

研究成果報告書

研究開発課題名	パイプラインにおける長期強度を考慮した設計手法の開発
研究総括者	株式会社クボタ パイプシステム事業ユニット 藤田信夫
研究開発組合	株式会社クボタ 株式会社栗本鐵工所 積水化学工業株式会社 ダイプラ株式会社
試験研究機関	茨城大学農学部 神戸大学大学院農学研究科 農村工学研究部門

1 事業の実施内容

1. 1 事業の背景及び目的

地中に埋設されているパイプラインは、1960 年代の高度経済成長期に施工されたパイプが多く、その更新時期に入り毎年 300 箇所以上の事故が報告されている。大口径で高圧力の幹線パイプラインによって水理システムを構築している農業用のパイプラインは、軽微な性能低下といえども給水停止にとどまらず、管体破損やさらに重大な事故につながる場合もある。

農業用パイプラインでは、特に樹脂系の材料を用いたパイプラインが突発的に破損し、周辺の道路などの施設まで甚大な被害が発生するなどの事象が発生している。

一方、土地改良事業計画設計基準「パイプライン」では、パイプの構造的な安全性を確保し現場施工時の品質を確認するために構造設計において「JIS 規格などを満足する品質のパイプの使用」「施工後のパイプのたわみ量の規定」などが記載されている。このような方法は、パイプ製造直後の短期性能を用いた構造設計であるため、供用期間内で確保されている安全性の低下を定量的に判断できないという課題がある。

本研究では、樹脂系のパイプラインの長期的な性能の変化を予測する手法を開発し、農業用パイプラインの安全性を向上させることを目的として、パイプラインの長期強度試験技術と品質管理、残存強度の評価方法に関する研究開発に取り組む。

1. 2 事業の内容及び実施方法

(1) 長期外圧強さの解明

①内容

長期供用中のパイプの外圧に対する安全性を定量的に評価するため、既往のデータ・文献の調査を進めるとともに、外圧クリープ試験を実施した。

②実施方法

試験は PVC、FRPM、PE、PE-GF の 4 管種を対象として、供試管の口径などの条件をできるだけ統一し、JIS 規格（ISO 規格）の試験方法に準じて同一の試験環境・装置で実施した。

10,000 時間までの供試管の垂直変位の変化から、50 年後の長期偏平クリープ剛性を求めるための係数を算定した。

(2) 長期内圧強さの解明

①内容

長期供用中のパイプの内水圧に対する安全性を定量的に評価するため、既往のデータ・文献の調査を進めるとともに、テストピース等による比較的簡易な試験方法で長期強度の推定を行った。なお、本試験で得られる引張特性は内圧だけでなく外圧に対する強度の検討にも用いることができる。

②実施方法

PE、PE-GF は供試管からの切り出し片による引張試験を、PVC は切り出し片に加えてリング状供試体の引張試験と内圧負荷試験を、FRPM はリング状供試体の引張試験と内圧負荷試験を、それぞれ実施した。

引張試験は試験速度を変化させて実施し、引張強度の速度依存性を確認するとともに、内圧負荷試験も含めて試験方法の有効性を確認した。

(3) 内外圧が繰り返し作用する場合の臨界特性の解明

①内容

内圧と外圧が同時に作用する埋設条件を再現するための試験装置ならびに評価方法について検討した。

②実施方法

内外圧複合状態の再現には、土槽内に埋設した供試管に内水圧を負荷したり上載荷重を加える方法があるが、埋め戻し材料の影響を受け、また試験には多大な労力を要する。そこで、供試管に直接内圧・外圧を負荷して製品性能を確認する方法について検討した。

エアバッグを用いて均等な内圧を負荷した状態で供試管を偏平させる方法、リング状の供試管を引張することで内圧負荷を再現する方法、繰り返し引張荷重を作用する方法、等について検討した。

(4) 設計マニュアルの作成

①内容

研究成果をとりまとめ、設計マニュアルを作成する。

②実施方法

樹脂系材料の長期特性把握に必要な試験項目、方法、手順の標準化を図るとともに、品質管理等の考え方について検討を行った。

1. 3 事業着手時に想定した技術的問題点への対応

技術的問題点	対応
樹脂系材料の長期特性はこれまで設計に用いられていないため、データが整備されていない。構造設計に適用するためには、既往のデータ分析とあわせて不明確な項目については試験を実施し、特性を解明する必要がある。	長期特性の基礎となる外圧に関するクリープのデータがないため、外圧クリープ試験を実施し、供用 50 年後の変形係数の低下度合いを把握した。対象管種の試験体の口径を統一し、同一の試験環境・装置で実施した。 長期極限曲げひずみ、長期極限内圧ひずみについては既往データの収集と分析を行った。
JIS 等で定められた製品規格は短期的な物性値を確認する試験方法で品質管理されている。 長期特性を製品の品質評価に役立てるため、試験研究機関等が製造メーカーの保有する既往データの検証を行う場合などに、簡易に実施できる試験方法とその妥当性確認が必要である。	均質材料の場合、管体から試験片を切り出して引張試験を実施することができる。このとき JIS 等で規定された強度(短期)の確認にとどまらず、材料強度の速度依存性から長期強度を推定する方法として、試験速度を変化させた引張試験を行った。 複合材料で管体から試験片を切り出して引張試験を実施することが困難な場合、円周方向の引張特性確認に内圧負荷試験に替わる試験方法として、ノルリング引張試験の有効性を確認した。

1. 4 事業の実施体制

(1) 研究開発組合内の役割分担

個別研究テーマ	事業実施主体			
	(株)クボタ	(株)栗本鐵工所	積水化学工業 (株)	ダイプラ(株)
長期外圧強さの解明	◎	◎	◎	◎
長期内圧強さの解明	○	◎	◎	◎
内外圧が繰り返し作用する場合の臨界特性の解明	◎	○	○	○
設計マニュアルの作成	◎	◎	◎	◎
まとめ	◎	○	○	○

(2) 試験研究機関と研究開発組合の役割分担

個別研究テーマ	試験研究機関		事業実施主体			
	農村工学 研究部門	茨城大学 神戸大学	(株)クボタ	(株)栗本鐵 工所	積水化学 工業(株)	ダイプラ (株)
長期外圧強さの解明	◎	○	◎	◎	◎	◎
長期内圧強さの解明	◎	○	◎	◎	◎	◎
内外圧が繰り返し作用する場合の臨界特性の解明	○	◎	○	○	○	○
設計マニュアルの作成	○	◎	◎	◎	◎	◎
まとめ	○	◎	◎	○	○	○

1. 5 事業の年度計画と実績

項 目	平成 29 年度		平成 30 年度		令和元年度	
	上期	下期	上期	下期	上期	下期
既往のデータ分析・資料調査						
長期外圧強さの解明						
長期内圧強さの解明						
内外圧が繰り返し作用する場合の臨界特性の解明						
設計マニュアルの作成						
まとめ						

注) は計画、 は実績。

1. 6 研究開発の概要、結果、課題等

(1) 既往のデータ分析・資料調査

No.	文献名	著者	出典/年次	対象			
				PVC	FRPM	PE	PE-GF
1	ATV-DVWK-A 127 Statische Berechnung von Abwasserkanälen und - leitungen (下水道および下水パイプラインの静的計算)	DWA	2008年	●	●	●	—
2	Handbook of PVC (塩ビ管ハンドブック)	PVC PIPE Association	2012年	●	—	—	—
3	下水道用硬質塩化ビニル管の道路下埋設に関する研究 報告書	国土開発技術研 究センター	昭和55年	●	—	—	—
4	硬質塩化ビニル管の長期寿命の評価について	塩化ビニル管・ 継手協会	平成21年	●	—	—	—
5	FW成形強化プラスチック複合管の長期性能試験	井戸本、宮崎、 矢野、中島	農業土木学会 誌/第75巻第 2号	—	●	—	—
6	長期極限曲げ歪み試験によるFRPM管の長期性能の評 価	大塚、間宮、毛 利、有吉	H25農業農村 工学会大会講 演会	—	●	—	—
7	FRPM管の長期性能評価に関する時間短縮の提案	大塚、間宮、毛 利、有吉	H26農業農村 工学会大会講 演会	—	●	—	—
8	強化プラスチック複合管の長期性能評価	間宮、大塚、有 吉、毛利	H29農業農村 工学会大会講 演会	—	●	—	—
9	JIS K 7020 ガラス強化熱硬化性プラスチック(GRP)管及び継手一回 帰分析法及びその使用	日本規格協会	2018年	—	●	—	—
10	JIS K 7032 プラスチック配管系—ガラス強化熱硬化性プラスチック (GRP)管—管の初期剛性の求め方	日本規格協会	2002年	—	●	—	—
11	JIS K 7035 ガラス強化熱硬化性プラスチック(GRP)管—湿潤条件下 での長期偏平クリープ剛性の求め方及び湿潤クリープファ クタの計算法	日本規格協会	2018年	—	●	—	—
12	JIS K 7037 プラスチック配管系—ガラス強化熱硬化性プラスチック (GRP)管—見掛けの初期周方向引張強さの求め方	日本規格協会	2013年	—	●	—	—
13	下水道用強化プラスチック複合管 道路埋設指針	国土開発技術研 究センター	平成元年	—	●	—	—
14	PE Pipe—Design and Installation (ポリエチレン管 設計と施工)	AWWA	2006年	—	—	●	—
15	水道配水用ポリエチレン管・継手に関する調査報告書	日本水道協会	平成10年	—	—	●	—
16	下水道用ポリエチレン管(JSWAS K-14-2010)	日本下水道協会	2010年	—	—	●	—
17	水道配水用ポリエチレン管路の100年寿命の検証	配水用ポリエチ レンパイプシス テム協会	2014年	—	—	●	—
18	下水道用ポリエチレン管 技術資料(PA-11-2015)	下水道用ポリエ チレン管・継手 協会	2015年	—	—	●	—
19	給水用ポリエチレン管の耐久性評価 (破壊メカニズムの解析及び評価方法の紹介)	日本ポリエチレ ンパイプシス テム協会	2018年	—	—	●	—
20	農業水路用高密度ポリエチレンパイプ(カタログ)	農水ポリエチレ ン管協会	2017年	—	—	●	—
21	泥炭性地盤で観測した大口径高密度ポリエチレン管の設 計定数	田頭、秀島、小 島、鈴木	2007寒地土木 研究所月報	—	—	●	—
22	ガラス繊維強化ポリエチレン管に関するデータ集	高耐圧ポリエチ レン管協会	2018年	—	—	—	●
23	ガラス繊維強化ポリエチレン管システムの開発	時吉、日野林、 加後、花山、栗 山、河端	H29農業農村 工学会大会講 演会	—	—	—	●
24	ガラス繊維強化ポリエチレン管の長期性能検証(環剛性 試験)	時吉、高原、井 手元、日野林、 栗山	2019農業農村 工学会大会講 演会	—	—	—	●

(2) 長期外圧強さの解明

1) 外圧クリープ試験

樹脂系のパイプラインの長期的な性能変化を明らかにし、供用 50 年後の長期特性を踏まえた構造設計手法に反映するため、外圧に関するクリープ特性の試験を実施する。

試験は硬質ポリ塩化ビニル管 (PVC)、強化プラスチック複合管 (FRPM)、一般用ポリエチレン管 (PE)、ガラス繊維強化ポリエチレン管 (PE-GF) の 4 種類について行う。

1. 1) 引用規格

本試験を実施するために引用した規格は下記のとおりである。

- ・ JIS K 7032 「プラスチック配管系—ガラス強化熱硬化性プラスチック (GRP) 管—管の初期剛性の求め方」 (ISO 7685 を基とする)
- ・ JIS K 7035 「ガラス強化熱硬化性プラスチック (GRP) 管—湿潤条件下での長期偏平クリープ剛性の求め方及び湿潤クリープファクタの計算法」 (ISO 10468 を基とする)
- ・ JIS K 7020 「ガラス強化熱硬化性プラスチック (GRP) 管及び継手—回帰分析法及びその使用」 (ISO 10928 を基とする)

1. 2) 試験の概要

外圧クリープ試験の実施方法について、4 管種を統一的に実施できる内容を検討し、下記のように定めた。

(1) 初期剛性の確認

試験を行う管から一定長さ（300mm）に切り出した供試管にたわみ率（相対変位）5%に達するまで一定の比率で荷重を負荷し、変位と荷重の関係を記録する。

載荷初期の載荷板と供試管の“なじみ”の影響を除去するため、たわみ率（相対変位）1%と 3%の間の勾配から初期剛性を求める。

(2) 長期偏平クリープ剛性の確認

一定長さ（300mm）に切断した供試管を水中（水温 $23 \pm 5^{\circ}\text{C}$ ）に設置し、10,000 時間にわたり一定の垂直荷重を保持して直径方向に変形させる。試験期間中には所定の時間間隔で垂直変位を測定する。

10,000 時間経過後の垂直変位をもとに、外挿法により 50 年後の長期偏平クリープ剛性を求める。

試験体の個数は 2 個とし、荷重レベルの異なる 2 条件（たわみ率 1.8%および 3.0%）で試験を実施する。

(3) クリープ係数の確認

初期剛性①と長期偏平クリープ剛性②の比率（②／①）をクリープ係数として求める。

外圧クリープ試験の実施フローを図 1.2.1 に示す。

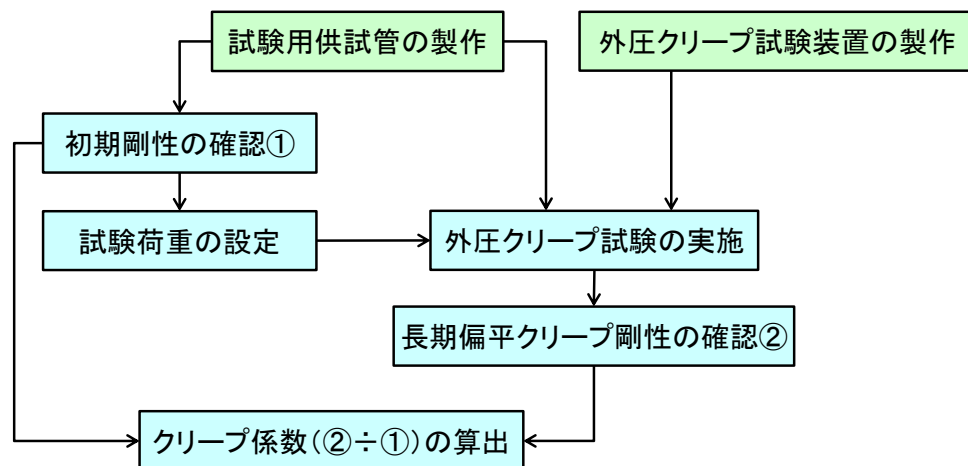


図 1.2.1 外圧クリープ試験の実施フロー

1. 3) 試験用供試管

1. 3. 1) 管種

試験は表 1.3.1 に示す仕様の 4 種類の樹脂管を対象として実施することとした。

土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 設計「パイプライン」平成 21 年 3 月 に記載された樹脂系の 3 管種すなわち硬質ポリ塩化ビニル管 (JIS K 6741)、強化プラスチック複合管 (JIS A 5350)、一般用ポリエチレン管 (JIS K 6761) に加え、ガラス繊維強化ポリエチレン管 (JIS K 6799) を対象とした。

供試管の口径は呼び径 600 に統一し、市場流通品と乖離のないものを用いて実施することとした。

表 1.3.1 試験用供試管の仕様

管材料	準拠規格	呼び径	内径 (mm)	管厚 (mm)	管種	備考 (供試管準備)
硬質ポリ塩化ビニル管 (PVC)	JIS K 6741	600	592	18	VU	クボタ
強化プラスチック複合管 (FRPM)	JIS A 5350	600	600	12	内圧 4 種	栗本鐵工所
一般用ポリエチレン管 (PE)	JIS K 6761	公称外径 630	551	37	SDR17	積水化学工業
ガラス繊維強化ポリエチ レン管 (PE-GF)	JIS K 6799	600	610	29	1 種	ダイプラ

注) 口径は 600mm とし、代表的な管種を選定

原管の状況を図 1.3.1～図 1.3.4 に示す。
写真の原管から初期剛性確認用供試管、長期偏平クリープ剛性用供試管を切り出す。
残りの管については、将来的に同一ロットの管材で他の長期試験を行う場合に備えて、室内暗所にて長期保管する。



図 1.3.1 PVC 管 (JIS K 6741)



図 1.3.2 FRPM 管 (JIS A 5350)



図 1.3.3 PE 管 (JIS K 6761)



図 1.3.4 PE-GF 管 (JIS K 6799)

1.3.2) 形状寸法

供試管は原管から所定の寸法で切断して採取した後、寸法測定を行った。表 1.3.2、表 1.3.3 に示す。

管厚は円周方向 8 等分点×2 点=16 箇所、管幅は円周方向 8 箇所、外径は円周方向 45° ごとの 4 箇所をそれぞれ測定し、平均値を示す。

表 1.3.2 初期剛性確認用供試管の寸法

管種	長さ L (m)	外径 D (m)	管厚 t (m)	管厚中心直径 d_m (m)
PVC	0.3026	0.6285	0.0182	0.6103
FRPM	0.2995	0.6278	0.0135	0.6142
PE	0.3057	0.6286	0.0417	0.5869
PE-GF	0.3012	0.6756	0.0325	0.6431

表 1.3.3 長期偏平クリープ剛性確認用供試管の寸法

管種	条件	長さ L (m)	外径 D (m)	管厚 t (m)	管厚中心直径 d_m (m)
PVC	1.8%	0.3036	0.6283	0.0183	0.6100
	3.0%	0.3022	0.6283	0.0183	0.6100
FRPM	1.8%	0.3028	0.6276	0.0135	0.6140
	3.0%	0.2994	0.6275	0.0134	0.6141
PE	1.8%	0.3009	0.6283	0.0418	0.5864
	3.0%	0.3036	0.6283	0.0417	0.5865
PE-GF	1.8%	0.3034	0.6765	0.0327	0.6438
	3.0%	0.3014	0.6751	0.0328	0.6423

