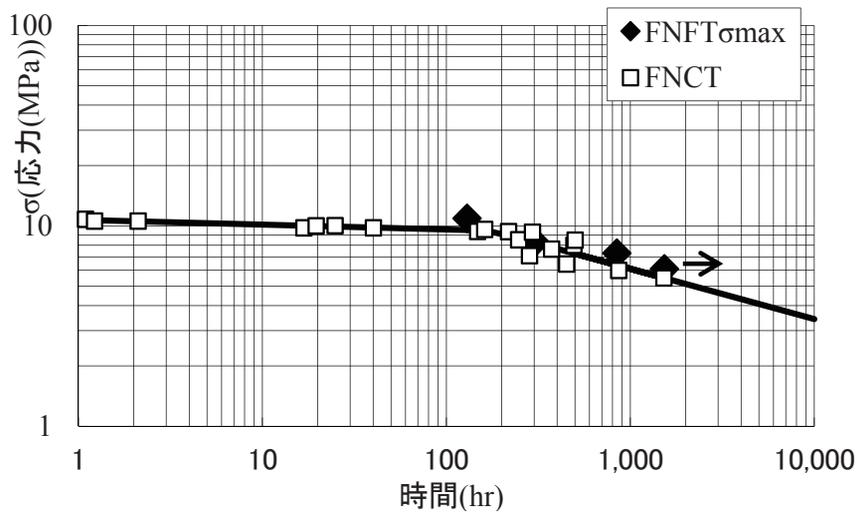
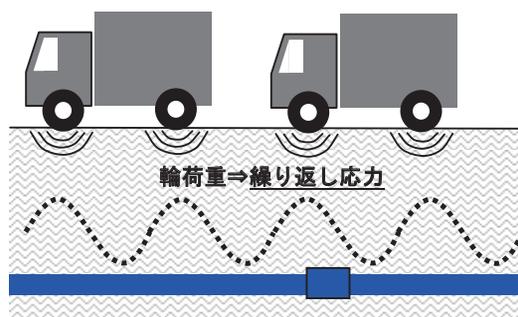


図3-8 FNCTとFNFTの試験結果

疲労限界状態(水撃圧)の許容応力=8MPa

3-2-3-2. 輪荷重による疲労の照査

埋設管路には輪荷重による繰り返しの応力がかかる。この動的応力による疲労破壊の検証のため、本節では、管に繰り返しの応力を負荷した「繰り返し偏平試験」を実施し、疲労破壊の検証を行った。



(1) 繰り返し偏平試験の試験方法

管から、切出した供試体に一定周期の繰り返し応力を与え、試験回数に対する撓み量を測定する方法である。

① 試験条件

- 試験設備：油圧サーボ試験機
- 試験温度：23℃
- 試験サイズ：呼び径100
- 試験片形状：L = 100mm
- 試験サイクル：1Hz
- 試験荷重
 - 1) 最小0.05～最大871 kN/m (応力値 8 MPa)
 - 2) 最小0.05～最大1088 kN/m (応力値10MPa)
 - 3) 最小0.05～最大1307 kN/m (応力値12MPa)



図3-9 試験場景

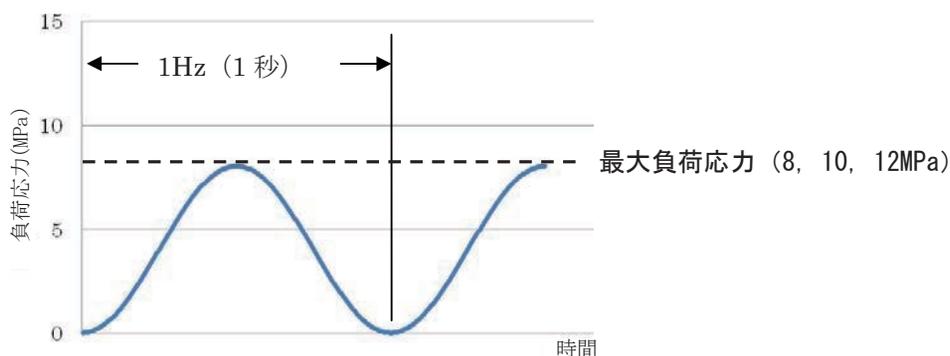


図3-10 繰り返し偏平試験の応力波形

② 規定荷重、及び試験回数の設定

道路占用埋設物件の浅層化技術検討報告書((財)道路保全技術センター)によると、水道配水用ポリエチレン管の輪荷重10tfに換算した載荷回数は1,687回/日で、50年で3,080万回(=1,687回/日×365日×50年)とされている。100年間の使用では、10tf換算で、

1,687回/日×365日×100年=6,158万回となる。

なお、10tfの輪荷重による管への最大発生曲げ応力は4.32MPaであり、撓み率は1.76%となる。(スパングラの式より)

本節では、100年後の疲労破壊の検証として、許容応力を算出するために、繰り返し偏平試験の荷重を4.32MPaから8、10、12MPaに上げて実験を行った。

(2) 試験結果

60万回までの繰り返し偏平試験の結果は図3-11に示す。

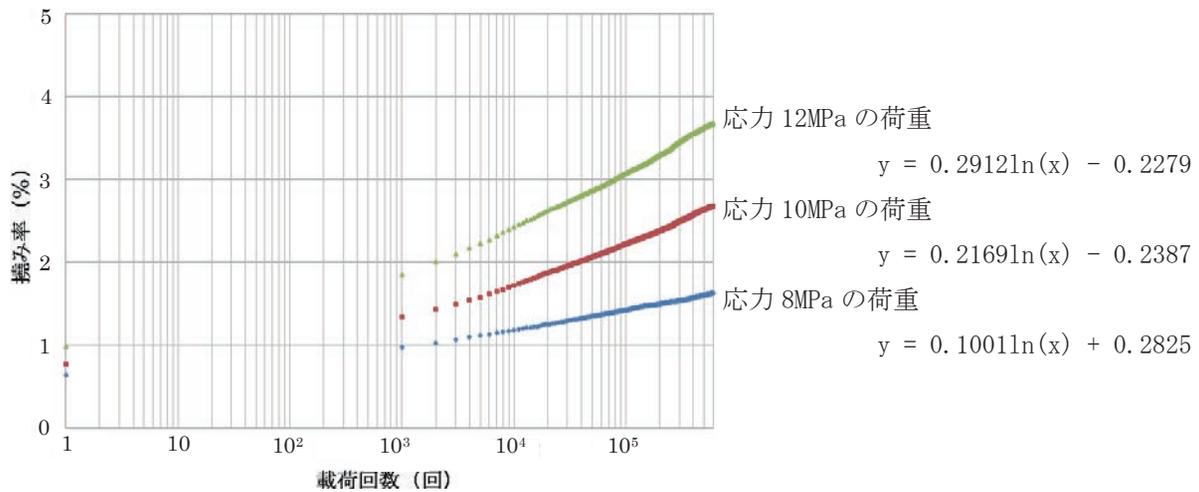


図3-11 繰り返し偏平試験の結果

10tfの輪荷重4.32MPaに対して、本実験では応力を8、10、12MPの3種類負荷したが、いずれのサンプルも疲労破壊には至らず、試験回数を増やす毎に管が偏平していくことが確認できた。

また、その管の撓み率は試験回数に対して対数曲線上に現れ、図3-11の式で表せる。

(3) 許容応力の算出

管の100年寿命の設計に関しては、許容応力を算出する必要がある。そのため、当協会では、管の撓み率が5%になった時点を超えて限界状態になった(破壊した)とみなし、許容応力を算出した結果を表3-10に示す。

表3-10 各応力別のみなし破壊(撓み率が5%)に至るまでの载荷回数
(対数近似式より算出)