1.3.3) ひずみゲージ

荷重負荷時の供試管のひずみを計測するため、図 1.3.5 に示す管内面位置にひずみゲージを貼付した。

初期剛性確認用供試管には管頂・管底の 2 点を、外圧クリープ試験用供試管には変形状態をより詳細に把握するため 10 点を貼付することとした。

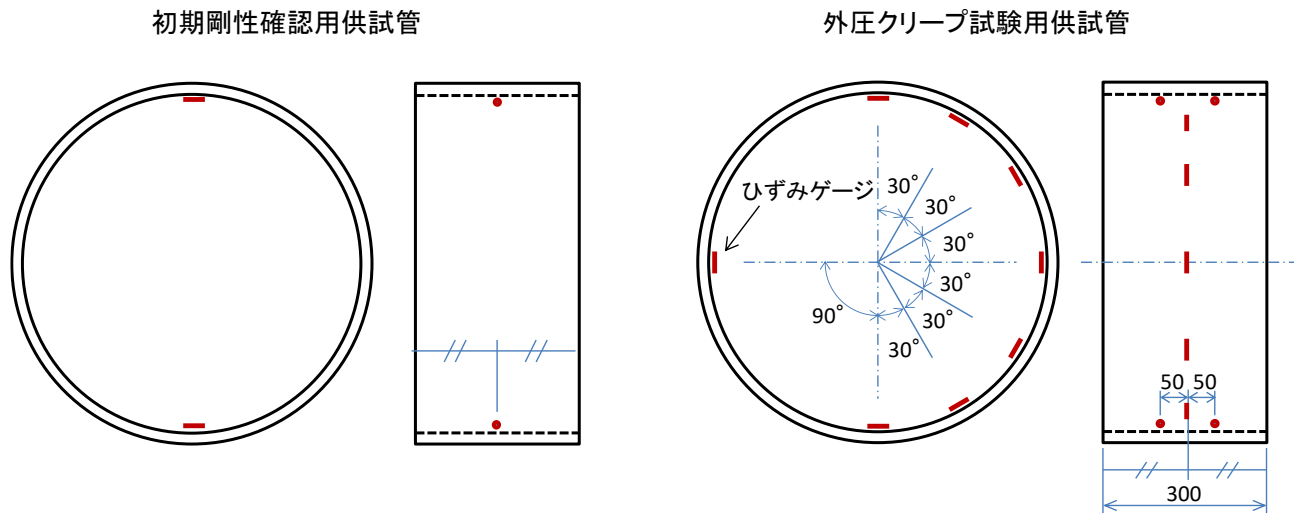


図 1.3.5 供試管のひずみゲージ貼付位置

1. 4) 初期剛性

1. 4. 1) 試験方法

4 種類の管材料について初期剛性確認用供試管に荷重を加えて扁平させ、たわみ率 5%まで荷重し垂直荷重とたわみ率の関係を記録した。

供試管は試験前日には室内温度 23℃の恒温室内に搬入し、静置して一定温度になるよう養生した。

試験は図 1.4.1～図 1.4.4 に示すように恒温室内に設置した載荷試験機を用いて行い、管厚中心直径の 5%まで管を扁平させた。

試験速度については、強化プラスチック複合管(JIS A 5350)と一般用ポリエチレン管(JIS K 6761)の試験方法には定めがないが、“硬質ポリ塩化ビニル管(JIS K 6741)の扁平試験”ならびに“ガラス繊維強化ポリエチレン管のたわみ荷重試験方法”にはそれぞれ $10 \pm 2 \text{ mm/min}$ の規定があることから、4 管種とも 10 mm/min とした。

垂直荷重とたわみの関係から、たわみ率 1.8%と 3.0%のときの荷重を読み取り、この試験で得られた 2 つの荷重を長期扁平クリープ剛性試験の載荷荷重とする。

また、載荷初期の載荷板と供試管の“なじみ”の影響を除去するため、たわみ率(相対変位) 1%と 3%の間の勾配から初期剛性を求める。

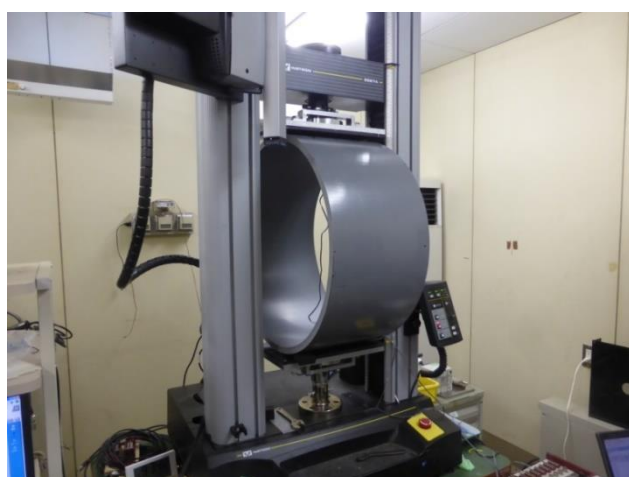


図 1.4.1 PVC 管 (JIS K 6741)

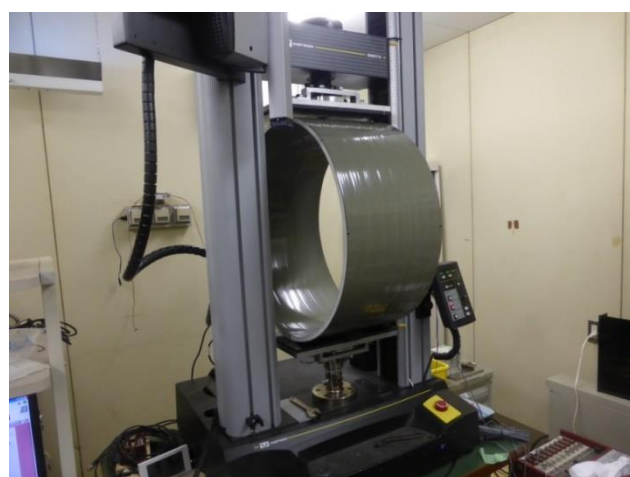


図 1.4.2 FRPM 管 (JIS A 5350)

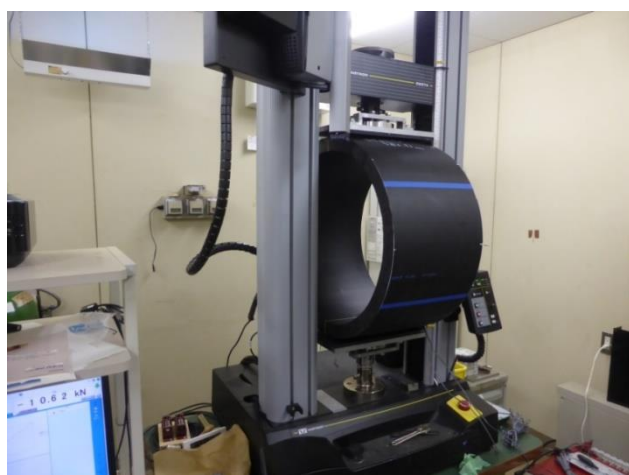


図 1.4.3 PE 管 (JIS K 6761)

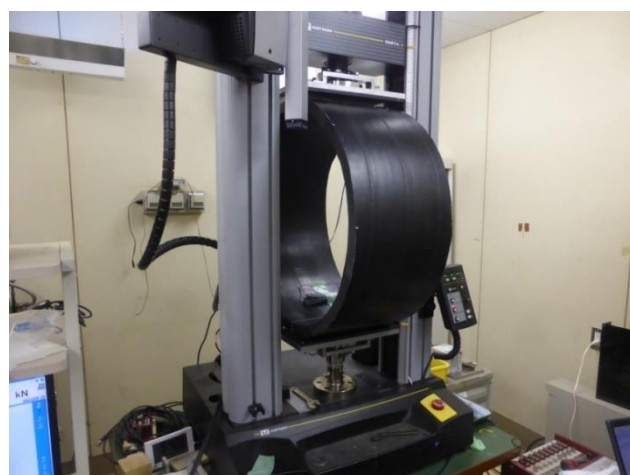


図 1.4.4 PE-GF 管 (JIS K 6799)

1. 4. 2) 初期剛性試験結果

(1) 長期偏平クリープ剛性の試験荷重の決定

4 管種について、単位長さあたりの垂直荷重～たわみ率の関係を図 1.4.5～図 1.4.8 に示す。
たわみ率 1.8%および 3.0%のときの単位荷重は図中に示したとおりであり、この値を 8 ケースの
長期偏平クリープ剛性の確認に用いる垂直荷重とする。

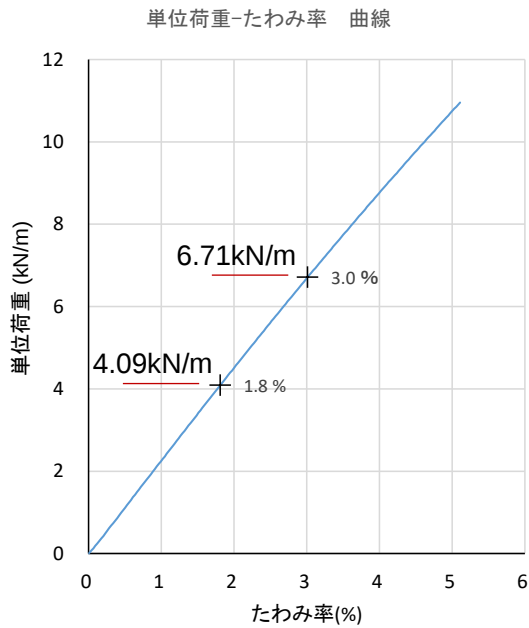


図 1.4.5 硬質ポリ塩化ビニル管 (PVC)

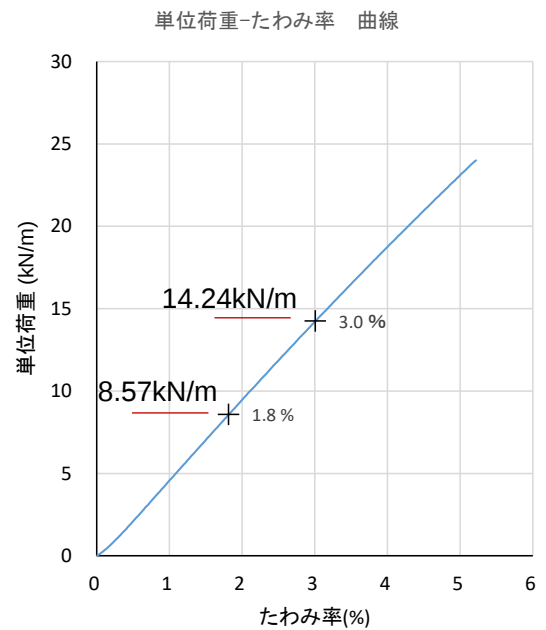


図 1.4.6 強化プラスチック複合管 (FRPM)

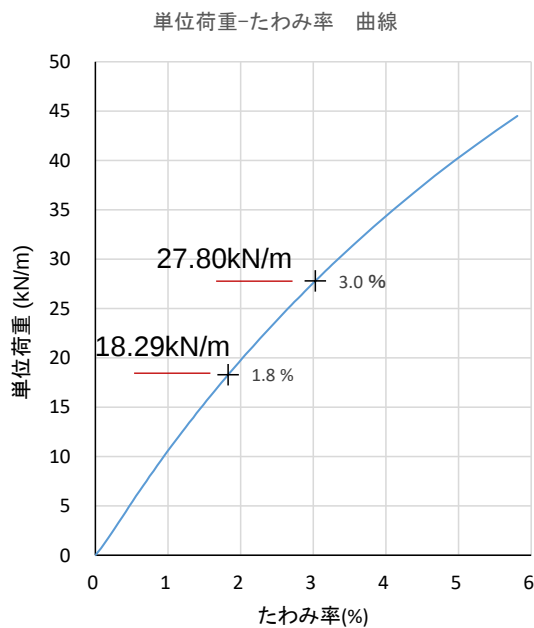


図 1.4.7 一般用ポリエチレン管 (PE)

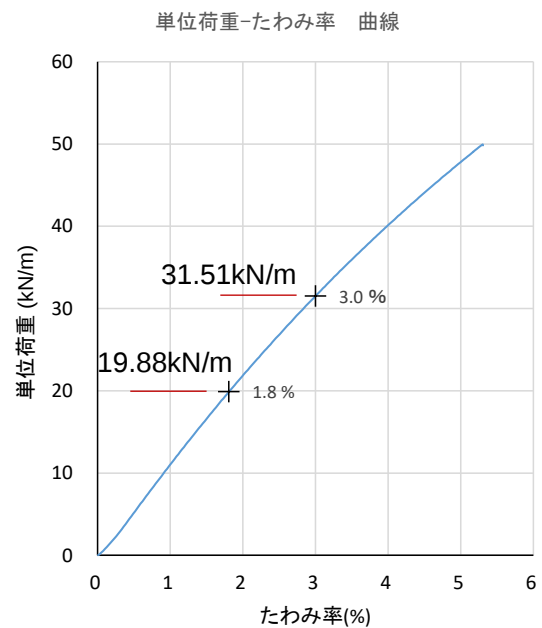


図 1.4.8 ガラス繊維強化ポリエチレン管 (PE-GF)

(2) 初期剛性の算出

4 管種の垂直荷重～たわみ量の関係より、初期剛性 S_0 を算出した。
 計算には (1 式) を用い、たわみ率 1% と 3% の間の勾配 (増分) を考えた。
 計算結果を表 1.4.1 に示す。

$$S_0 = \frac{f \times F}{L \times y} \quad \dots (1 \text{ 式})$$

ここに、

S_0 : 初期剛性 (N/m²)

f : 変位係数 (=1860×10⁻⁵)

L : 供試管の平均長さ (m)

F : たわみ率 1%～3%間の垂直荷重増分値 (N)

y : たわみ率 1%～3%間の垂直変位増分値 (m)

表 1.4.1 初期剛性確認結果

			PVC	FRPM	PE	PE-GF
管厚中心径 d_m		(m)	0.61027	0.61425	0.58693	0.64312
管厚 t		(m)	0.01823	0.01351	0.04169	0.03250
供試管の平均長さ L		(m)	0.30256	0.2995	0.30569	0.30119
たわみ率 1%→3%の増分値	y	(m)	0.012315	0.012318	0.01166	0.01282
	F	(N)	1355	2893	5163	6146
初期剛性 S_0		(N/m ²)	6763	14586	26941	29605

1.5) 長期偏平クリープ剛性

1.5.1) 試験方法

(1) 試験装置

図 1.5.1 および図 1.5.2 に示す試験装置内に供試管を設置し、水を満たした状態で水温を $23\pm5^{\circ}\text{C}$ に維持する。

供試管は PVC 管、FRPM 管、PE 管、PE-GF 管の 4 管種とし、それぞれ荷重条件の異なる 2 条件を設定する。試験開始時のたわみ率が 1.8%、3.0% となるよう、垂直荷重を重錘により載荷する。