負荷応力	みなし破壊に至る回数
8 MPa	2.933×10^{20} 回
10MPa	3.086×10^{10} 回
12MPa	6.264×10^7 回

これをグラフ化すると、図3-12となる。

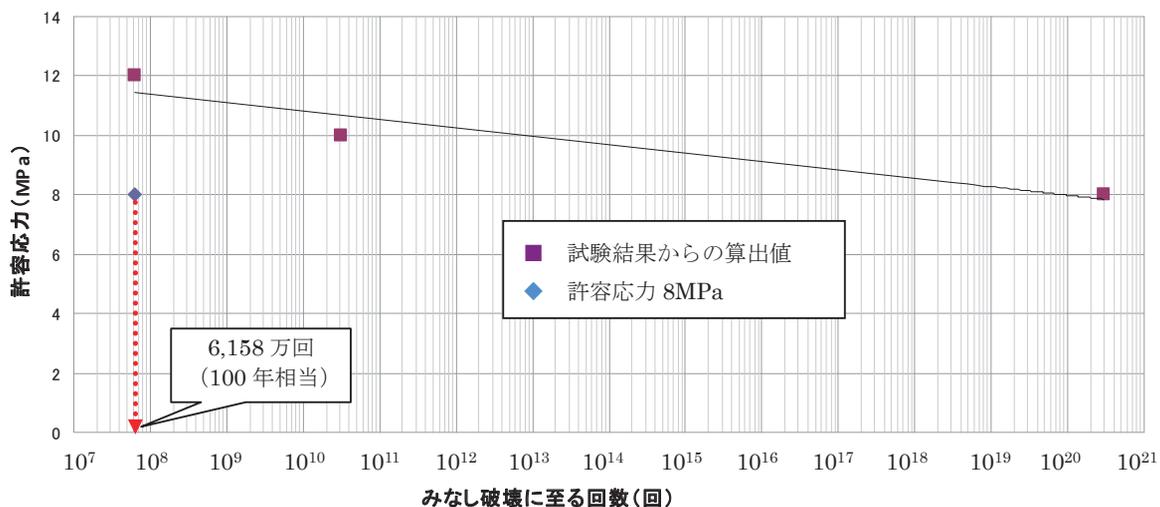


図3-12 各応力別のみなし破壊に至るまでの载荷回数

輪荷重による疲労限界の許容応力を求めるには、図3-12のグラフから、100年後の载荷回数(6,158万回=6.2E+07)の時の応力を算出すれば良い。

グラフ中の「◆」は、輪荷重の疲労限界状態の許容応力が8MPaであった場合の例であり、実際の管の実力「■」はそれ以上である。

上記の結果より、当協会では、輪荷重の許容応力を8MPaとすれば十分に安全であると判断した。

疲労限界状態(輪荷重)の許容応力=8MPa

3-2-4. 許容応力のまとめ

以上より、限界状態ごとに許容応力を算出した結果を表3-11にしめす。

表3-11 限界状態ごとの許容応力

限界状態	算出根拠	許容応力
終局限界	引張降伏応力(20MPa)の90%	18MPa
クリープ限界(20℃)	$\sigma_{LPL,20^\circ C,100year}$ より算出	8MPa
疲労限界	水撃圧により疲労破壊は促進されないので、クリープ限界(20℃)の許容応力を採用。輪荷重による許容応力は実験より算出。	8MPa

3-3. 形状係数(C_f)の検討

形状係数は、管の傷による応力集中による影響(3-3-1項)と継手応力集中の影響(3-3-2項)を考慮し、その大きい値を採用することにした。

3-3-1. 管の傷による応力集中による影響

水道配水用ポリエチレン管は管肉厚の10%深さの傷まで許容している。その傷に対し、応力集中がないかを検証し、形状係数を検討した。

(1) 試験方法

ISO 13479の低速き裂進展試験Slow Crack Growth : SCG方法に準じて評価した。図3-13にしめされるSCG試験供試体を用い、80℃熱水中に供試体を浸漬し、管に圧力を負荷し、破壊するまでの時間を測定した。使用した管の呼び径は50mmで、傷(ノッチ深さ)は、管最小肉厚の20%、ノッチ角度は60°、負荷圧力を数水準とし、応力はノッチ部を除去した残肉厚(図3-13.h寸法)で求めた。SCG試験のクリープ性能(ノッチ有り品)と、ブランク(ノッチ無し品)の性能の比較し、ノッチによる応力集中の検討をおこなった。

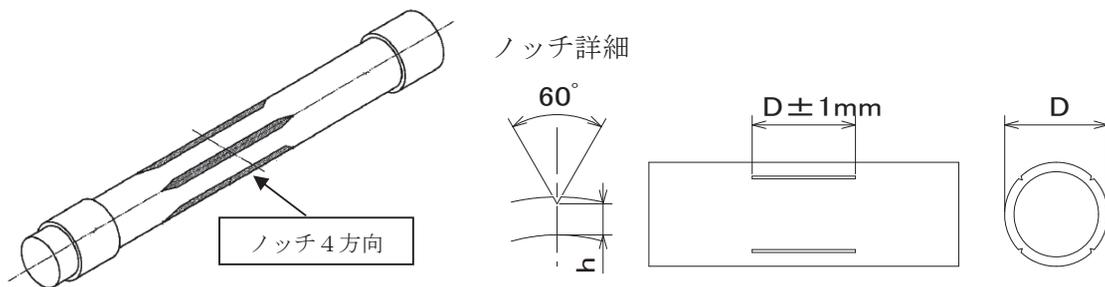


図3-13 SCG試験供試体

(2) 試験結果と考察

図3-14に、SCG試験の結果を併記する。ノッチ有りのものは、ノッチ先端に大きな応力集中が働くことが予想されるが、ノッチ無しに比べ、少なくとも1年以内でクリープ性能の低下や、knee point(クリープの傾きの変曲点が表れる点)の出現は認められなかった。従って、傷による形状係数は管の許容傷深さから、1.1とした。

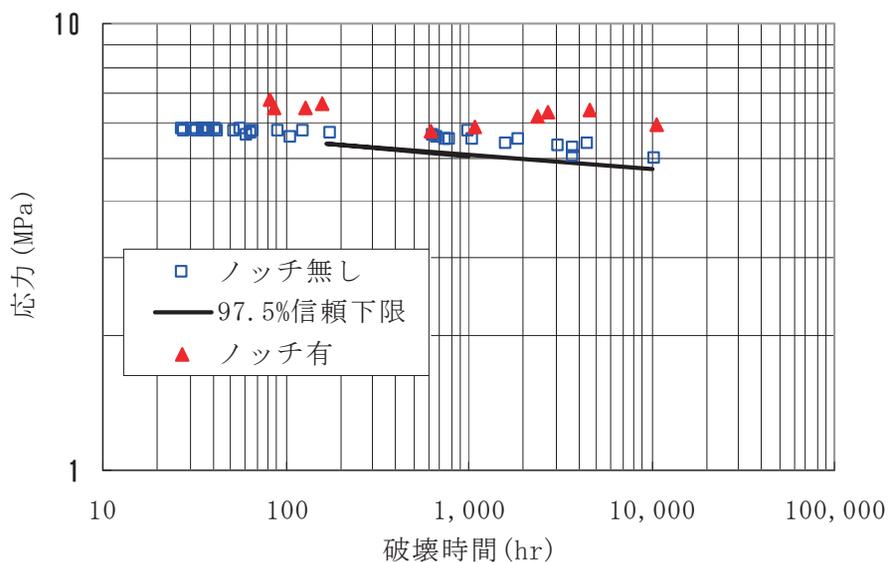


図3-14 SCG試験結果

3-3-2. 継手の形状による応力集中の影響

管と形状が異なる継手は、形状因子による応力集中が考えられるため、形状係数の検討が必要である。

図3-5は、EFソケット融着品に対し、内水圧1.0MPaを負荷した際の応力状態を、有限要素法を用いて弾性解析した結果である。直管部の応力が約5.0MPaに対し、EF融着の先端部は9.7MPaと約2倍の応力になっていることがわかる。

一方、実際の短期破壊試験では、管と継手を接合すると、全て直管部が破壊することを確認しており、形状係数は1.0と見ることができ、長期的にはSCG破壊が予想され、その形状係数の検討が必要である。

継手のクリープ試験は、表3-12に示す条件(JWWA K 145)で破壊、漏れ等異常ないことを確認することになっている。しかしこの条件では、表3-3の k_c から求めた時間は11年(1000hr×100/24hr/365day)である。従って、100年以上の耐久性を検証するには、継手を含めたクリープ試験を1年以上実施し、形状係数を検討する必要がある。

一方、管体試験片を用いた応力集中を評価するためのSCG試験においては、図3-16のとおりKnee Pointは80℃で1年以上認められない。

そこで、全ての継手で1年間クリープ試験を実施するのは現実的に困難であるので、継手の代表品種となるEFソケット融着品を用い、長期の応力集中の影響評価のクリープ試験をおこなうことにした。

表3-12 継手試験条件

試験温度	内圧	試験時間
20℃	2.48 MPa	100 hr
80℃	1.08 MPa	165 hr
80℃	1.00 MPa	1000 hr

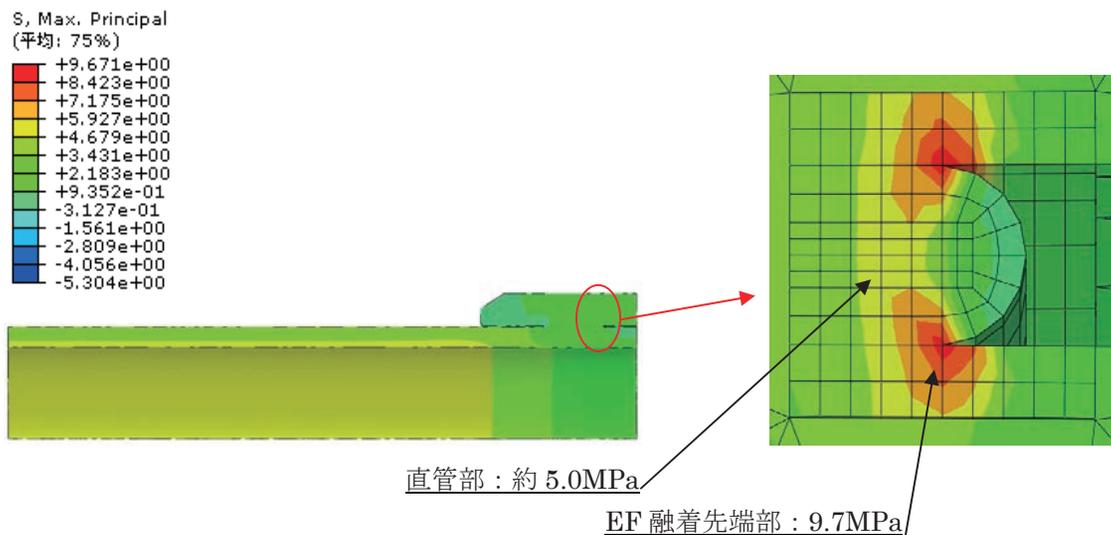


図3-15 EF融着部の応力解析

(1) 試験方法

図3-16に示すように、呼び径75mmのEFソケット融着品を供試体として80℃クリープ試験をおこなった。供試体に負荷する試験応力を以下のとおり設定した。

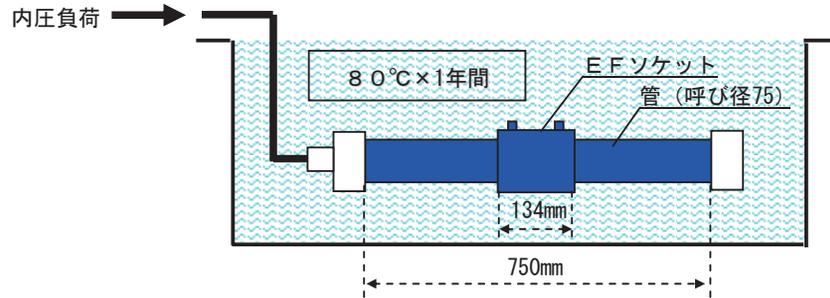


図3-16 継手内圧試験(80℃)概念図

A社の管体のクリープ特性(長期静水圧強度の平均値)は式3.6で表され(ISO9080による)、80℃における1年(8,760hr)後の管の破壊強度 σ を算出すると5.07MPaとなる。

$$\text{Log}(t) = -A - B/T \times \text{Log}(\sigma) + C/T + D \times \text{Log}(\sigma) \quad (\text{式3.6})$$

$$A = 101.405 \quad B = 23281.15 \quad C = 45575.894 \quad D = 32.263$$

$$t: \text{破壊時間}(\text{hr}) \quad T: \text{絶対温度}(\text{K}) \quad \sigma: \text{応力}(\text{MPa})$$

また、図3-17に示すように、JWWA K 144で規定されている熱間内圧クリープ試験(80℃)の試験条件(試験時間165hrで試験圧力1.08MPa⇒周方向応力では5.4MPa、試験時間1000hrで試験圧力1.00MPa⇒周方向応力では5.0MPa)を直線で結んで延長した1年(8,760hr)後の管の破壊強度 σ を算出すると4.56MPaとなり、A社の管体の破壊強度との比は5.07/4.56=1.112である。よって、形状係数の値として1.1及び1.2を設定した。

以上より、供試体に負荷する試験応力として、管の破壊時間が2,000時間及び5,000時間と予測される応力(形状係数を1.0)、さらに管の破壊時間が8,760時間と予測される応力に形状係数として1.1及び1.2を見込んだ応力の合計4水準を設定し、式3.6を用いて表3-13に示す値を算出した。

4水準それぞれについて、N=3で試験を実施した。

表3-13 供試体に負荷する試験応力

A社管体の クリープ特性	破壊時間(t)	Hr	2,000	5,000	8,760	
	破壊強度	MPa	$\sigma_1=5.30$	$\sigma_2=5.16$	$\sigma=5.07$	
試験応力	σ/C_f	MPa	$\sigma/1.0=5.30$	$\sigma_2/1.0=5.16$	$\sigma/1.1=4.61$	$\sigma/1.2=4.23$
試験回数	N	回	3	3	3	3

(2) 試験結果

試験結果を表3-14と図3-17に示す。破壊レベルはJWWA規格基準値延長線上より高く、かつ管の97.5%信頼下限より高いことがわかった。また、1年間破壊しないサンプルもあった。

表3-14 試験応力に対する結果

試験応力	MPa	$\sigma/1.0=5.30$	$\sigma/1.0=5.16$	$\sigma/1.1=4.61$	$\sigma/1.2=4.23$
試験結果	MPa : hr	5.31 : 3,306破壊	5.12 : 2,199破壊	4.61 : 8,760中断	4.26 : 8,760中断
		5.31 : 2,420破壊	5.12 : 8,450破壊	4.60 : 8,760中断	4.26 : 8,760中断
		5.31 : 8,760中断*	5.12 : 8,760中断	4.60 : 8,760中断	4.25 : 8,760中断

*破壊しなかったため中断

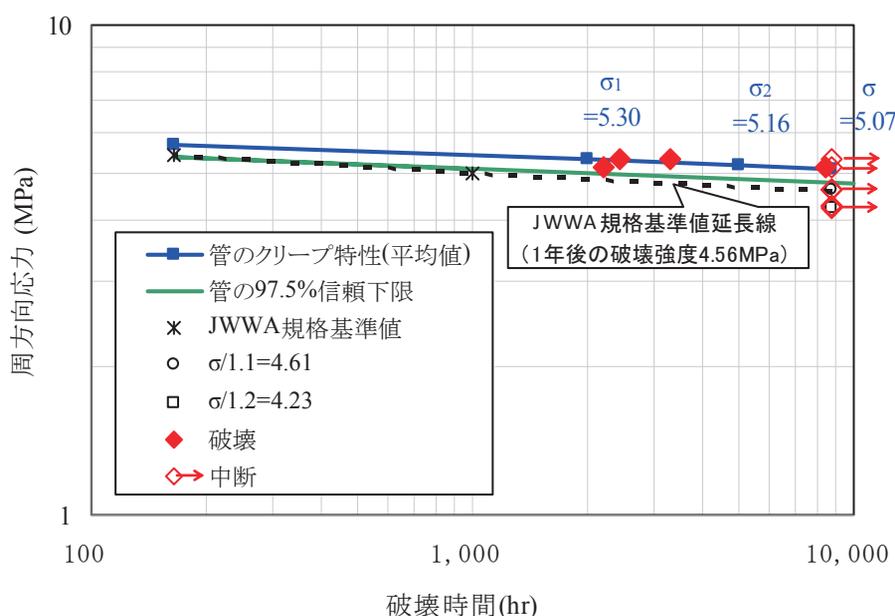


図3-17 継手内圧試験(80°C)の試験応力と結果

今回の結果より、

- a) 破壊レベルはJWWA規格基準値延長線上より高く、かつ管の97.5%信頼下限より高い。
- b) 80°Cで1年間KneePointはない。従って、20°Cでは、100年間kneePointがないと考える。
- c) JWWA規格基準値延長線上の1年(8,760hr)後の強度は4.56MPaであり、管のクリープ特性(長期静水圧強度の平均値)の破壊強度 σ は5.07MPaで、その比は $5.07/4.56 = 1.112 < 1.2$ となる。従って、継手形状係数は少なくとも1.2とすれば安全であると考え。

3-3-3. 形状係数(C_f)の決定

管の傷による応力集中による影響からの形状係数は1.1(3-3-1項)、継手応力集中の影響からの形状係数は1.2(3-3-2項)となる。従って、その大きい値1.2を形状係数(C_f)とすることにした。

形状係数(C_f) = 1.2

3-4. 素材係数(C_m)の決定

管や継手を製造する際は、少なからず素材や成形条件のばらつきが必ず存在する。そのため、ISO 9080では、管のクリープ強度はこれら素材や成形のばらつきを考慮した97.5%下方信頼性限界を採用している(図3-18の σ_{LTHS} から $2s$ を減じた σ_{LPL})。すなわち、予測標準式の平均値から正規分布分散における標準偏差 s の2倍下方の強度値である(式3.7)。

当協会では、素材のバラツキを更に考慮して安全を見ることとし、平均値から標準偏差の3倍値の下方強度、つまり99.8%下方信頼性限界の強度を用いて照査するため、素材係数(C_m)を用いることとした(式3.8)。その結果、素材係数は(式3.9)を用いて算出することができる。

表3-15に当協会に加盟する各社パイプのデータから素材係数 C_m を算出した結果を示す。この結果から、素材係数は1.05で十分安全である。

$$\log \sigma_{LTHS} - \log \sigma_{LPL} = \log \left(\frac{\sigma_{LTHS}}{\sigma_{LPL}} \right) = 2s \quad (\text{式3.7})$$

$$\log \sigma_{LTHS} - \log \left(\frac{\sigma_{LPL}}{C_m} \right) = \log \left(C_m \cdot \frac{\sigma_{LTHS}}{\sigma_{LPL}} \right) = 3s \quad (\text{式3.8})$$

$$C_m = \sqrt{\frac{\sigma_{LTHS}}{\sigma_{LPL}}} \quad (\text{式3.9})$$

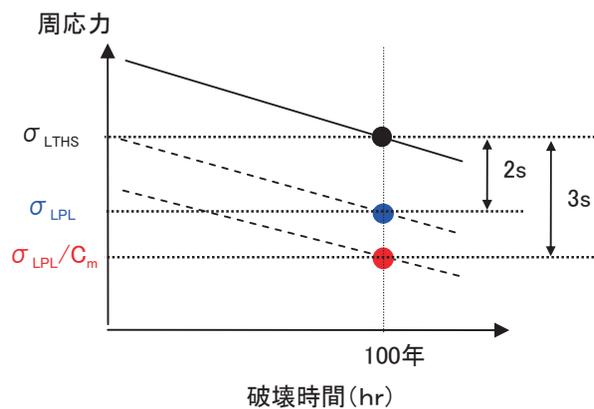


図3-18 素材係数 C_m の考え方

表3-15 素材係数の検討結果(使用温度: 20°C)