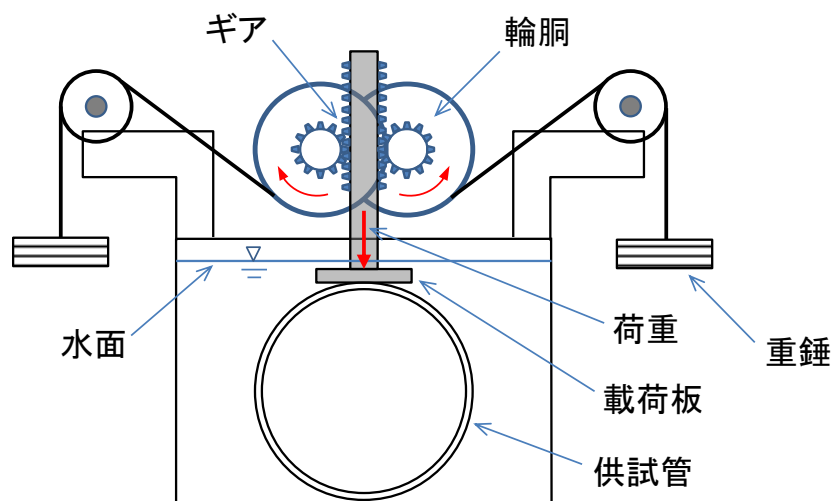


図 1.5.1 試験装置模式図



図 1.5.2 試験装置

恒温室内の試験装置 8 台の配置状況を図 1.5.3 に、装置全景を図 1.5.4 および図 1.5.5 に示す。

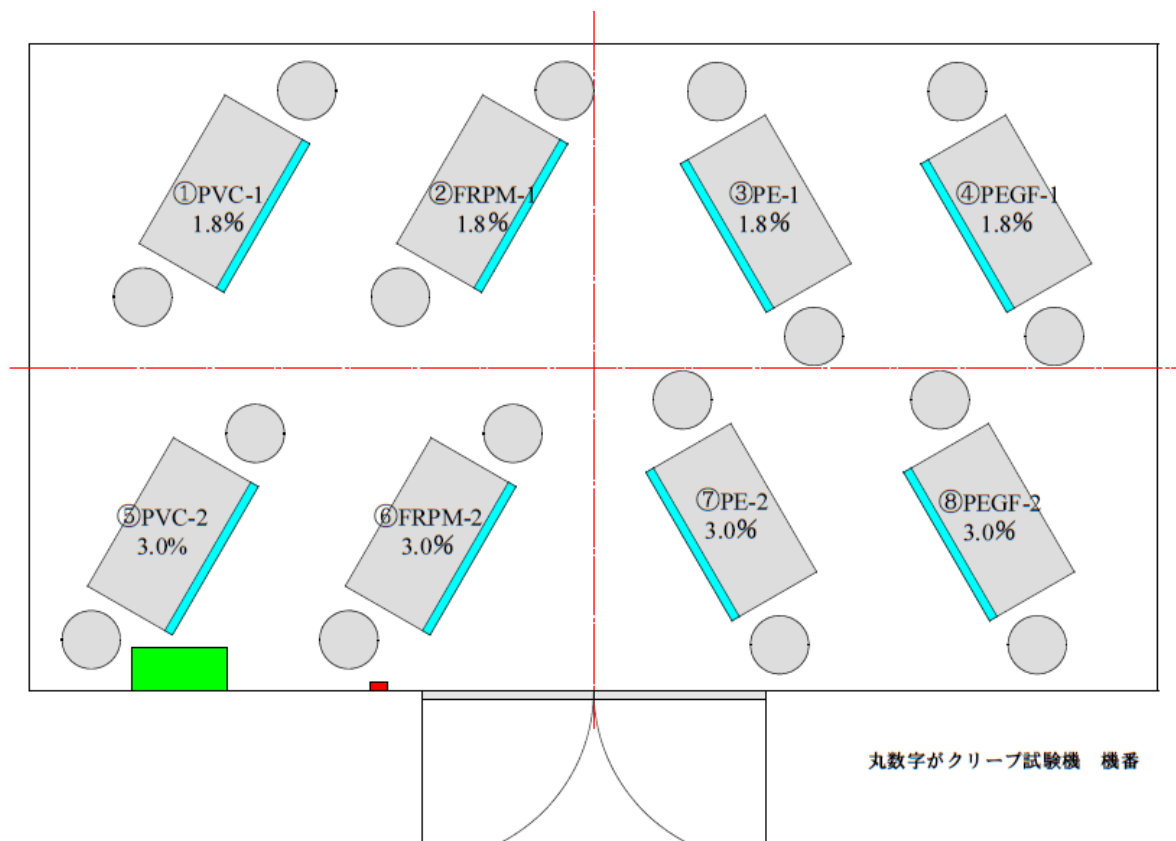


図 1.5.3 試験装置 8 台の配置状況

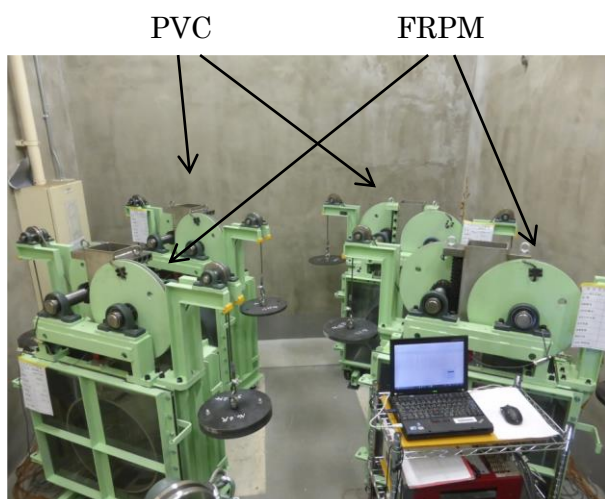


図 1.5.4 PVC 管および FRPM 管

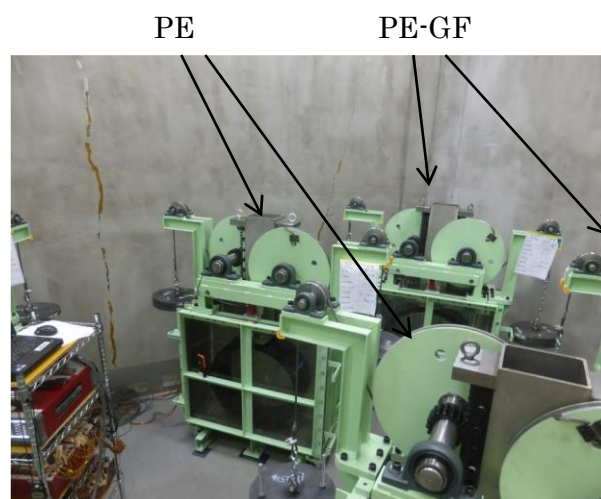


図 1.5.5 PE 管および PE-GF 管

(2) 垂直荷重の載荷

一定荷重は装置の左右に吊り下げた重錘ならびに載荷板の自重によるものとし、重錘につながるワイヤが輪胴を介してギアで重錘の重量を約 4.9 倍に増幅し、載荷板に伝達する構造としている。

4 管種×2 条件の計 8 ケースの載荷荷重を表 1.5.1 に示す。

表 1.5.1 条件別の垂直荷重

管種		条件	単位長さ荷重 (kN/m)	供試管長さ L (m)	計算荷重 (kN)	実載荷荷重 (kN)
PVC	1	1.8%	4.09	0.3036	1.24	1.32
	2	3.0%	6.71	0.3022	2.03	2.18
FRPM	1	1.8%	8.57	0.3028	2.59	2.64
	2	3.0%	14.24	0.2994	4.26	4.42
PE	1	1.8%	18.29	0.3009	5.50	5.69
	2	3.0%	27.80	0.3036	8.44	8.66
PE-GF	1	1.8%	19.88	0.3034	6.03	6.08
	2	3.0%	31.51	0.3014	9.50	9.64

注 1) 単位長さ荷重は、初期剛性試験により求めた図 4.5～図 4.8 の荷重

注 2) 供試管長さは、管軸方向の幅

注 3) 計算荷重は、「単位長さ荷重」×「供試管長さ」

注 4) 実載荷荷重は、計算荷重を上回るかつ最も近い値となる重錘の組み合わせによる荷重

(3) 測定

垂直変位ならびに管のひずみを計測する間隔は、対数時間目盛表示を考慮しておおむね表 1.5.2 のとおりとした。

表 1.5.2 計測間隔

Step	経過時間	インターバル	測定回数
1	0～ 30 分	1 分ごと	30 回
2	30～ 60 分	5 分ごと	6 回
3	60～120 分	10 分ごと	6 回
4	120～300 分	30 分ごと	6 回
5	300 分～100 時間	60 分ごと	95 回
6	100 時間～	24 時間ごと	10,000 時間まで

1.5.2) 長期偏平クリープ剛性試験結果

試験は 10,000 時間にわたり一定荷重を保持した。得られた値を以下に示す。

初期垂直変位の異なる 2 条件を 4 種類の管種ごとにまとめ、経過時間と垂直変位の関係を図 1.5.6 ～図 1.5.9 に示す。

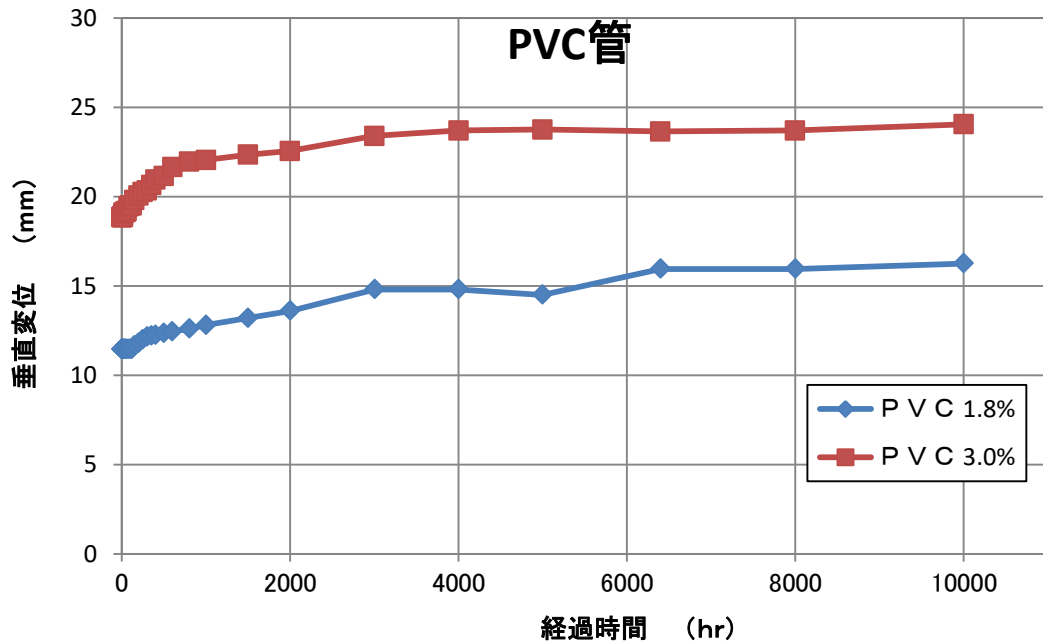


図 1.5.6 PVC の経過時間と垂直変位の関係

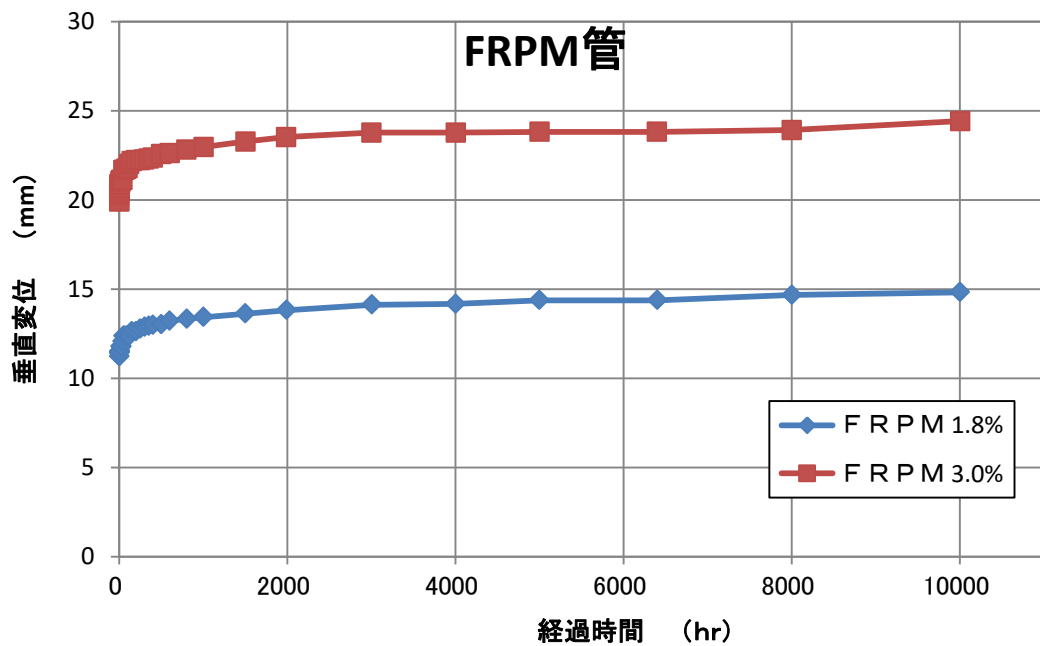


図 1.5.7 FRPM の経過時間と垂直変位の関係

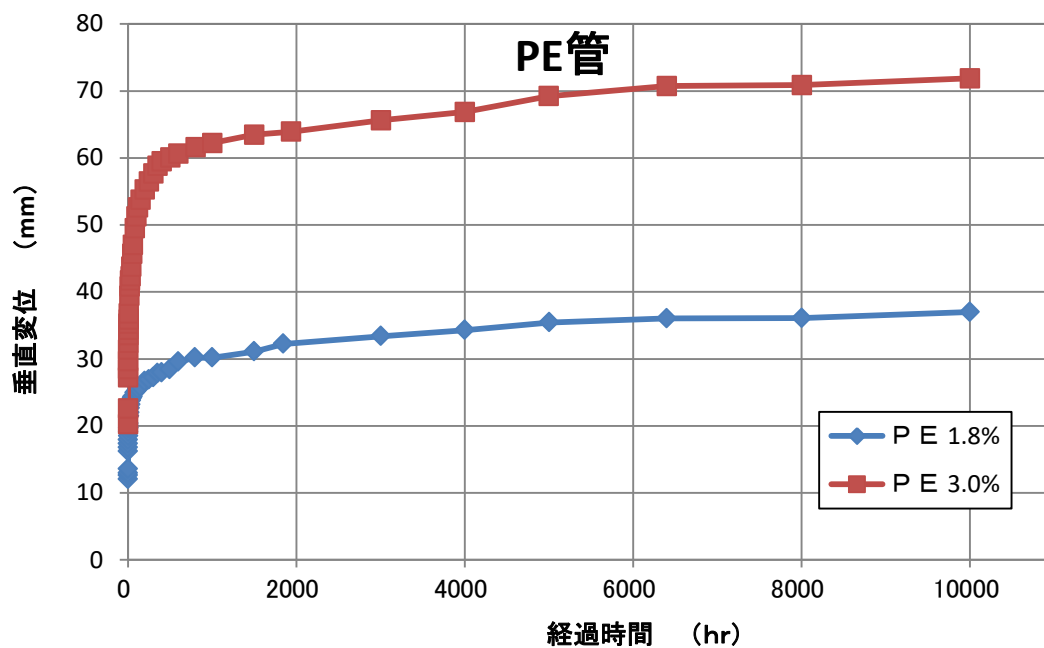


図 1.5.8 PE の経過時間と垂直変位の関係

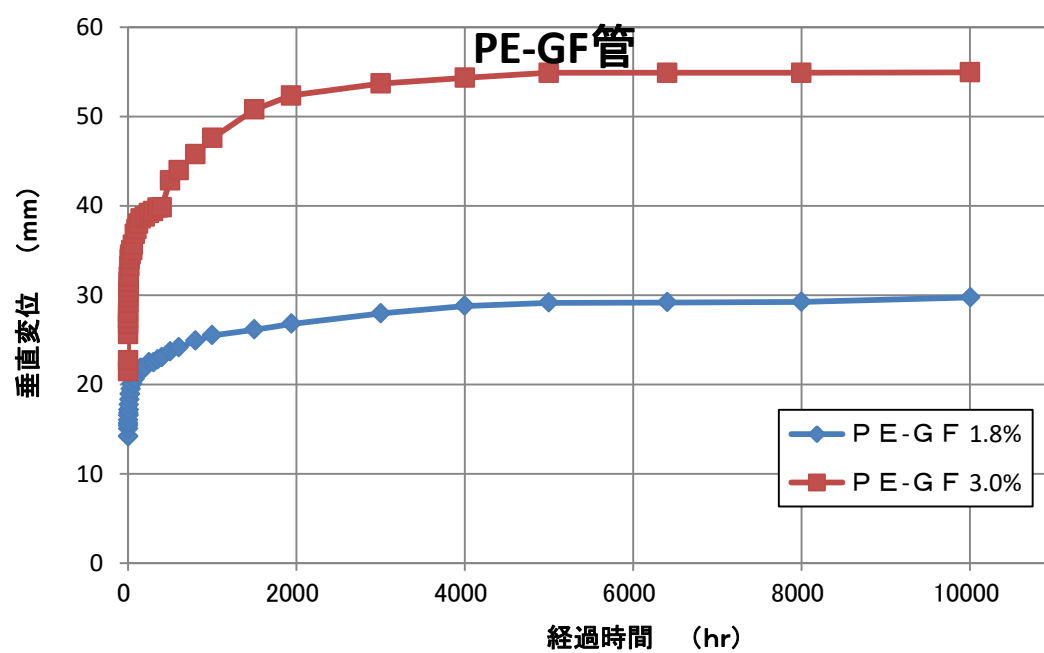


図 1.5.9 PE-GF の経過時間と垂直変位の関係

1. 5. 3) 供試管の発生ひずみ

初期垂直変位の異なる 2 条件を 4 種類の管種ごとにまとめ、経過時間と管頂・管底ひずみの関係を図 1.5.10 に、経過時間と管側ひずみの関係を図 1.5.11 に示す。

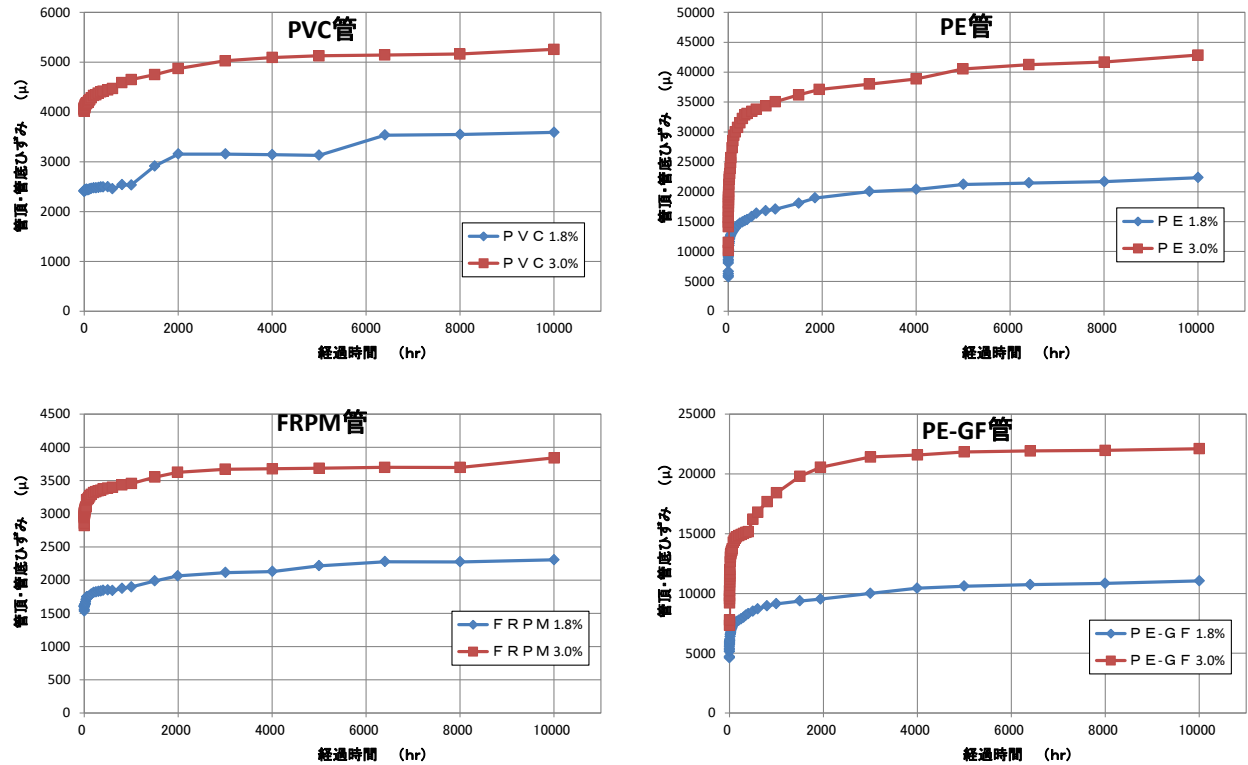


図 1.5.10 経過時間と管頂・管底ひずみ(4 点の平均値)の関係

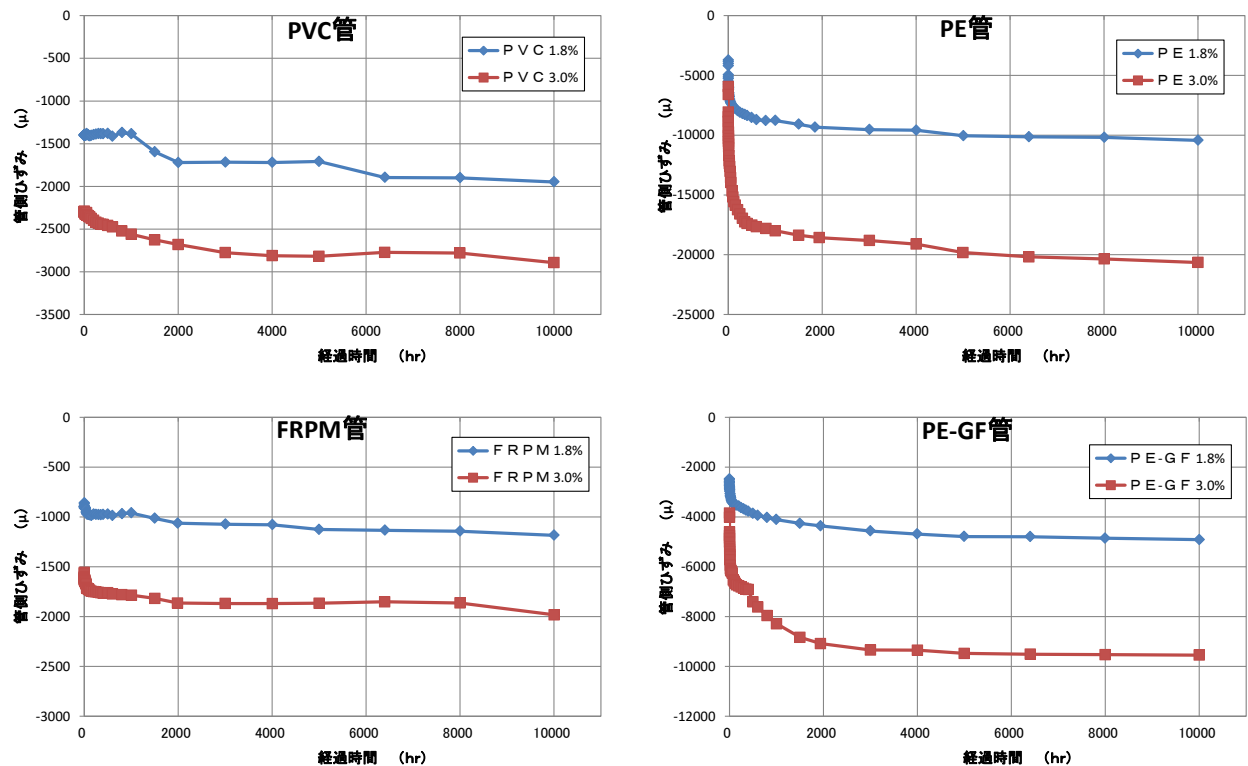


図 1.5.11 経過時間と管側ひずみ(2 点の平均値)の関係

初期垂直変位の異なる 2 条件を 4 種類の管種ごとにまとめ、経過時間と管側部から斜め 30° ひずみの関係を図 1.5.12 に、経過時間と管側部から斜め 60° ひずみの関係を図 1.5.13 に示す。

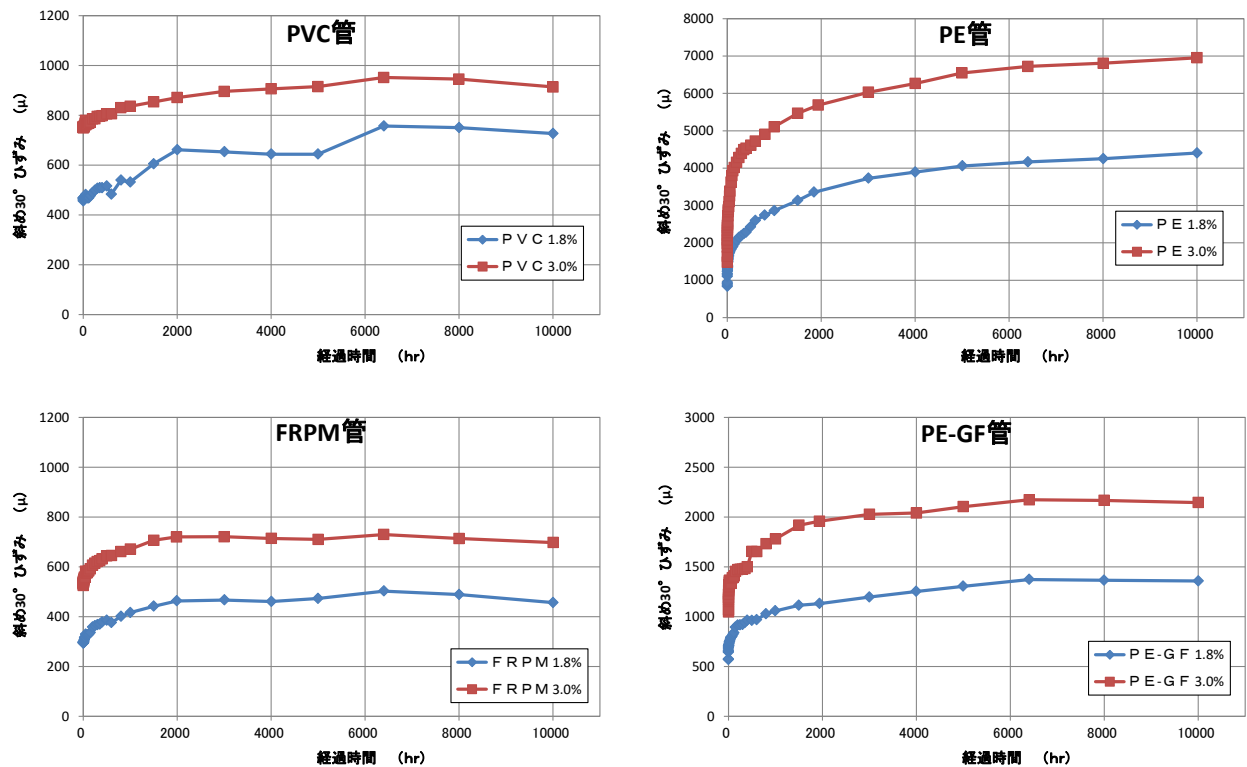


図 1.5.12 経過時間と管側部から斜め 30° ひずみ (2 点の平均値) の関係

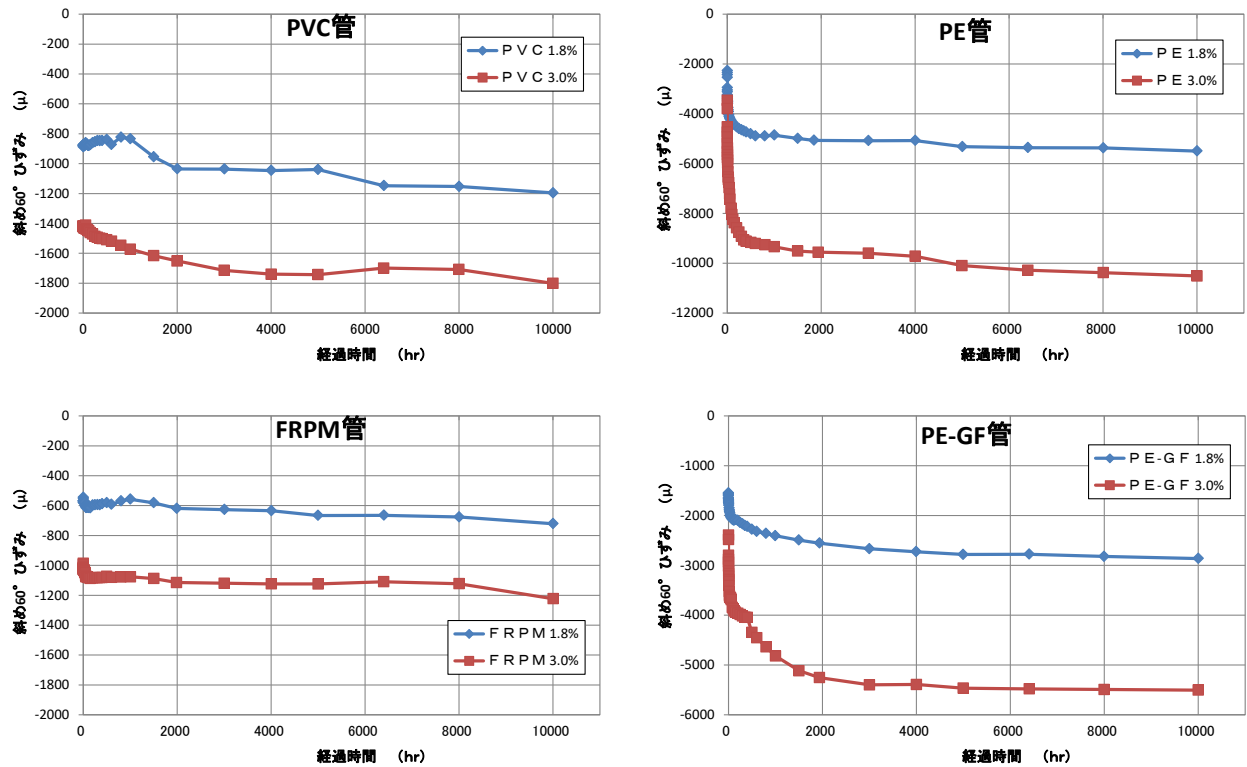


図 1.5.13 経過時間と管側部から斜め 60° ひずみ (2 点の平均値) の関係

1.5.4) 試験室内の温度変化

試験実施期間を通して、恒温室内の温度を試験装置近傍の4箇所で計測した。結果を図 1.5.14 に示す。

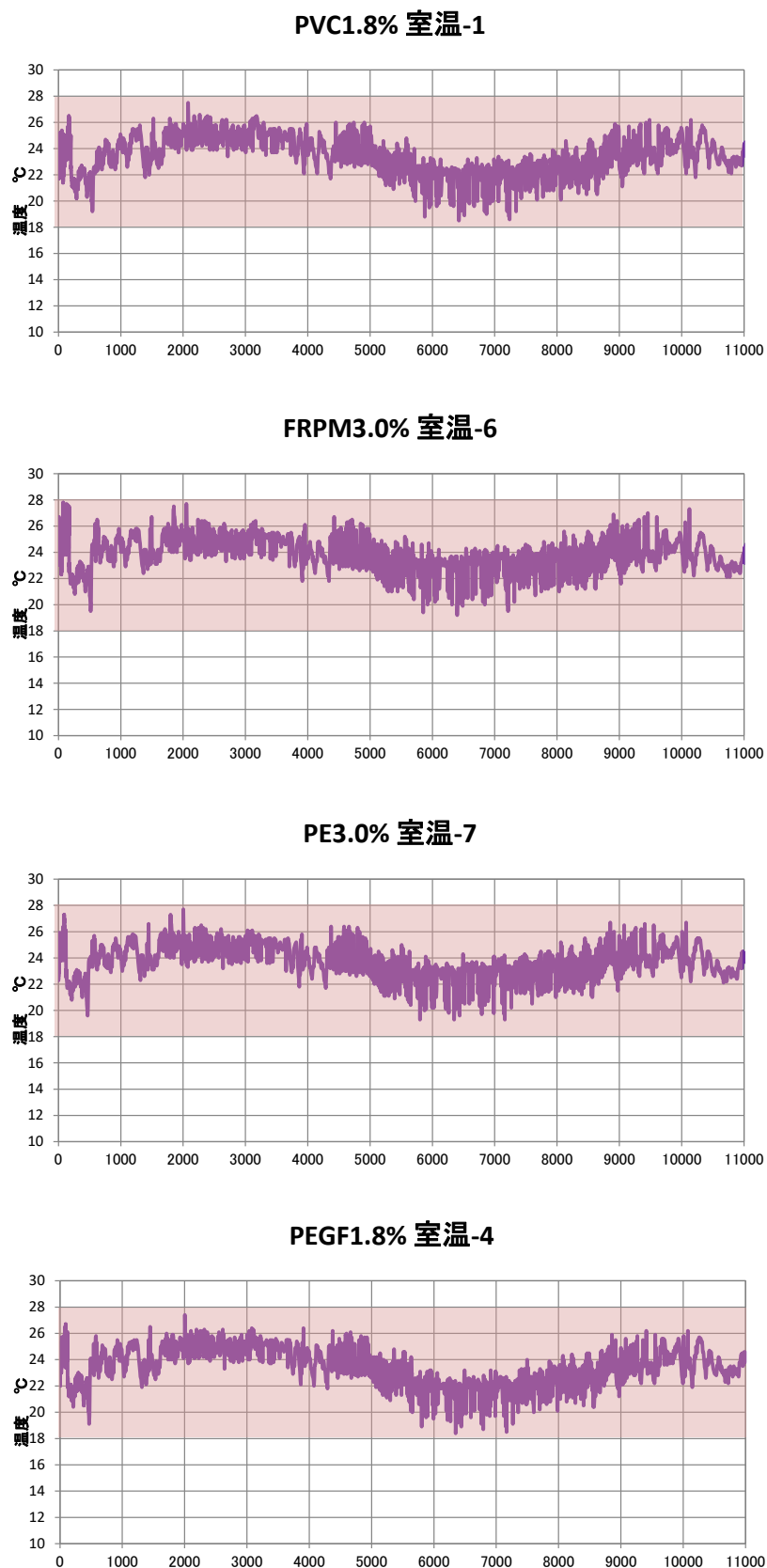


図 1.5.14 経過時間と恒温室内温度の関係

1. 6) 回帰分析

長期偏平クリープ剛性の回帰分析方法は、JIS K 7020-1998 (2018 確認)「ガラス強化熱硬化性プラスチック (GRP) 管及び継手—回帰分析及びその使用」(ISO10928) に示された方法 B (直線回帰)、方法 C (2 次曲線回帰) ならびに 2 直線を用いた回帰 (以下、方法 B' という)、の 3 案が提示され、それぞれの方法により算出した結果を併記する。

回帰分析のイメージは図 1.6.1 に示すとおりであり、10,000 時間までの計測データから 50 年後 (438,000 時間後) を推定する。

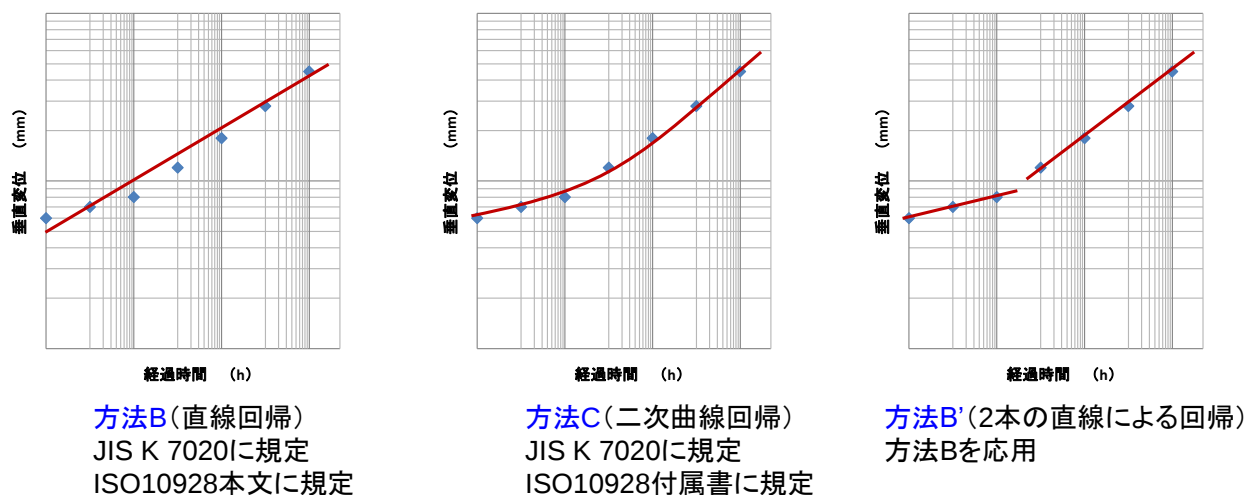


図 1.6.1 経過時間～垂直変位の回帰分析 (3 案) のイメージ

1. 6. 1) 関数関係を求める手順

(1) 方法Bおよび方法B'