POLITEC 会員	50年後			100年後		
	σ_{LTHS}	σ_{LPL}	C_m	σ_{LTHS}	σ_{LPL}	C_m
A	10.6	10.1	1.03	10.4	9.9	1.03
B	10.6	10.2	1.02	10.4	10.0	1.02
C	10.8	10.4	1.02	10.7	10.3	1.02
D	11.2	10.9	1.02	11.1	10.8	1.02

素材係数(C_m) = 1.05

3-5. 内圧、外圧に対する100年寿命の照査結果

3-1節で述べたように、内圧と外圧に対する100年寿命の照査基準は、(式3.2)、(式3.3)を満足することである。3-2節で算出した限界状態ごとの許容応力(終局限界：18MPa、クリープ限界：8MPa、疲労限界：8MPa)、3-3節で決定した形状係数($C_f=1.2$)、3-4節で決定した素材係数($C_m=1.05$)を用いて、代表例として呼び径100の管路について100年寿命の照査を試みた。表3-16には前提条件、表3-17には照査結果をしめした。(式3.2)、(式3.3)を満足することは、表3-17の判定値($\sigma_c/\sigma_{1,2,3,4}$)が1以上となることであるが、判定値は全て1以上となることが確認できた。他のサイズでも、SDRが同じであるためほぼ同じ結果となる。よって、水道配水用ポリエチレン管は100年寿命のポテンシャルを十分有していると判断できる。

表3-16 100年寿命検証の前提条件(呼び径100, 20℃)

因子	記号	単位	限界状態の分類		
			終局限界	クリープ	疲労限界
設計水圧	P_i	MPa	1		
管外径/管厚(SDR)	D_0/t	mm	125/11.4		
土被り	h	m	0.6		
内圧、土圧荷重係数	A	-	1.5	1	1
補正係数(管周方向)*1	C_c	-	0.266		
トラック1後輪片荷重	Q	kg	30,000	10,000	10,000
曲率半径 $\alpha \times (D_0)$		-	75		
補正係数(管軸方向)*2	C_1	-	0.5		

*1 実験(水道配水用ポリエチレン管・継手に関する調査報告書(H10.9、日本水道協会))と計算の比

*2 実験と計算の比(道路占有埋設物件の浅層埋設検討報告書(H10.3、道路保全技術センター))

表3-17 100年寿命検証の照査結果(呼び径100, 20℃)

			記号	単位	限界状態の分類			
					終局限界	クリープ	疲労限界	
許容応力(照査基準)			σ_c	MPa	18	8	8	
照査結果	管周方向	内圧	内圧(水圧)による応力	σ_{ic}	MPa	7.474	4.982	4.982
			有効応力	σ_1	MPa	9.417	6.278	6.278
			判定値($\sigma_c/\sigma_1 > 1$)	-		1.911	1.274	1.274
		外圧	土圧による応力	σ_{tc}	MPa	0.109	0.0724	0.0724
			輪圧による応力	σ_{tc}	MPa	3.414	1.138	1.138
			外圧(土圧+輪圧)による応力		MPa	3.523	1.210	1.210
			有効応力	σ_2	MPa	4.438	1.525	1.525
	判定値($\sigma_c/\sigma_2 > 1$)	-		4.056	5.246	5.246		
	管軸方向	内圧	内圧(水圧)による応力	σ_{il}	MPa	3.737	2.491	2.491
			有効応力	σ_3	MPa	4.708	3.139	3.139
			判定値($\sigma_c/\sigma_3 > 1$)	-		3.823	2.549	2.549
		外圧	土圧による応力	σ_{il}	MPa	1.000	0.667	0.667
			輪圧による応力	σ_{il}	MPa	1.439	0.478	0.478
			外圧(土圧+輪圧)による応力		MPa	2.439	1.145	1.145
有効応力			σ_4	MPa	3.073	1.444	1.444	
判定値($\sigma_c/\sigma_4 > 1$)	-		5.857	5.539	5.539			

4. 耐震性について

4-1. 水道配水用ポリエチレン管の被災調査結果

管と継手が一体化される水道配水用ポリエチレン管路は、材料特性である柔軟性と相まって地盤変位に対してよく追従する。水道配水用ポリエチレン管の耐震特性照査用の許容歪は、日本水道協会「水道配水用ポリエチレン管・管継手に関する調査報告書」に掲載されている各種実験結果より、応答変位法による耐震計算においては3%、地震変位に対する耐震計算においては6%と設定している。なお、阪神淡路大震災の発生歪みに対して十分な強度を持っていることが確認されている。

またこれまで、水道配水用ポリエチレン管の耐震性能を確認するために、地割れ実験や段差実験を実施しているが、いずれの実験でも地盤変位を管体の変位で吸収し管路異常がなく、高い耐震性を有していることを確認している。

さらに、2003年以降に発生した実際の大規模地震における水道配水用ポリエチレン管の被害調査結果を以下に示すが、特殊な事象を除き被害の報告はほとんどない。

表4-1 2003年以降の大規模地震における水道配水用ポリエチレン管の被害調査結果

発生年月	地震名	最大震度	調査地域	管路延長	被害状況
2003.7	宮城県北部地震	6弱	鹿島台町	約10km	無
2003.9	十勝沖地震	6弱	浦河町	約2.6km	無
2004.10	新潟県中越地震	6強	小千谷市、	約11.4km	※1
			旧山古志村	約10.7km	※2
2007.3	能登半島沖地震	6強	門前町	約2km	無
2007.7	新潟県中越沖地震	6強	柏崎市、西山町	約13km	無
2008.6	岩手・宮城内陸地震	6強	奥州市	約47.4km	無
2011.3	東北地方太平洋沖地震	7	(1次調査) 栗原市、登米市、大崎市	約58km	無
		6強	(2次調査) 気仙沼市、岩沼市、七ヶ浜町、 涌谷町、南三陸町、石巻企業局	約79km ※4	※3
		6強	(3次調査) 奥州市、矢巾町、滝沢村、釜石市、 大槌町、久慈市	約125km ※4	無

※1 フランジ部からの漏水が1箇所確認された。管および継手に被害なし。

※2 裏山の崩落と共に道路が約40m崩壊したことにより、管の破断1箇所あり。

※3 地震による被害なし。但し、津波によって防波堤破壊と共に地盤ごと破壊された被害、また水管橋、橋梁添架等、露出部の津波による被害が計8箇所あり。

※4 平成22年度水道統計による。

4-2. 地震に対する100年以上の耐久性検証

今回、さらに地震に対する耐久性を検証するため、新たに以下の設計条件を設定し、「レベル2地震動に対する耐震計算」及び、「地震によるダメージが管の耐久性に与える影響評価」をおこなった。

【設計条件】

100年の間にレベル2地震動(当該地において過去及び未来において発生する最大級の地震動(阪神淡路大震災クラス)が少なくとも1回は経験するものとし、地震のダメージが管の耐久性に影響を与えない

4-2-1. レベル2地震動に対する耐震計算

水道配水用ポリエチレン管のレベル2地震動に対する耐震計算を水道施設耐震工法指針・解説に基づいて行った結果を表4-2にしめす。設計内圧、自動車荷重等の常時作用する管軸方向歪みと地震動による管軸方向歪みの合計は最大1.7%程度であり、許容歪み3%(繰返し伸縮試験等の結果、定めたもの)以下であることから安全である。

表4-2 管の耐震計算結果(レベル2地震動での管発生歪(%))

呼び径	50	75	100	150	200
設計内圧 (1.0MPa)	0.216	0.219	0.218	0.219	0.220
自動車荷重 (T-25)	0.263	0.221	0.187	0.156	0.133
温度変化 ($\Delta t=15^{\circ}\text{C}$)	0.180	0.180	0.180	0.180	0.180
不同沈下 ^{*a}	0.014	0.014	0.013	0.012	0.012
レベル2地震動 ($\eta=2.0$ ^{*b})	1.008	1.008	1.008	1.008	1.008
合計	1.682	1.641	1.607	1.575	1.552
ポリエチレン管の許容歪み	3.0%				

* a 軟弱地盤区間15m盛土高さ1m

* b 地盤の不均度係数(河川流域等極めて不均一な地盤)

4-2-2. 地震によるダメージが管の耐久性に与える影響

水道配水用ポリエチレン管・継手に関する報告書(平成10年 日本水道協会)に記載されている初期変形品の内圧クリープ試験の結果を示す。

(1) 試験方法

図4-1に示すように、管を引張試験機に設置し、所定の変位になるまで引張った後、図4-2に示すように供試体を固定し、軸方向に伸縮しない状態で予歪を与えたものの内圧クリープ試験を実施した。

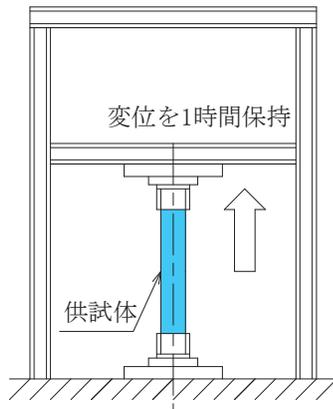


図4-1 変位保持装置模式図

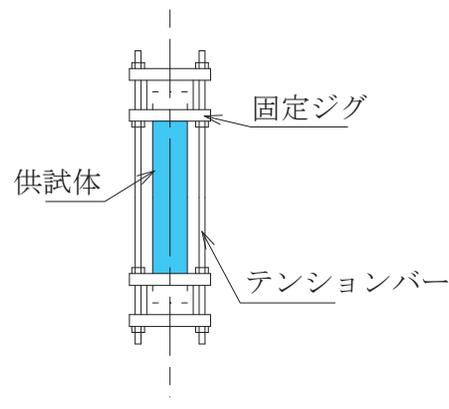


図4-2 供試体の固定方法

(2) 試験条件

- ① 管の軸方向予歪み：2.5%、5%、7.5%、10%
- ② 試験温度：20℃

(3) 試験結果

管の97.5%信頼下限(予歪なし)と、今回試験の結果を図4-3に示す。すべての条件において、97.5%信頼下限を上回る結果が得られた。

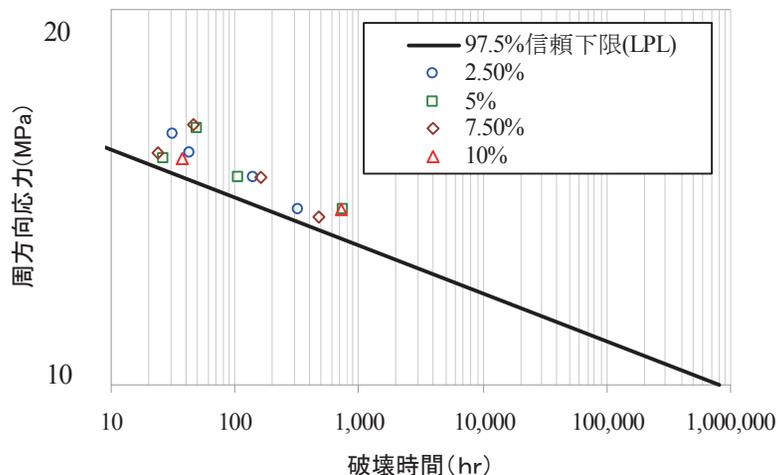


図4-3 初期変形品の内圧クリープ試験結果

(4) 照査結果

レベル2地震動で発生しうる管の発生歪は最大2%であるため、レベル2地震動の影響で管の耐久性が低下することはない。

今回の試験結果からは、レベル2地震動の最大発生歪の5倍(10%)の歪を与えた場合でも、熱間クリープ試験の97.5%信頼下限を上回る結果となったため、さらなる安全性も確認できた。

5. 耐塩素水性について

5-1. 耐塩素水性の経緯

「耐塩素水性」は、1978年頃に、一部の都市において単層ポリエチレン管（PE50以下。布設後、数年以上経過した埋設配管）の内面に水泡が発生し、稀な例として水接合管壁が薄片状に剥離した事故に由来する。原因の一つとして、管材料に配合されたカーボンブラックによることが明らかにされた。

以降、当協会の管仕様は、接水面にカーボンブラックを含有しないものとし、1997年に制定された日本水道協会規格JWWA K144（水道配水用ポリエチレン管）及びJWWA K145（水道配水用ポリエチレン管継手）の性能規定項目「耐塩素水性」に関わる「規定条件での水泡発生がないこと」を満足しており、現在まで同種の問題はまったく発生していない。

ここでは、100年寿命確立のため、塩素水による水泡発生時間寿命を再検討し、現行の管体（PE100 HDPE）の持つ「耐塩素水性」性能を明らかにした。更に、長期的に塩素水の影響を受けた管が水質に与える影響等も合わせて評価した。

5-2. 塩素水の想定条件

水道水は飲料水として安全であることが第一条件であるため、日本では塩素消毒を実施している。水道施行規則で給水栓での残留塩素濃度は、0.1mg/L以上（遊離残留塩素）とされている。また、おいしい水の要件としてカルキ臭を感じない水は、0.4mg/L以下と言われており、水質管理目標値は1.0mg/L以下である。

そこで、ここでは耐塩素水寿命を、塩素濃度を1ppm、使用温度20℃における水泡発生時間とした。

5-3. 塩素水による水泡発生時間の予測

5-3-1. 無負荷状態

(1) 試験方法

供試管は協会加盟のA社のものを用いた。試験は約50mmの試験片を2個切り採り、24時間毎に新しく調整したpH6.5±0.5の塩素濃度 N (ppm)を変えた供試水に漬け、試験温度 T (K)を変えた時の管表面の水泡発生時間 t (hr)を求めた。表5-1に、塩素濃度 N および試験温度 T 試験条件をしめした。なお、塩素濃度 N は500~3,000ppmに濃縮して試験を促進した。

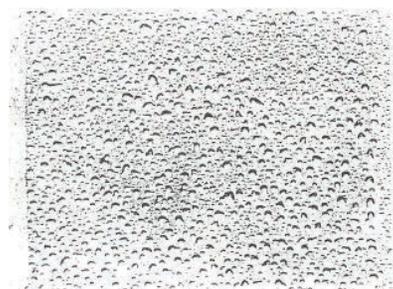


図5-1 単層給水管の塩素による水泡

表5-1 水泡発生時間の測定条件

濃度 N (ppm)	絶対温度 T (K)	水泡発生時間 t (hr)
3000	70℃ = 343K	各条件サンプル数 2個
2000	60℃ = 333K	
1000	40℃ = 313K	
500	20℃ = 293K	

(2) 結果とデータの分析

① 絶対温度と水泡発生速度の関係

絶対温度(1/T)と水泡発生速度 $k (= 1/\tau/3600 (1/sec))$ の対数($\ln(k)$)の関係を図5-2に示すが、両者は線形の関係で表せる。

また、図5-3に塩素濃度と図5-2の傾きから求めた活性化エネルギーの関係を示すが、傾きに濃度依存性はないこともわかり、濃度が異なっても同じ活性化エネルギーを使用できる。

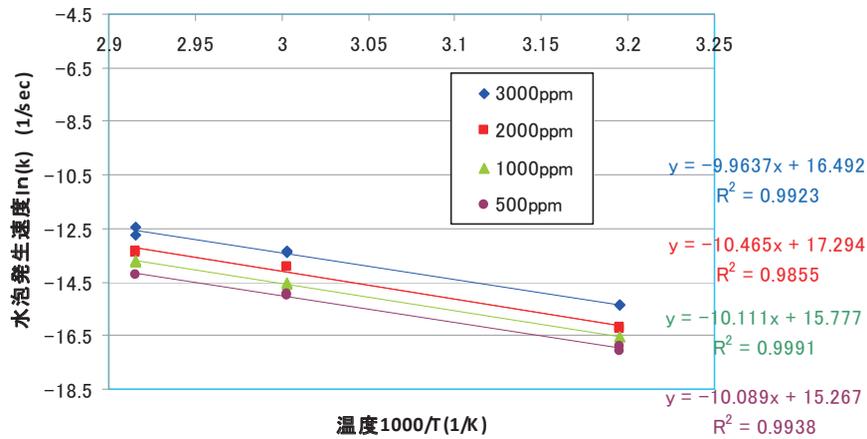


図5-2 水泡発生速度のアレニウスプロット

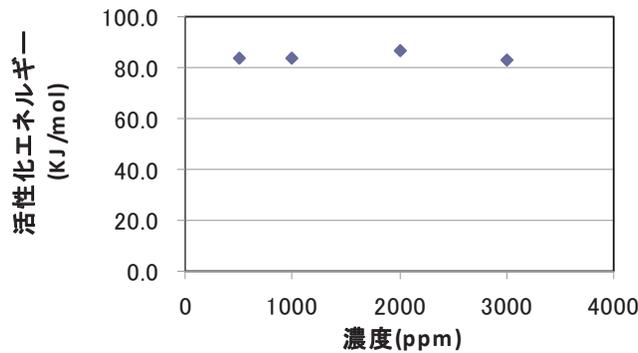


図5-3 塩素濃度と活性化エネルギー

② 水泡発生速度の塩素濃度依存性

水泡発生速度の塩素濃度依存性は、図5-4のとおり両対数で線形の関係で表された。

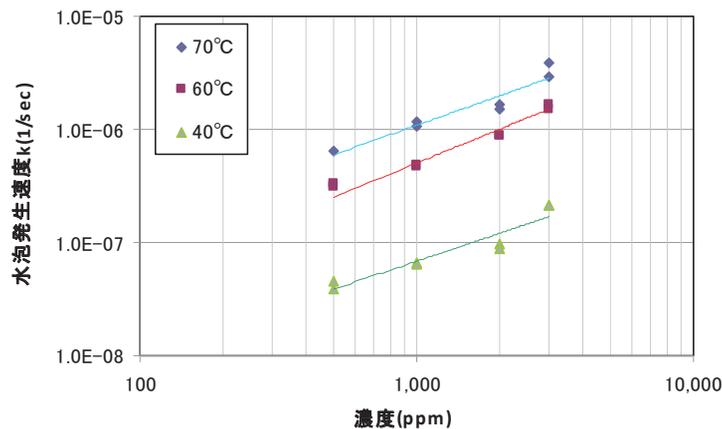


図5-4 水泡発生速度の塩素濃度依存性

③一般式の検討

1 ppm での水泡発生時間を算出するため、一般式を導いた。

図5-2, 図-3より

$$k = A' \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \dots\dots\dots \text{式5.1}$$