回帰式は、次の一次多項式とする。

なお、方法B' については 2 つの回帰式のうち後半の直線を用いて評価する。

$$y = a + b \times x \quad \dots (1 \text{ 式})$$

$$\log_{10} \delta = a + b \times \log_{10} T$$

ここに、 y : 観察特性値（垂直変位 δ ）の対数（log）

a : y 軸の切片

b : 直線の傾き（ x の一次の係数）

x : 時間 T の対数（log）

(2) 方法C

回帰式は、次の二次多項式とする。

$$y = c + d \times x + e \times x^2 \quad \dots (2 \text{ 式})$$

$$\log_{10} \delta = c + d \times \log_{10} T + e \times (\log_{10} T)^2$$

ここに、 y : 観察特性値（垂直変位 δ ）の対数（log）

c : y 軸の切片

d, e : x の一次および二次の係数

x : 時間 T の対数（log）

1.6.2) 回帰式

回帰式は1.6.1)の(1式)または(2式)で与えられる。

10,000 時間までの計測データから 8 ケースの経過時間 T と垂直変位 δ の関係を表す係数「 c 、 d 、 e 」または「 a 、 b 」を算出し、表 1.6.1 に示す。

表 1.6.1a 方法 B (直線) による回帰式の係数

管種	条件	a	b		備考
PVC	1	1.8%	1.03798	0.02719	回帰式： $\log_{10} \delta = a + b \times \log_{10} T$ δ : 垂直変位 (mm) T : 経過時間 (hr)
	2	3.0%	1.26193	0.02437	
FRPM	1	1.8%	1.04898	0.02589	
	2	3.0%	1.30612	0.01797	
PE	1	1.8%	1.22326	0.08709	
	2	3.0%	1.46346	0.10850	
PE-GF	1	1.8%	1.18742	0.07015	
	2	3.0%	1.41832	0.08191	

表 1.6.1b 方法 C (二次多項式) による回帰式の係数

管種	条件	c	d	e	備考
PVC	1	1.8%	1.04757	-0.01091	回帰式： $\log_{10} \delta = c + d \times \log_{10} T + e \times (\log_{10} T)^2$ δ : 垂直変位 (mm) T : 経過時間 (hr)
	2	3.0%	1.26804	-0.00033	
FRPM	1	1.8%	1.05313	0.00939	
	2	3.0%	1.30791	0.01058	
PE	1	1.8%	1.22325	0.08706	
	2	3.0%	1.45945	0.12472	
PE-GF	1	1.8%	1.19214	0.05103	
	2	3.0%	1.42168	0.06837	

表 1.6.1c 2 直線 (後半の直線) による回帰式の係数

管種	条件	a	b		備考
PVC	1	1.8%	0.878708	0.080815	回帰式： $\log_{10} \delta = a + b \times \log_{10} T$ δ : 垂直変位 (mm) T : 経過時間 (hr)
	2	3.0%	1.194773	0.048228	
FRPM	1	1.8%	1.022059	0.036084	
	2	3.0%	1.297738	0.021292	
PE	1	1.8%	—	—	
	2	3.0%	—	—	
PE-GF	1	1.8%	1.170616	0.077183	
	2	3.0%	1.629263	0.028651	

1.6.3) 外圧クリープ試験の結果分析

10,000 時間経過後までのデータをもとに、3 通りの回帰分析による管種ごとのクリープ係数、相関係数をまとめて表 1.6.2 に示す。

表 1.6.2 クリープ係数と相関係数のまとめ

管種	条件	方法 B 注1)		方法 C 注1)		方法 B' 注2)	
		クリープ係数 α_{50}	相関係数 r	クリープ係数 α_{50}	相関係数 r	クリープ係数 α_{50}	相関係数 r
PVC	1.8%	0.7376	0.7815	0.5185	0.9583	0.5533 ^(剛性比) 0.5303 ^(たわみ比)	0.9766
	3.0%	0.7518	0.8779	0.6140	0.9861	0.6771 ^(剛性比) 0.6317 ^(たわみ比)	0.9857
FRPM	1.8%	0.7167	0.9479	0.5989	0.9957	0.6614 ^(剛性比) 0.6532 ^(たわみ比)	0.9908
	3.0%	0.7798	0.9742	0.6827	0.9954	0.7194 ^(剛性比) 0.7483 ^(たわみ比)	0.9832
PE	1.8%	0.2323	0.9986	0.2518	0.9986	方法 B による	
	3.0%	0.1359	0.9889	0.1958	0.9917	同上	
PEGF	1.8%	0.3708	0.9860	0.2698	0.9953	0.3119	0.9962
	3.0%	0.2675	0.9899	0.2303	0.9934	0.3256	0.9941
回帰式		直線回帰		2 次曲線回帰		2 直線による回帰	
備考		JIS K 7020 (ISO10928 本文) に示された方法 (担当: 積水)		JIS K 7020 (ISO10928 付属書) に示された方法。 観測値との相関は方法 B より高い。 (担当: クボタ)		勾配変化のあるデータを方法 B より精度よく推定。 (担当: 栗本) PVC、FRPM (担当: ダイフラ) PEGF	

注1) JIS K 7020:1998 (2018 確認) ガラス強化熱硬化性プラスチック (GRP) 管及び継手一回帰分析法及びその使用

注 2) 方法 B' のクリープ係数および相関係数は、管種ごとに下記の区間を対象として求めている。

PVC : 100hr~10,000hr FRPM : 50hr~10,000hr
 PEGF1.8 : 14.95hr~10,000hr PEGF3.0 : 1,500hr~10,000hr

1.6.4) 50 年後の垂直変位の予測

8 ケースの試験データについて、50 年（438,000 時間）後の垂直変位を予測する。

（1 式）に表 1.6.1 に示す a 、 b を、（2 式）に表 1.6.1 に示す係数 c 、 d 、 e を代入すれば、8 ケースの 50 年後の垂直変位は表 1.6.3 のように予測できる。

表 1.6.3 50 年後の垂直変位予測値

管種		条件	δ_{50} (mm)		
			B 法	C 法	B' 法
PVC	1	1.8%	15.54	23.01	21.61
	2	3.0%	25.08	32.37	29.30
FRPM	1	1.8%	15.67	18.57	16.81
	2	3.0%	25.56	27.60	26.17
PE	1	1.8%	51.83	51.86	—
	2	3.0%	119.00	100.64	—
PE-GF	1	1.8%	38.30	46.67	40.37
	2	3.0%	75.93	87.35	61.79

8 ケースの垂直変位の観測値と回帰式を図 1.6.2～図 1.6.9 に示す。

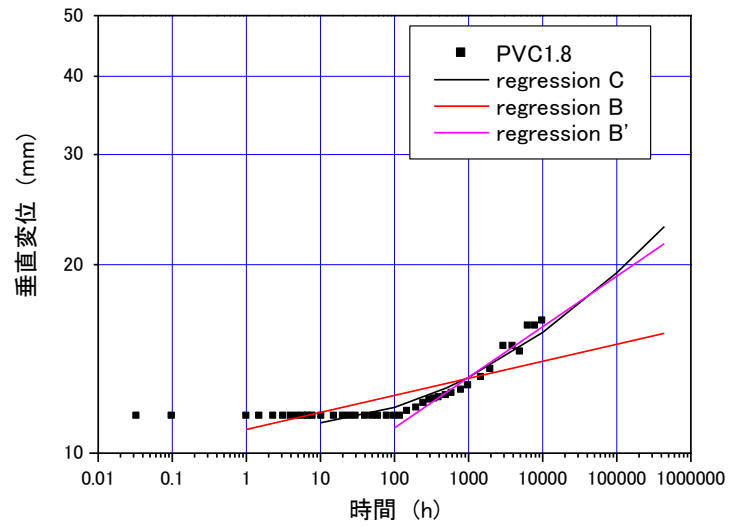


図 1.6.2 垂直変位の回帰分析結果 (PVC-1)

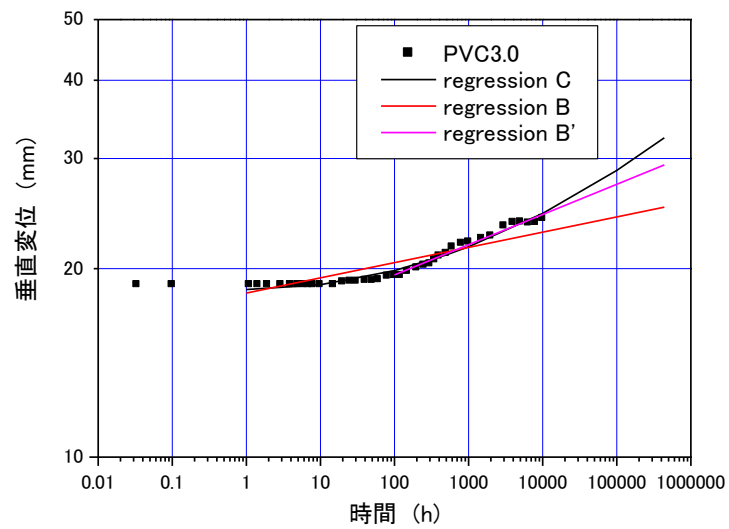


図 1.6.3 垂直変位の回帰分析結果 (PVC-2)

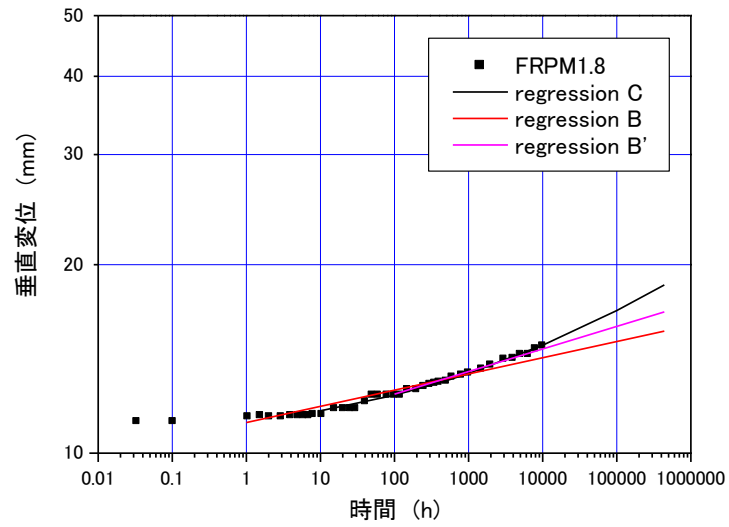


図 1.6.4 垂直変位の回帰分析結果 (FRPM-1)

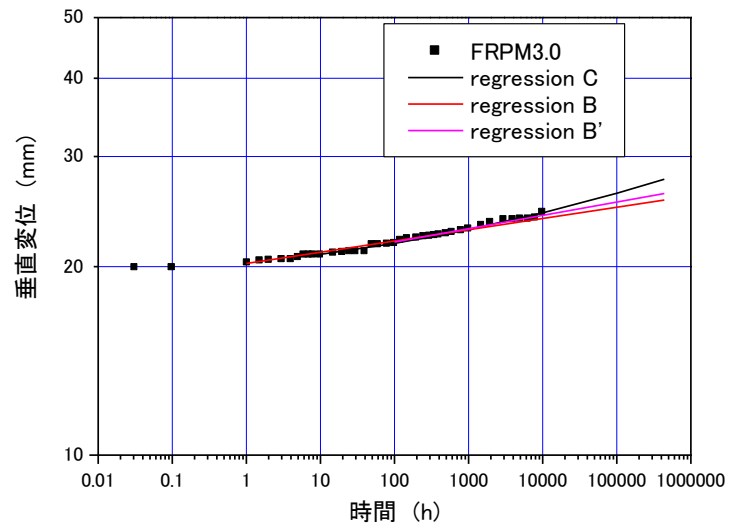


図 1.6.5 垂直変位の回帰分析結果 (FRPM-2)

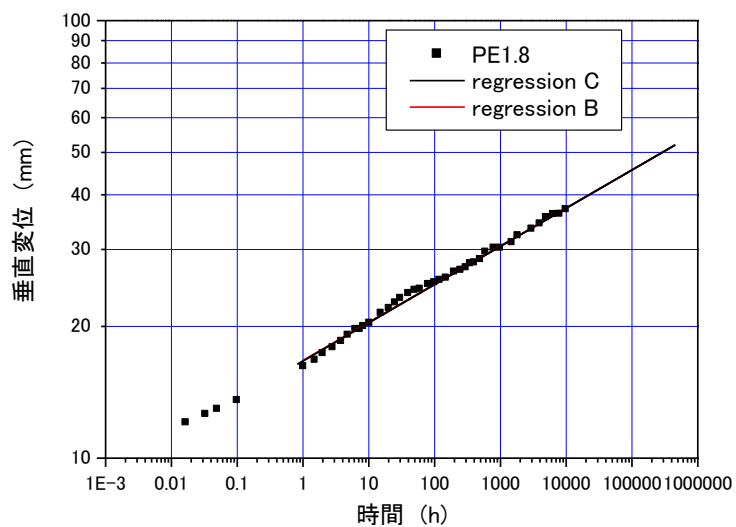


図 1.6.6 垂直変位の回帰分析結果 (PE-1)

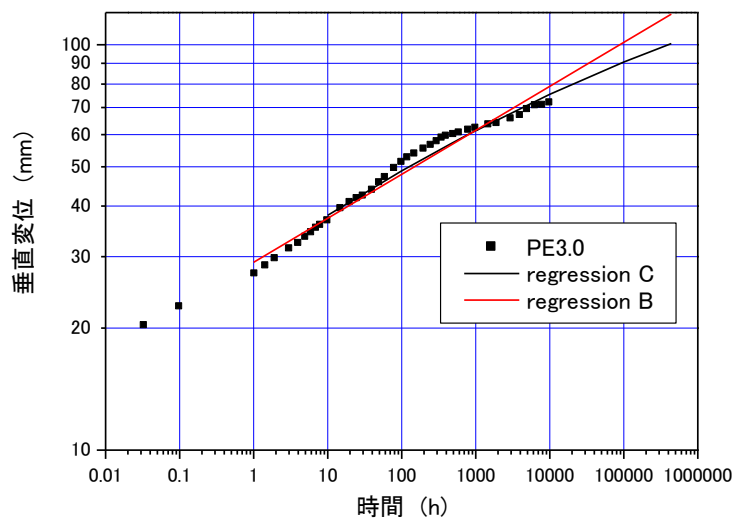


図 1.6.7 垂直変位の回帰分析結果 (PE-2)

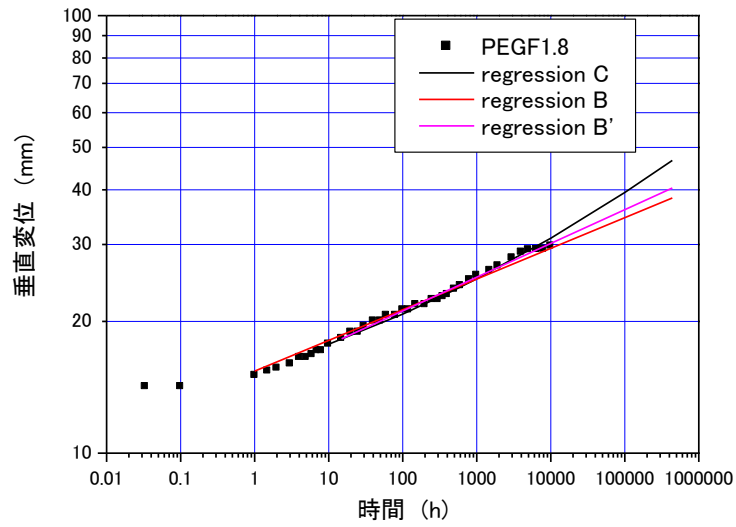


図 1.6.8 垂直変位の回帰分析結果 (PE-GF-1)

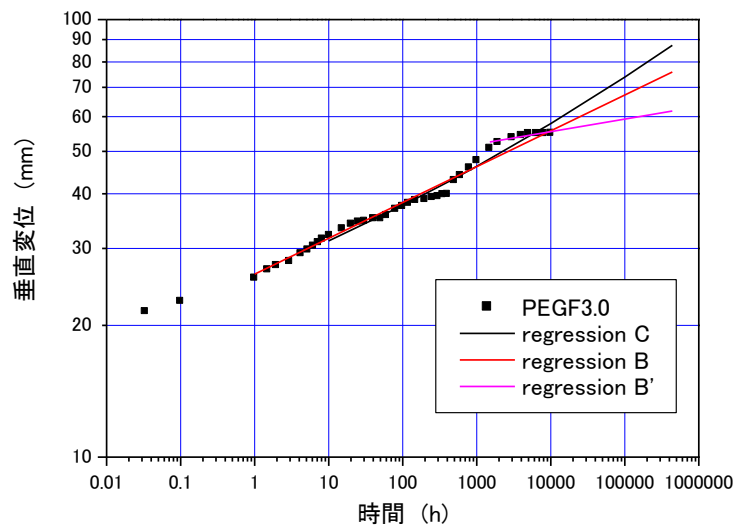


図 1.6.9 垂直変位の回帰分析結果 (PE-GF-2)

2) 外圧クリープ試験後の短期荷重負荷試験

2.1) 試験方法

10,000 時間以上を経過し外圧クリープ試験が終了した 4 管種×2 条件の供試管について、試験荷重を除荷し、23℃の恒温室内に 13 日間静置した後に再度荷重を加えて偏平させ、垂直荷重とたわみ率の関係を求めた。