図5-4より

$$k = A \cdot N^b \dots\dots\dots \text{式5.2}$$

一般式を下記の通り仮定する。

$$k = 1/\tau / 3600 = A \cdot N^b \cdot \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \dots\dots\dots \text{式5.3}$$

- ここで、 k : 水泡発生速度(1/sec)
- τ : 水泡発生時間(hr)
- N : 塩素濃度(ppm)
- Q : 活性化エネルギー(kJ/mol)
- R : ガス定数(8.31447J/mol)
- T : 絶対温度(K)
- A, b : 定数

式5.3の対数を取り

$$\log(3600) - \log(\tau) = \log A + b \log(N) - \log_{10} e \cdot \frac{Q}{RT} \dots\dots\dots \text{式5.4}$$

Log(A)、 $\log_{10} e \cdot Q/R$ 、 b は定数のため、

$$\log(\tau) = C_1 + C_2 \cdot \frac{1}{T} + C_3 \log(N) \dots\dots\dots \text{式5.5}$$

ここで、 C_1, C_2, C_3 : 係数

図5-2の試験結果と式5.5を用い重回帰分析した結果、

- $C_1 = -7.898$
- $C_2 = 4396$
- $C_3 = -0.8500$ が得られた。

④信頼限界の検討(97.5%)

長期試験での97.5%信頼限界は次のとおり

$$\tau = \tau_0 - t_{n-p-1} \left(\frac{0.05}{2} \right) \cdot \sigma \dots\dots\dots \text{式5.6}$$

ここで、 τ_0 : 予測中心値(式5.5、 C_1, C_2, C_3 、から算出)

$t_{n-p-1} \left(\frac{0.05}{2} \right)$: 自由度 $n-p-1$ の t 分布関数で片側0.05/2の確率点

- n : サンプル数
- p : 変数の数(時間と温度なので2)
- σ : 予測値の不偏分散の平方根

(3) 水泡発生予測結果

図5-5に水泡発生時間と、97.5%信頼下限をしめす。

A社管は、20℃、1 ppmの条件で、早ければ464万hr (529年)に水泡が発生することが予測される。

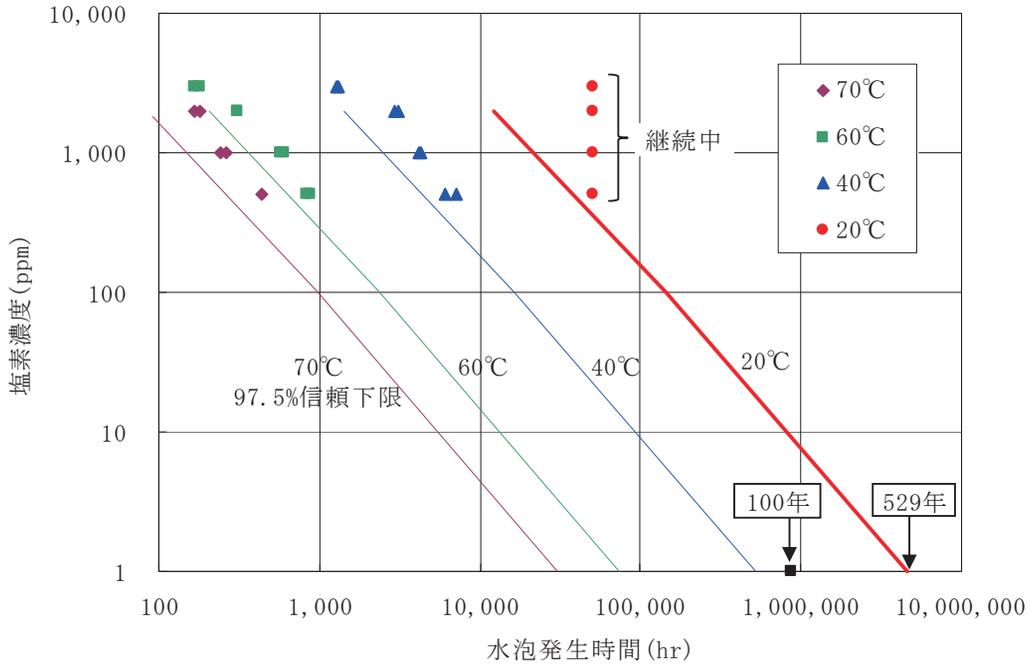


図5-5 A社管の耐塩素水性能(水泡発生時間の予測)

(4) 考察

塩素水濃度と水泡発生時間との関係を(式5.6)より得られる97.5%信頼下限線とともに図5-5に示した。これらの関係より使用条件を塩素濃度1 ppm、使用温度20℃とすると、供試管(A社管)は、早ければ464万時間(529年、97.5%信頼下限値)に水泡が発生することが予測される。また、協会に加盟する他社管の水泡発生寿命も(式5.6)の結果に良く合うことも確認されている。

5-3-2. 応力負荷状態

水泡発生は応力負荷に影響されると考えられる為、応力を負荷した状態での試験を実施した。

(1) 試験方法

水泡発生は応力負荷に影響されると考えられる。その効果を見るため、5-3-1で用いた試験片を室温下で治具により強制的に扁平させた負荷試験片(図5-6, 図5-7参照)と無負荷試験片を、それぞれ、試験温度60℃、塩素濃度2000(ppm)の条件の浸漬により水泡発生時間を調べた。

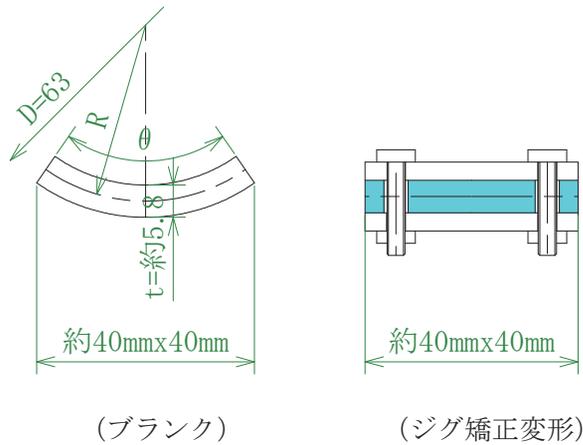


図5-6 評価サンプル形状

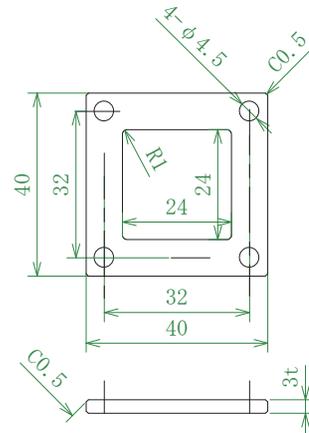


図5-7 ジグ詳細(SUS304)

(2) ジグ矯正品の初期応力の算出

図5-6より、下記の通りである。

中心半径 $R = (D - t) / 2$ 、弧の中心長さ $L = R \cdot \theta = (D - t) / 2 \cdot \theta$ 、

内径半径 $R' = (D - 2t) / 2$ 、弧の内側の長さ $L' = R' \cdot \theta$ である。

これが直線に伸ばされ、Lが同じとすると、管内面に発生する歪(ϵ)は、

$$\epsilon = (L - L') / L' = ((D - t) - (D - 2t)) / (D - 2t) = t / (D - 2t) \text{ となる。}$$

今、 $D = 63\text{mm}$ 、 $t = 5.8\text{mm}$ より、初期曲げ歪 ϵ_b は11.3%となり、PE100材の降伏歪 ($\epsilon_y = 8\%$) を超え試験片は弾塑性状態にある。

(3) 試験結果

無負荷品と負荷品の水泡発生時間を表5-2に、試験前後の写真を表5-3, 表5-4に示す。

表5-2 試験結果(水泡発生時間)

A社管		B社管	
無負荷品	負荷品	無負荷品	負荷品
360hr	192hr	360hr	360hr 発生なし

表5-3 試験結果(A社管)(写真)