試験は図 2.1.1～図 2.1.4 に示すように恒温室内に設置した載荷試験機を用いて行い、残留たわみを起点として管厚中心直径の 3%まで（外圧クリープ試験で発生たわみが大きかった条件では最大 5%まで）管を偏平させた。

試験速度は、強化プラスチック複合管(JIS A 5350)と一般用ポリエチレン管(JIS K 6761)の試験方法には定めがないが、“硬質ポリ塩化ビニル管(JIS K 6741)の偏平試験”ならびに“ガラス繊維強化ポリエチレン管のたわみ荷重試験方法”にはそれぞれ $10 \pm 2 \text{ mm/min}$ の規定があることから、4 管種とも 10 mm/min とした。（初期剛性確認の方法と同じ）

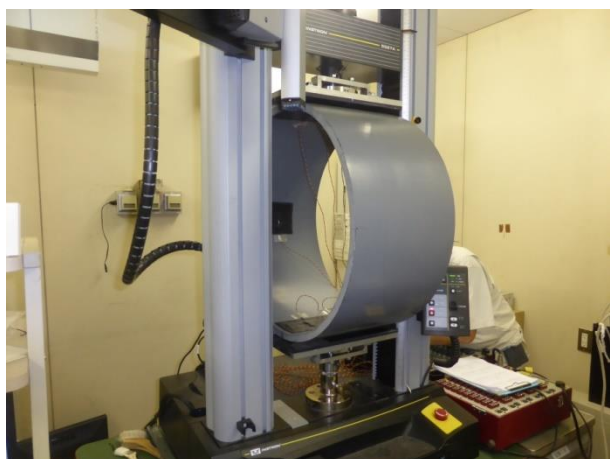


図 2.1.1 硬質ポリ塩化ビニル管 (PVC)



図 2.1.2 強化プラスチック複合管 (FRPM)

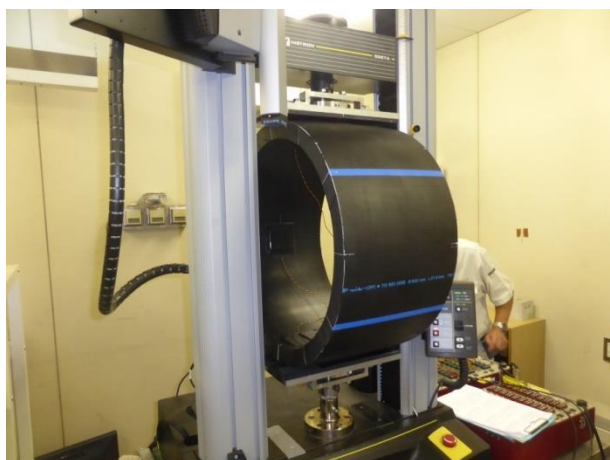


図 2.1.3 一般用ポリエチレン管 (PE)

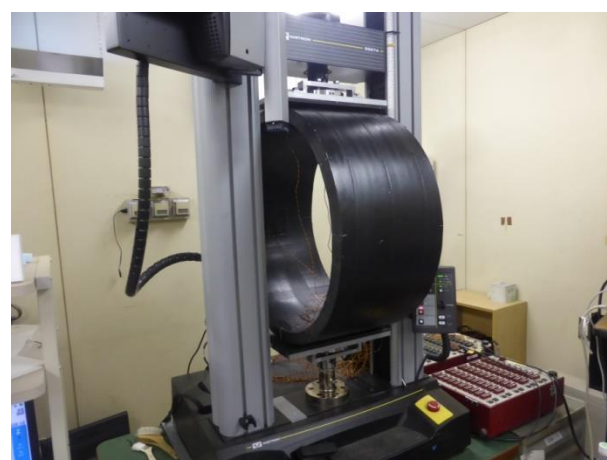


図 2.1.4 ガラス繊維強化ポリエチレン管 (PE-GF)

2. 2) 試験結果

4 管種×2 条件の供試管について、単位長さあたりの垂直荷重とたわみ率の関係、ならびに管頂・管底に貼付した各 2 点の発生ひずみとたわみ率の関係を図 2.2.1～図 2.2.16 に示す。

なお、各グラフは初期剛性確認試験に用いた供試管のデータを「前」、外圧クリープ試験でのたわみ変化、ならびに外圧クリープ試験後のデータを「後」として重ねて示す。

初期剛性確認試験と外圧クリープ試験は、管厚と管幅がわずかに異なる供試管の値であるが、管種ごとに変化の傾向を知るためプロットしている。

荷重とたわみ率の関係では、「後」のグラフは外圧クリープ試験後の残留たわみを起点として示す。(図 2.2.1 参照)

管頂・管底ひずみとたわみ率の関係では、「後」のグラフは外圧クリープ試験後の残留たわみと残留ひずみを起点として示す。(図 2.2.2 参照)

クリープ荷重を除荷した後、短期荷重を再載荷しても剛性は初期とほぼ変わらず、低下率は PE および PE-GF で最大 10%程度である。

ただし、長期荷重を再負荷したのちも強度が初期と変わらないかどうか、本試験ではその特性は不明である。

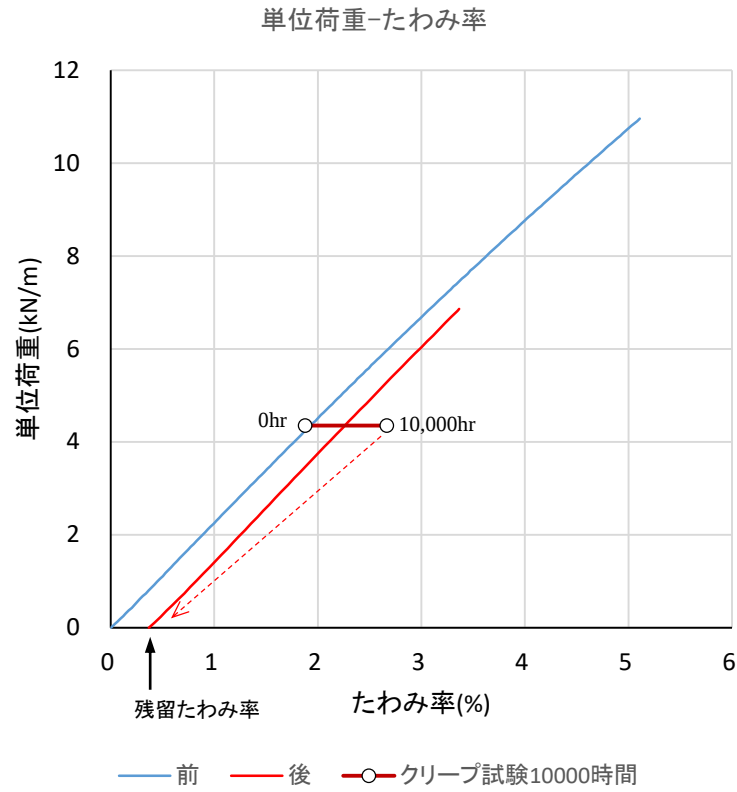


図 2.2.1 単位長さあたりの荷重とたわみ率の関係 (PVC1.8%)

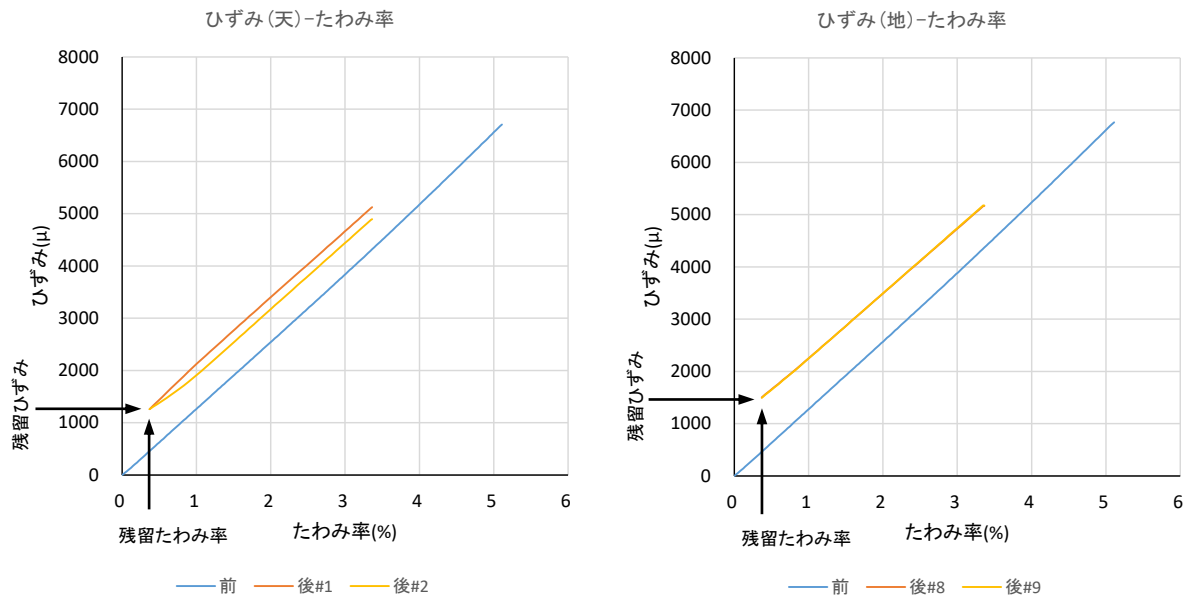
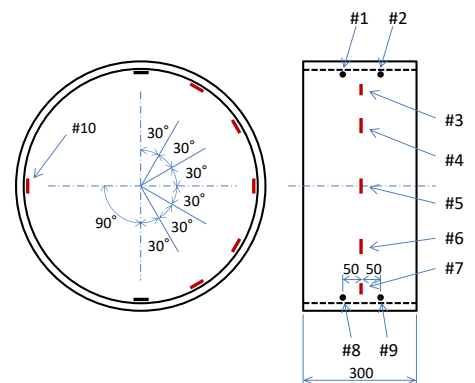


図 2.2.2 管頂・管底ひずみとたわみ率の関係 (PVC1.8%)



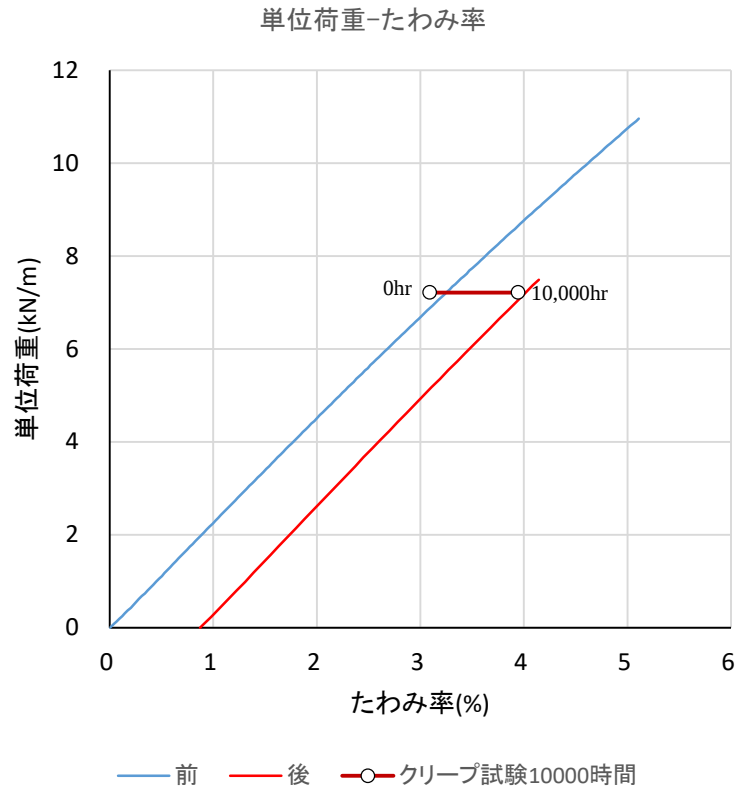


図 2.2.3 単位長さあたりの荷重とたわみ率の関係 (PVC3.0%)

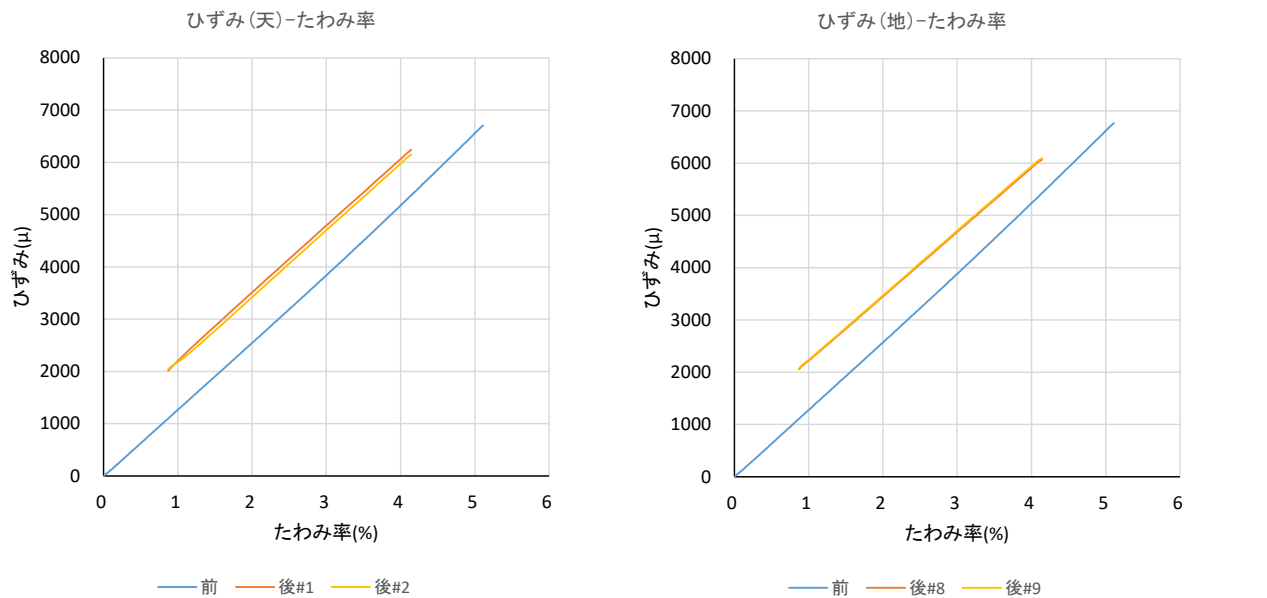
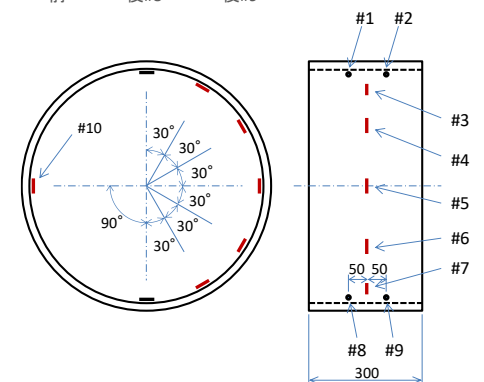


図 2.2.4 管頂・管底ひずみとたわみ率の関係 (PVC3.0%)



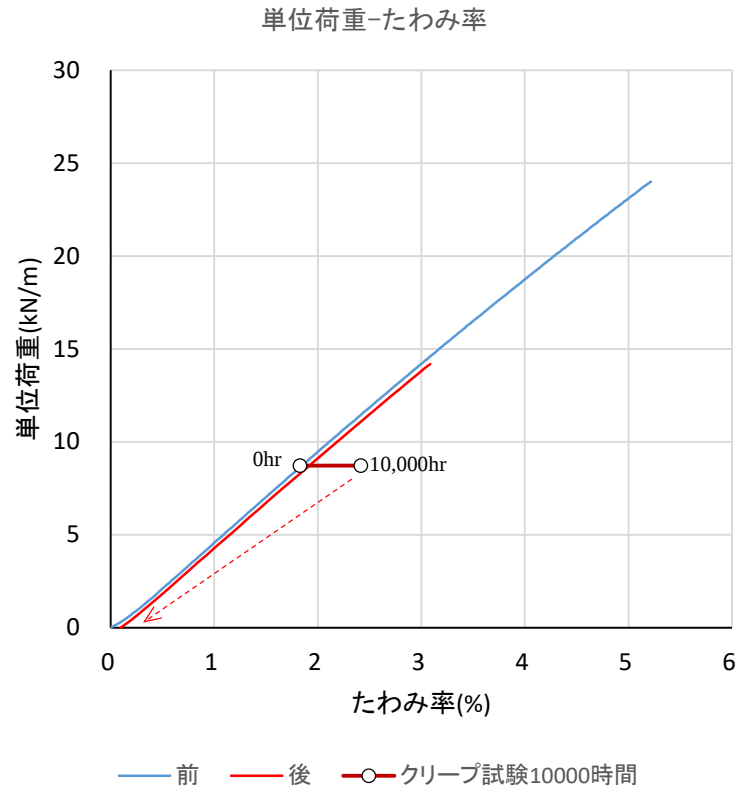


図 2.2.5 単位長さあたりの荷重とたわみ率の関係 (FRPM1.8%)