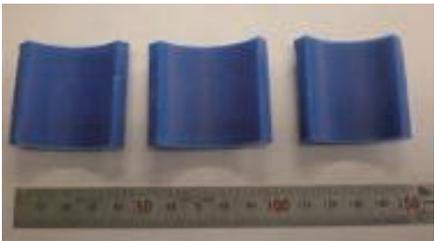
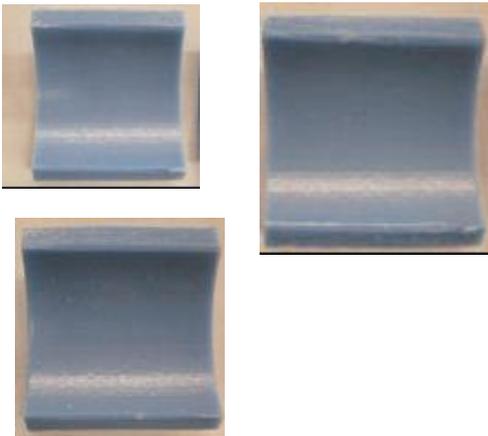
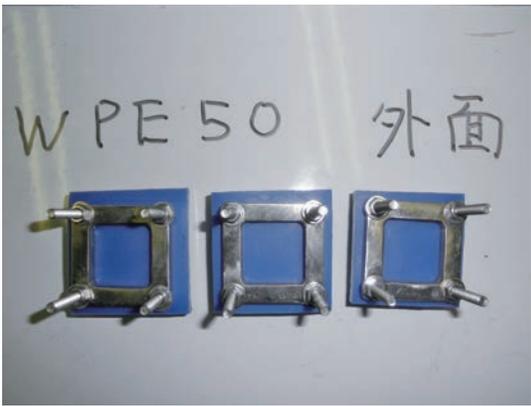
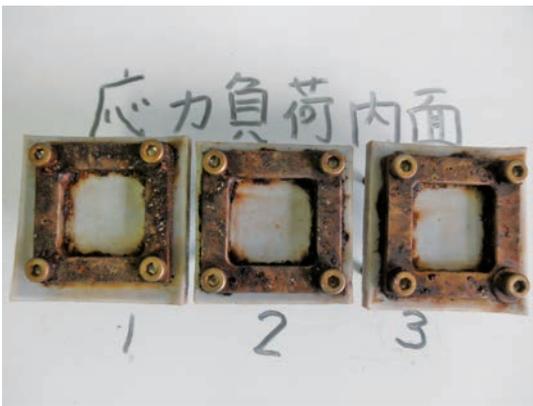
	ブランク	応力負荷状態
試験前		
試験後		

表5-4 試験結果(B社管)(写真)

	応力負荷状態 (外面)	応力負荷状態 (内面)
試験前	<p>WPE50 外面</p> 	<p>WPE50 内面</p> 
試験後	<p>応力負荷外面</p>  <p>1 2 3</p>	<p>応力負荷内面</p>  <p>1 2 3</p>

(4) ジグ矯正品の残留応力量の算出

A社品試験後に、ジグ矯正品のジグを取外し、取外し前後で標線間を測定し、残留応力を検討した。

ジグ取外前は $X1 = 20.69\text{mm}$ 、取外直後は $X1 = X2$ であったが、取外し20日経過後は $X2 = 20.32\text{mm}$ であった。 $X1$ 長さが $X2$ 長さになるときの歪みは約8%である。

従って、水泡発生後の治具解放により約3%の弾性ひずみ回復があり、浸漬中の応力負荷が確認された。

(平板部標線 $X1$ がジグ取り外し $X2$ に変化する時の歪みを算出した)

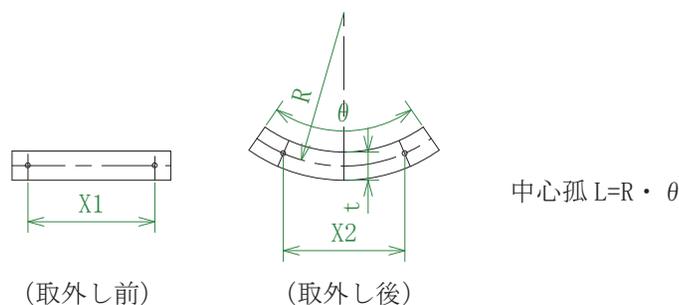


図5-8 ジグ取外し前後の図

図5-8において、取外し後の中心弧 L は、取外し前 $X1$ と同じと考える。

$$\text{中心弧 } L = R \cdot \theta = X1 \quad \therefore \theta = X1/R \cdots \text{①}$$

$$\text{また、} X2 = 2 \cdot R \cdot \sin(\theta/2) \quad \therefore \theta = 2 \cdot \sin^{-1}(X2/2R) \cdots \text{②}$$

R を仮定し、①と②の θ が一致することとする。

計算結果、 $R = 31.35\text{mm}$ 、 $\theta = 0.66\text{rad}$ (37.8deg) となり、

$$\text{歪}(\varepsilon) = (X1 - (R - t/2)\theta) / X1 = 0.08 \text{ となる。}$$

(5) 考察

以上の結果より、ポリエチレン管の降伏歪を超える弾塑性状態においても、JWWA規格(168hr水泡発生なし)の耐塩素水性を満足する。また、表5-2より応力負荷効果を単純比例関係と仮定した場合、弾塑性状態において、A社管でも282年以上(529年 $\times 192/360$)の耐塩素水性寿命があることが推定される。

5-4. 塩素水の影響を受けた管の水質に及ぼす影響

(1) 試験方法

塩素水の影響を長期間に渡り受けた水道用ポリエチレン管が、水質に影響を及ぼさないことを確認するため、塩素水濃度2000ppm、60℃で168hr浸漬したサンプルを用い、JWWA K144(水道配水用ポリエチレン)の溶出試験を実施した。

(2) 試験結果

耐塩素水性試験168hr後に水泡に発生はなく、表5-5に示した溶出試験結果が得られた。

表5-5 耐塩素水性評価試験後の溶出試験結果

項目	規格値	結果	判定
①味	異常でないこと	異常なし	JWWA Z 110 : 2004 付属書17(規定)
②臭気	異常でないこと	異常なし	JWWA Z 110 : 2004 付属書18(規定)
③色度	0.5度以下	0.5度未満	JWWA Z 110 : 2004 付属書19(規定)
④濁度	0.2度以下	0.1度未満	JWWA Z 110 : 2004 付属書20(規定)
⑤有機物	0.5mg/l以下	0.3mg/l未満	JWWA Z 110 : 2004 付属書35(規定)
⑥残留塩素の減量	0.7mg/l以下	0.1mg/l未満	JWWA Z 110 : 2004 付属書4(規定)

(3) 考察

2000ppm、60℃、168hrは、加速比の関係より1ppm、20℃で217万hr(247年)に相当すると予測される。したがって、100年以上の間、塩素水に浸漬されたポリエチレン管においても、水質基準に影響を与える管材料変化は無いものと考えられる。

5-5. 耐塩素水性の照査結果

現行のポリエチレン管(PE100 HDPE)の持つ「耐塩素水性」性能(塩素水による水泡発生時間寿命)を検討した結果、無負荷状態および弾塑性負荷状態で、それぞれ500年以上及び200年以上の性能寿命があることが推定できた。

また、100年間、塩素水に浸漬された管でも水質基準に影響を与える管材料変化は無いことが検証できた。

表5-6 耐塩素水性の照査結果

試験項目	試験結果	備考
1. 無負荷状態の耐塩素水性試験	水泡発生予測時間 529年	20℃、塩素濃度1ppm
2. 弾塑性負荷状態の耐塩素水性試験	水泡発生予測時間 282年	20℃、塩素濃度1ppm
3. 耐塩素水性試験後の溶出試験	水質基準に影響を与える管材料変化なし	100年間塩素水に浸漬後

6. 結論

本研究では、水道配水用ポリエチレン管の100年寿命の確立のため、管路の寿命に影響を及ぼす以下の3要因について検証を行った。

- | |
|---|
| 1) 内圧・外圧に対する耐久性(短期的、また長期的荷重に対する耐内圧・耐外圧性能) |
| 2) 地震に対する耐久性(レベル2地震動に対する耐震性) |
| 3) 残留塩素に対する耐久性(応力負荷時を含む耐塩素水性) |

その結果、

- 1) 形状因子や外面傷による応力集中、また素材や成形のばらつきを考慮した上で、内圧、外圧それぞれの短期的な荷重(終局限界状態)、長期継続的に生じる荷重(クリープ状態)、長期継続的に生じる繰返荷重(疲労限界状態)について照査した結果、最も影響の大きな荷重は内外圧にかかるクリープ状態であるが、この応力値も100年後の許容応力以下であり安全である。
- 2) 内圧、自動車荷重等により常時発生する歪とレベル2地震動による管軸方向歪の合計が許容歪以下であり、安全である。また地震によるダメージにより管の耐久性が低下することはない。
- 3) 塩素濃度 1 ppm、温度20°Cの条件下では、応力無負荷状態で500年以上、また水圧等、応力負荷状態で200年以上の耐塩素水性能を有している。