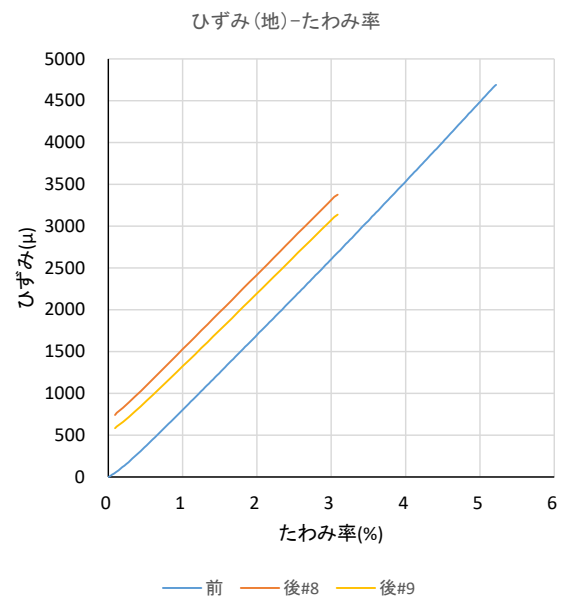
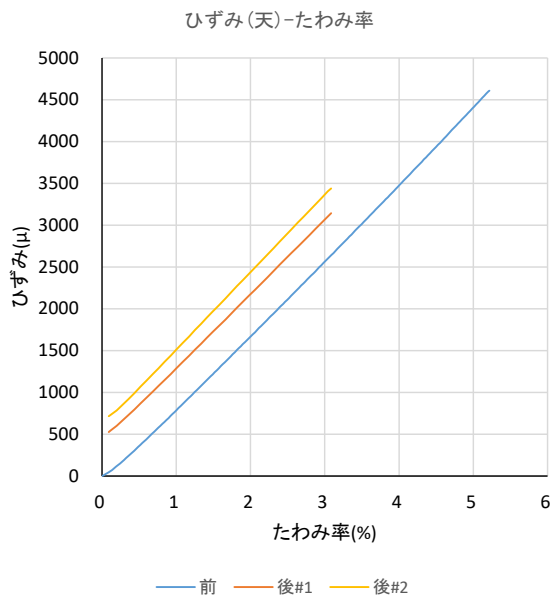
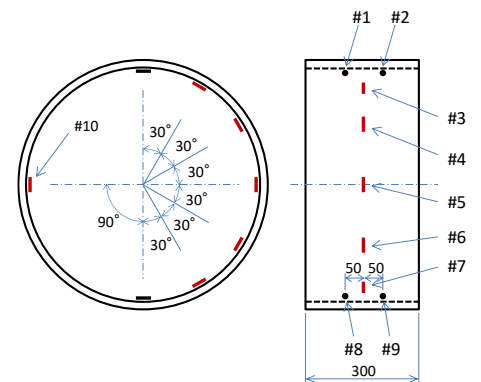


図 2.2.6 管頂・管底ひずみとたわみ率の関係 (FRPM1.8%)



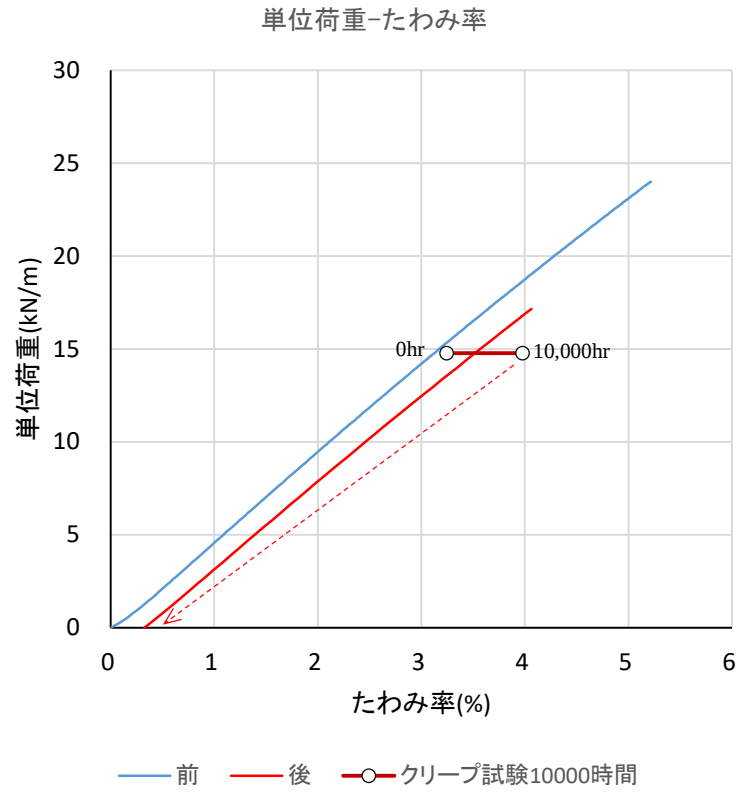


図 2.2.7 単位長さあたりの荷重とたわみ率の関係 (FRPM3.0%)

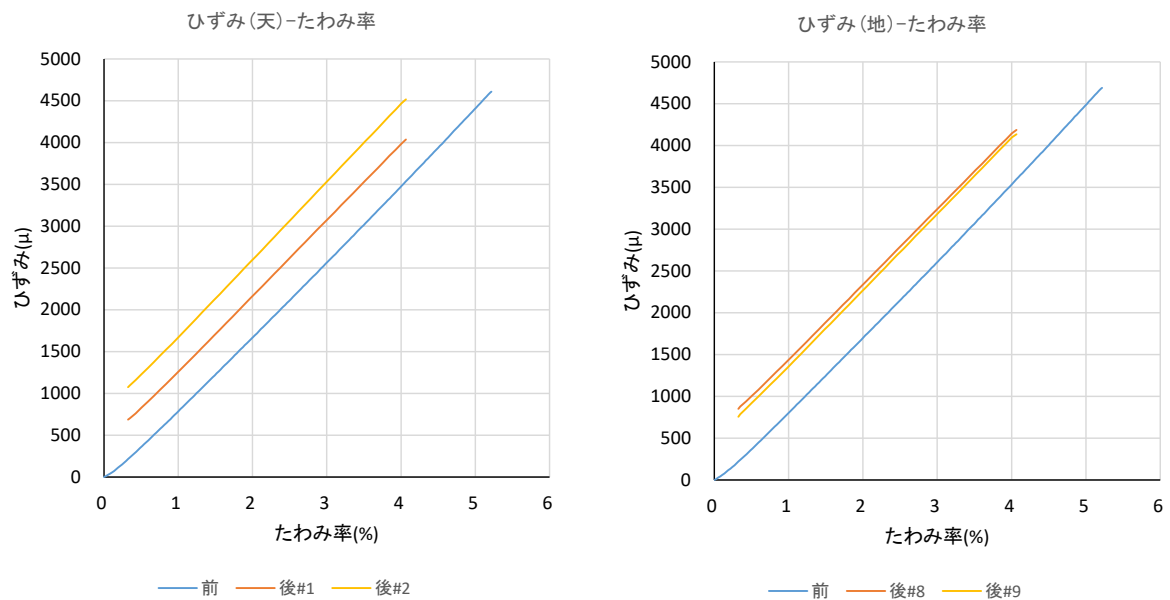
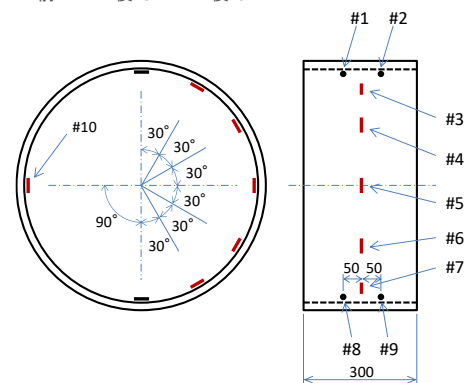


図 2.2.8 管頂・管底ひずみとたわみ率の関係 (FRPM3.0%)



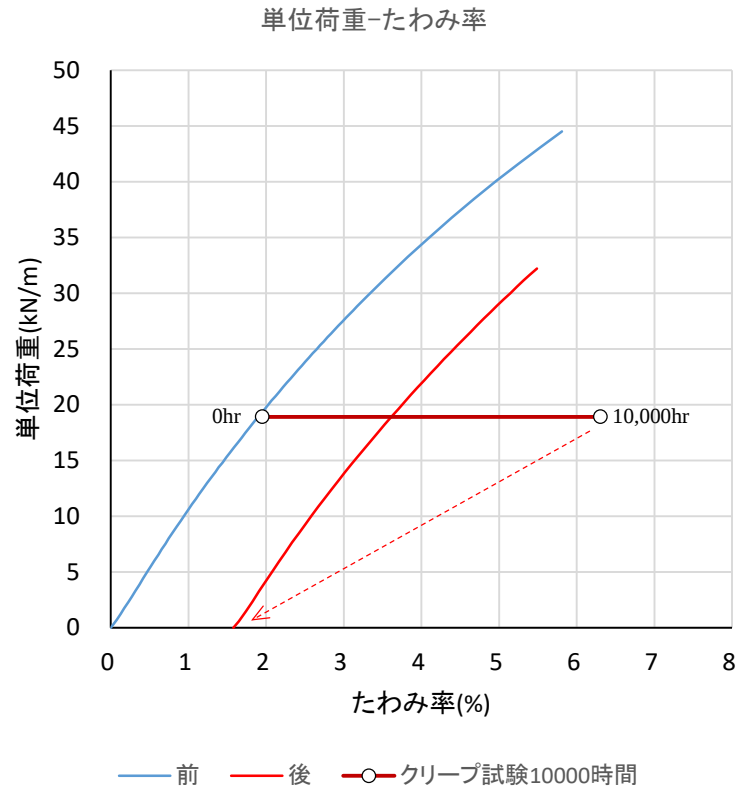


図 2.2.9 単位長さあたりの荷重とたわみ率の関係 (PE1.8%)

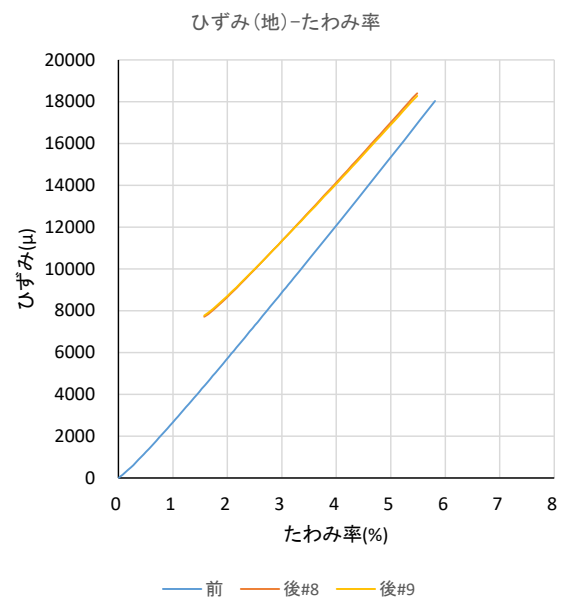
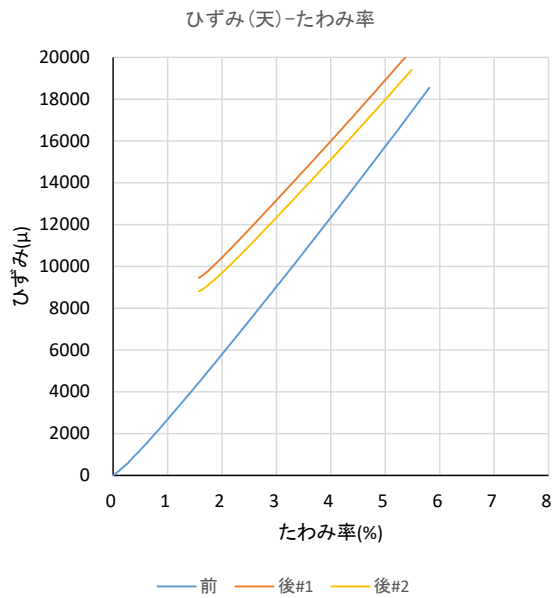
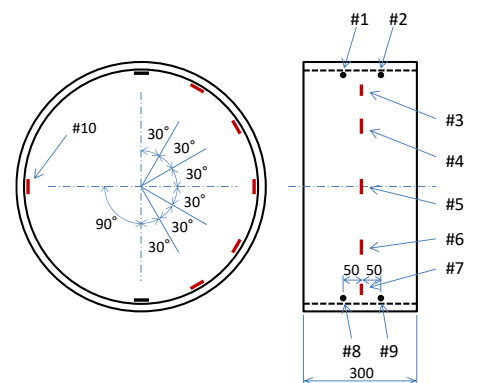


図 2.2.10 管頂・管底ひずみとたわみ率の関係 (PE1.8%)



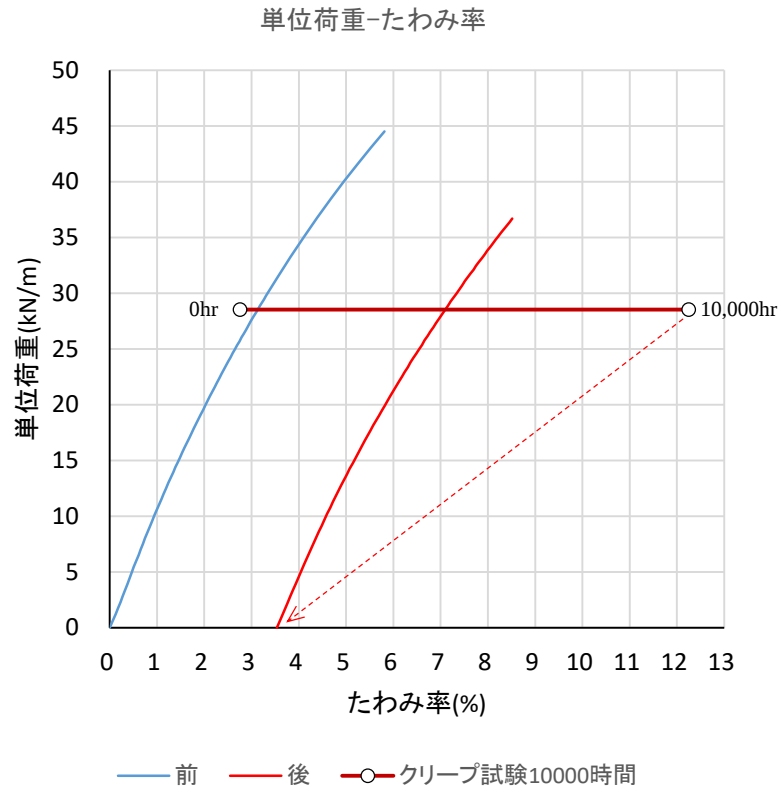


図 2.2.11 単位長さあたりの荷重とたわみ率の関係 (PE3.0%)

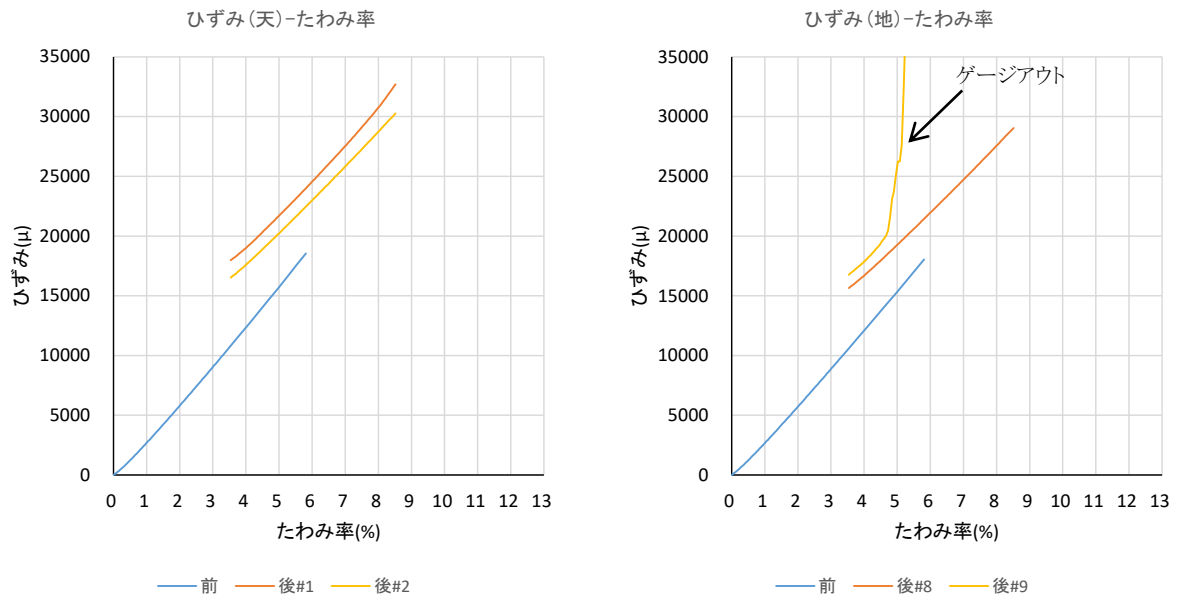
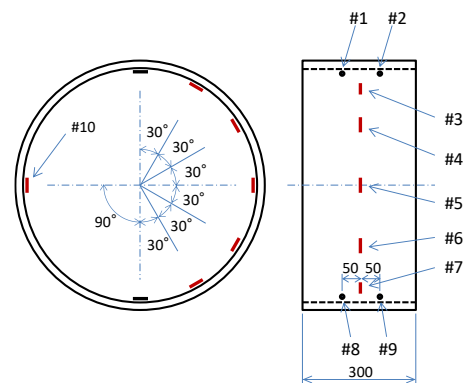


図 2.2.12 管頂・管底ひずみとたわみ率の関係 (PE3.0%)