等が、確認できた。

以上、水道配水用ポリエチレン管路が100年以上の寿命を十分有していることを検証した。

(参考文献、出典)

- 1) 水道施設設計指針(2000年 日本水道協会)
- 2) 水道配水用ポリエチレン管・継手に関する調査報告書(平成10年9月 日本水道協会)
- 3) ISO9080(2003) Plastic piping and ducting systems – Determination of long – term hydrostatic strength of thermoplastics material in pipe form by extrapolation
- 4) ISO12162(2009) Thermoplastics materials for pipes and fittings for pressure applications – Classification, designation and design coefficient
- 5) ISO4427(1996) Polyethylene (PE) pipes for water supply – Specifications
- 6) JWWA K144、145 水道配水用ポリエチレン管、及び管継手(2010年 日本水道協会)
- 7) ポリエチレン管技術調査報告書(平成15年2月 日本ガス協会)
- 8) 道路占用埋設物件の浅層化技術検討報告書(平成10年3月 道路保全技術センター)
- 9) 水道施設耐震工法指針・解説(2009年度版 日本水道協会)
- 10) 水道統計「平成22年度」(日本水道協会)
- 11) 水道ビジョンフォローアップ検討会資料(平成19年、厚生労働省健康局水道課)

用語の解説

用語	解説
応力	物体に変形を与えたとき、物体内に働く力をいい、一般にMPa {N/m ² } の単位でしめす。
応力集中	固体に外力を加えるとき、不規則な形状の部分、とくに鋭い切込みの底部には平滑な部分にくらべてきわめて大きい応力を生じる。これを応力集中という。
弾性	固形物質に力を加え変形させたのち応力を取り除くと、ただちに原形に戻る性質をいい、このときの変形を弾性変形という。また、応力を取り除いても、ただちに原形にもどらなくなるときの応力の下限を弾性限度という。
弾性係数	一様な太さの棒の一端を固定し、他端を軸方向に引く(または押す)場合、棒の断面に働く応力を σ 、単位長さあたりの伸び(または縮み)を ε とすれば、比例限度内で $\sigma = E \cdot \varepsilon$ という関係が成り立つ。 このように伸び変形で応力 σ とひずみ ε との間に比例関係が成り立つとき、比例定数 $E = \Delta\sigma/\Delta\varepsilon$ で定義される。
延性破壊とぜい性破壊	ポリエチレン管は一定温度のもとで、一定内圧を長時間加えると、温度または圧力によって二つおりの破壊現象をしめす。かなり高温かまたは高圧の時は、短時間のうちに管全体が大きく膨らんだ後に局部的に破壊する。これを延性破壊という。一方比較的低温または低圧の時は、ほとんど膨張することなく、長時間経過した後に、小さくき裂を生じる。これをぜい性破壊という。
クリープ	材料に応力が加わった時に生じるひずみのうち、時間依存性の部分をいう。クリープの初期で、ひずみ速度が変化している遷移領域を第1期クリープ、ひずみ速度一定の常温領域を第2期クリープという。一定時間(たとえば1000時間)にクリープ破断を生じる応力をクリープ破壊強さといい、一定時間に一定のクリープ(たとえば10000時間に0.1%ひずみ)を生じる応力をクリープ限度という。クリープ試験において荷重を除いたのちにおける変形率の減少をクリープ回復といい、これは試験片に加わっていた荷重を取り除き、任意の時間が経過したのちひずみを除く直前のひずみから差し引いたものである。
疲労	固体材料に繰り返し応力を引き続き加えると、一定方向の場合よりもはるかに小さい応力で破壊を生じる。この現象を材料の疲労といい、このときの破壊を疲労破壊という。 疲労試験の結果を縦軸に応力S、横軸に破壊までの繰り返し数N(対数でしめすことが多い)をとってしめたものをS-N曲線という。 繰り返し応力のもとで材料が破壊するまでの繰り返し数あるいは時間を疲労寿命という。
環境応力き裂	環境によって促進される応力き裂のことで、ストレスクラッキングともいい、特に溶剤によって起こる場合は溶剤き裂という。
線膨張係数	固体の長さが温度によって変わる割合をあらわし、温度が1℃変化したときの長さの変化率でしめす。
水撃圧	ウォーターハンマーともいう。有圧の導・送・配水管などの施設において供給される水の流れが急に阻害される場合に、その運動エネルギーによって管路や設備などへの圧力が急変し、衝撃をもたらす作用のこと。
輪荷重	一般に車両の荷重は、車輪・タイヤを介して構造物に作用する。輪荷重とは、車輪の荷重が一点に集中的に作用するとした荷重。

用語	解説
基準外径	D：外径の基準寸法
SDR	Standard dimension ratioの略。基準外径を基準厚さで除した値 SDR=D/t
ポリエチレン	エチレンを重合した熱可塑性樹脂をポリエチレン(PE)といい、分岐度、分岐の種類、分布などにより密度や特性が変わる。JISK6922-1において密度を基準にして高密度ポリエチレン=HDPE(0.942以上)、中密度ポリエチレン=MDPE(0.930以上0.942未満)、低密度ポリエチレン=LDPE(0.910以上0.930未満)に分類されている。又、エチレンとオレフィンの共重合により作られた低密度ポリエチレンを線状低密度ポリエチレン=L-LDPEと呼んでいる。一般に中密度ポリエチレン以下を軟質で高密度ポリエチレンを硬質としている。
二層管	外側がカーボンブラックを配合したポリエチレン層(以下、外層という)、内側がカーボンブラックを配合しないポリエチレン層(以下、内層という)によって構成されている管。ただし、内、外層に用いる原料樹脂のMRSは同一でなければならない。
1種管、2種管	1998年にJISK6762が改訂されたが(水道用ポリエチレン管から水道用ポリエチレン二層管に規格名称変更等)、改訂前規格では、管の種類として低密度または中密度ポリエチレンを材料とする1種管と、高密度ポリエチレンを材料とする2種管に分類されていた。1種管は2種管に比べ管の肉厚が厚い。
PE100	設計上の性能を明確に規定するため、ISO9080に従って求めた長期水圧強度をもとに、ISO12162の分類表で分類する方法で、20℃で50年間管が破壊しない一定応力値が10.0MPa(102kgf/cm ²)以上であることが証明されたポリエチレン材料のこと
σ_{LTHS} (長期静水圧強度の平均値)	Long-Term Hydrostatic Strengthの略。応力の単位をもつ量で、温度 θ 、時間tにおいて予測される長期静水圧強度の平均値をあらわすもの。
σ_{LPL} (長期静水圧強度の 下方信頼限界)	Lower Confidence Limit of the Predicted Hydrostatic Strengthの略。応力の単位をもつ量で、温度 θ 、時間tにおいて予測される長期静水圧強度の97.5%下方信頼限界をあらわすもの。
MRS (最小要求強度)	Minimum Required Strengthの略。20℃水中において50年後に予想される長期静水圧強度の97.5%下方信頼限界の値であり、単位MPaで表される材料の強度。
CRS $_{\theta,t}$ (類別要求強度)	Caregorized Required Strengthの略。温度 θ 、時間tにおける σ_{LPL} の値を、ISO12162 tableA.1により分類した値で、単位MPaで表される材料の強度。

おわりに

本検証により水道配水用ポリエチレン管が100年以上の寿命を有することが明らかになったことから、今後、耐震管である水道配水用ポリエチレン管を更新用管材として使用し、全ての管路がこれと同等以上の長期性能を有する管路に更新された後は、更新率が現状の1%程度であっても持続可能な管路更新を実現できるものと考えられる。

本研究が、今後、全国の水道事業体の皆様が水道管路の更新計画を作成する際の一助となれば幸いである。

また今回の検証に当たっては、新しい評価方法の検討・構築、新しい指標を立てることで、100年という長期の寿命検証を行ってきた。当協会としては、これらの成果について新たな基準として確立される様、図っていきたいと考えている。

最後に、本研究に当たり、終始ご指導頂いた山形大学大学院理工学研究科 栗山教授、並びに報告書作成に当たり助言を頂いた水道事業体の皆様に謝辞を表す。

水道配水用ポリエチレン管路の100年寿命の検証《技術報告書》

2013年3月31日 初版発行

2014年8月31日 2版発行

編集発行 配水用ポリエチレンパイプシステム協会

発行所 配水用ポリエチレンパイプシステム協会

〒101-0036 東京都千代田区北乗物7番地

KSビル2F

TEL：03-5298-8855 FAX：03-5298-8855

Home page：http://www.politec.gr.jp/

本書の内容の一部あるいは全部を無断で複写複製（コピー）することは、法律で認められた場合を除き、著作者および出版社の権利の侵害となりますので、その場合は予め当協会にて許諾を求めて下さい

ISBN 978-4-9907135-0-8

Printed in Japan

配水用ポリエチレンパイプシステム協会

〒101-0036 東京都千代田区北乗物町7番地
KSビル2F

TEL : 03-5298-8855 FAX : 03-5298-8856

<http://www.politec.gr.jp/>