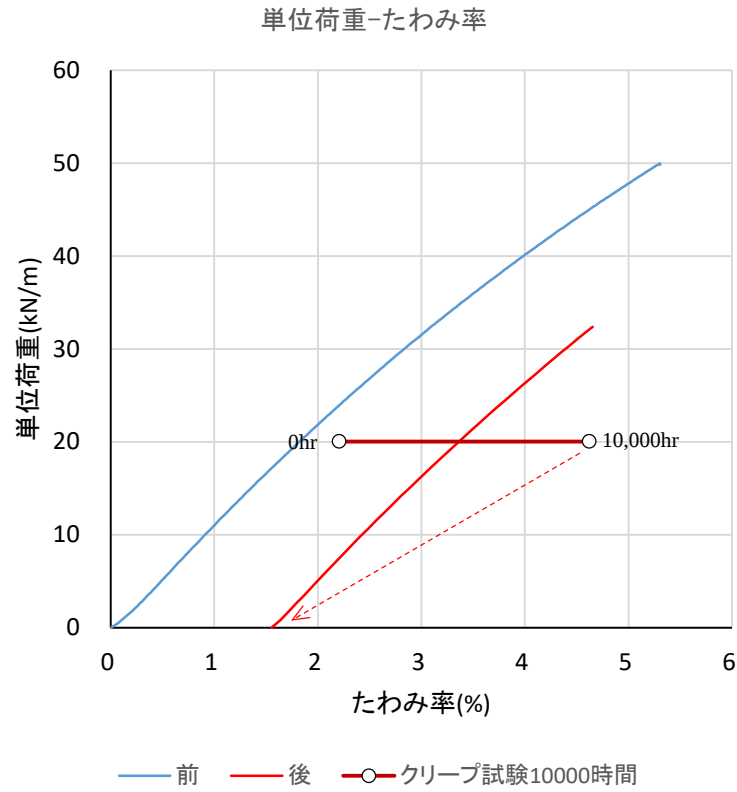


図 2.2.13 単位長さあたりの荷重とたわみ率の関係 (PEGF1.8%)

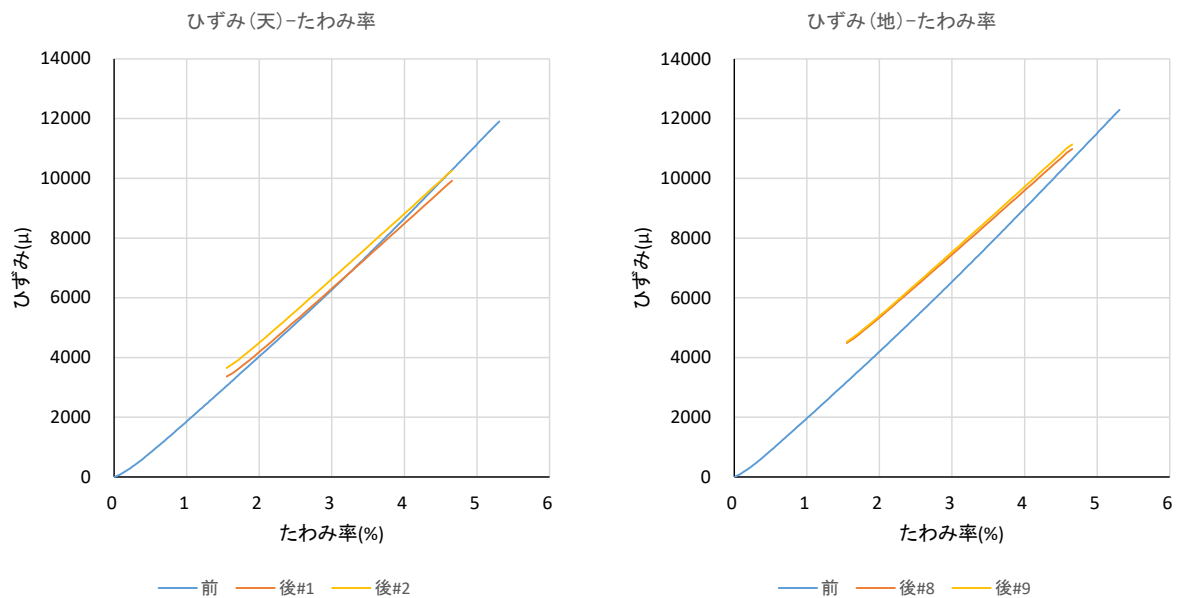
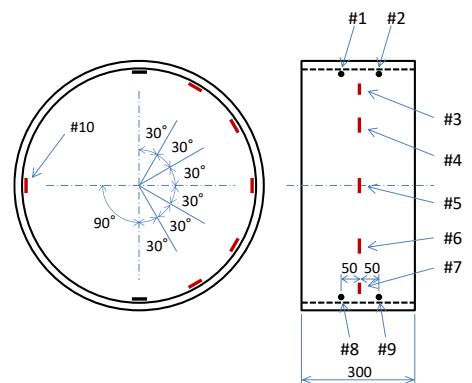


図 2.2.14 管頂・管底ひずみとたわみ率の関係 (PEGF1.8%)



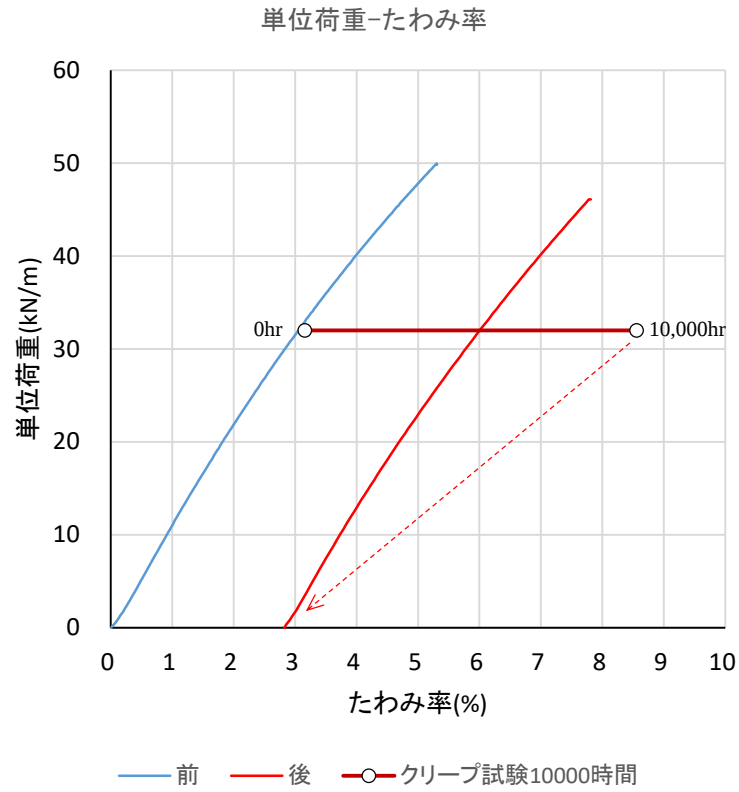


図 2.2.15 単位長さあたりの荷重とたわみ率の関係 (PEGF3.0%)

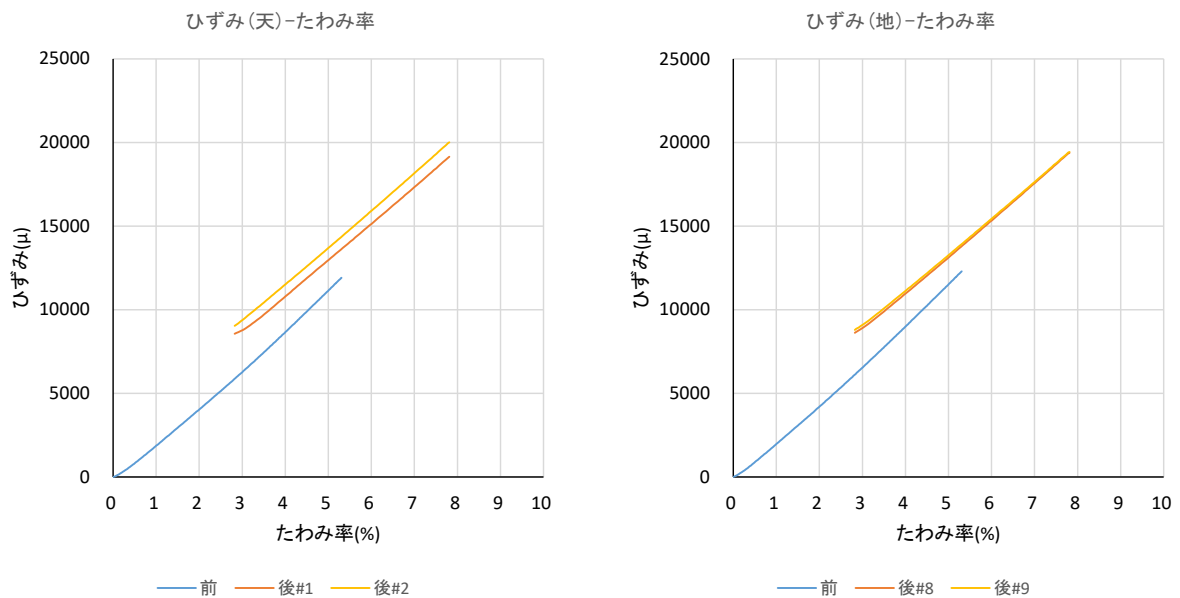
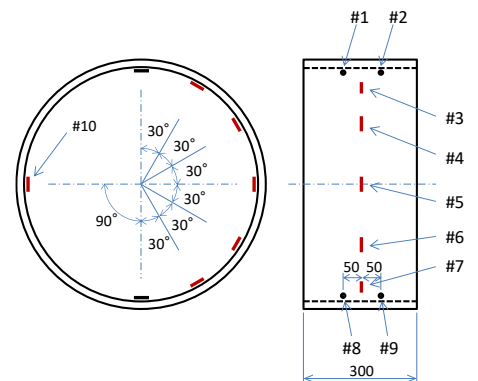


図 2.2.16 管頂・管底ひずみとたわみ率の関係 (PEGF3.0%)



(3) 長期強度特性の解明

4 管種の既往の長期特性データについて、PVC、PE、PE-GF は ISO9080 に基づく熱間内圧クリープ試験により内圧・外圧に共通の長期強度を求めている。また FRPM は ISO7509 内圧クリープ試験に基づき、長期極限内圧ひずみを求めている。

これらの試験には 10000 時間以上の時間と多くの試験装置（および供試管）を要し、結果の評価に多大な労力を要することから、ここでは試験研究機関等が既往データの検証を行うにあたり、比較的簡易な試験方法で妥当性を確認する方法について検討した。

検討した試験方法（再評価試験、促進試験）と背景を図 3.1 に示す。

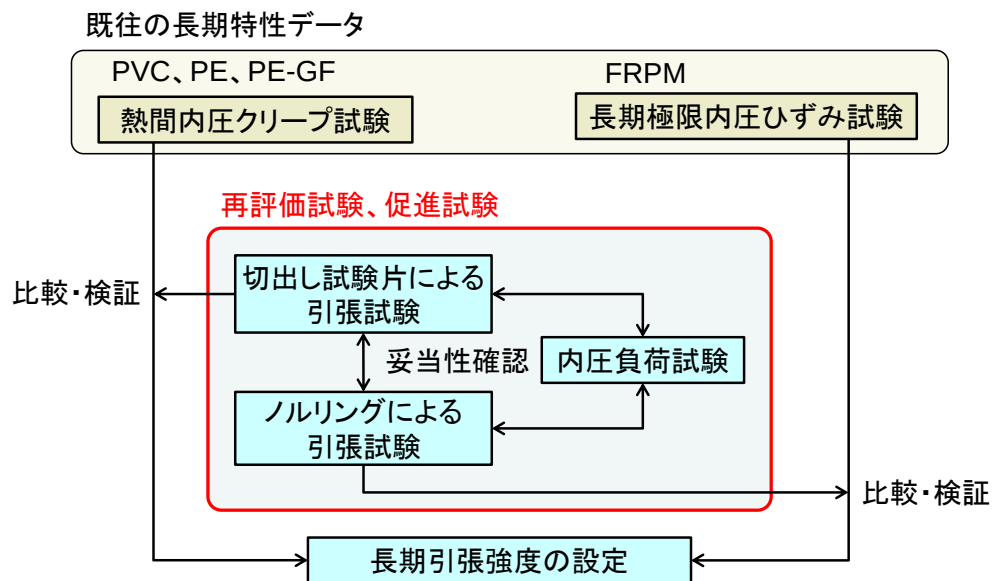


図 3.1 長期強度試験方法の検討

1) 材料引張試験

1.1) 目的

樹脂管の長期強度特性（内圧・外圧）把握のため、管から試験片を切り出し、引張試験を行った。基準強度を確認するとともに、試験速度を変化させて材料強度の速度依存性について検証を行った。

1.2) 引張試験方法

樹脂管の引張試験は、JIS K 6815「熱可塑性プラスチック管 引張特性の求め方」(ISO6259 を基とする) に準じて原管からダンベル型の試験片を作製し、引張強度を求めた。

試験の対象とした管種は、硬質ポリ塩化ビニル管 (PVC)、一般用ポリエチレン管 (PE)、ガラス繊維強化ポリエチレン管 (PE-GF) の 3 種類とした。

強化プラスチック複合管 (FRPM) は積層構造の複合材料であり、試験片の採取が困難であるため、対象外とした。

試験片の形状・寸法は JIS K 6815 に準じ、PVC は図 3.1.1 に示す試験片(タイプ 1)、PE-GF および PE は図 3.1.2 に示すタイプ 1 試験片、とした。

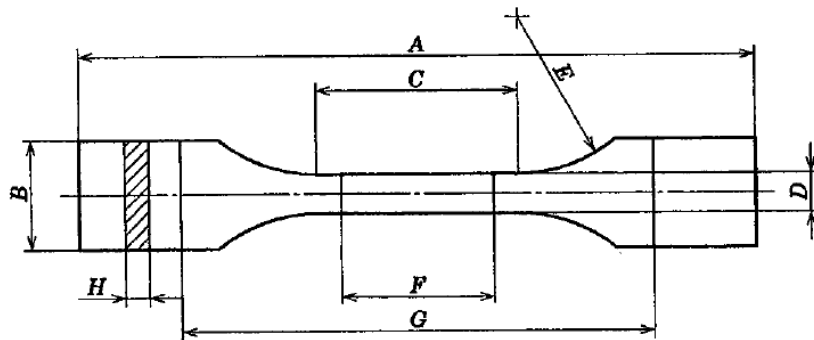


図 1 機械加工による試験片 (タイプ 1)

表 1 機械加工による試験片の寸法

記号	名称	寸法 mm
A	全長 (最小)	115
B	端部の幅	≥ 15
C	幅の狭い平行部分の長さ	33 ± 2
D	狭い平行部分の幅	$6^{+0.4}_0$
E	半径	14 ± 1
F	標線間距離	25 ± 1
G	つかみ具間の初めの間隔	80 ± 5
H	厚さ	管の厚さ

図 3.1.1 PVC 用の試験片(タイプ 1) JIS K 6815-2 より

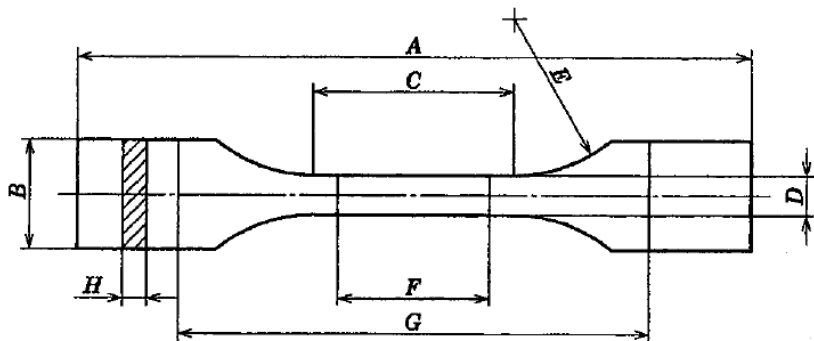


図 1 タイプ 1 試験片

表 1 タイプ 1 試験片の寸法

記号	名称	寸法 mm
A	全長 (最小)	150
B	端部の幅	20 ± 0.2
C	幅の狭い平行部分の長さ	60 ± 0.5
D	狭い平行部分の幅	10 ± 0.2
E	半径	60
F	標線間距離	50 ± 0.5
G	つかみ具間の初めの間隔	115 ± 0.5
H	厚さ	管の厚さ

図 3.1.2 PE-GF 用・PE 用のタイプ 1 試験片 JIS K 6815-3 より

1. 3) 引張試験結果

原管の種類、切出し方向、試験速度、最大引張応力とそのひずみ、最大応力までの時間を一覧にして表 3.1.1 に示す。

表 3.1.1 引張試験条件および結果一覧

管種	試験名	方向	引張速度 (mm/min)	最大応力 (MPa)	ひずみ伸び (%)	チャック変位 (mm)	最大応力までの時間 (hr)	備考
PVC	PVC_1-1	周	5.0	53.27	4.21	3.08	0.01027	無負荷状態から 切出し (t=8)
	PVC_1-2		1.0	49.47	4.04	3.08	0.05133	
	PVC_1-3		0.2	46.62	3.75	2.69	0.22417	
	PVC_1-4		0.01	42.62	3.69	2.62	4.37167	
	PVC_1-5		0.001	40.45	3.33	2.29	38.11667	
	PVC_2-1	軸	5.0	52.55	4.14	3.03	0.01010	
	PVC_2-2		1.0	49.37	3.97	2.79	0.04650	
	PVC_2-3		0.2	46.47	3.94	2.84	0.23667	
	PVC_2-4		0.01					
	PVC_2-5		0.001					
PE	PE_1-1	周	50.0	26.91	7.47	7.94	0.00265	無負荷状態から 切出し (t=10)
	PE_1-2		5.0	23.45	8.82	9.93	0.03310	
	PE_1-3		1.0	21.43	9.63	10.35	0.17250	
	PE_1-4		0.2	18.85	9.51	10.43	0.86917	
	PE_1-5		0.01	15.38	10.66	11.14	18.57167	
	PE_1-6	軸	0.001	13.40	14.32	15.51	258.41667	
	PE_2-1		50.0	27.34	7.80	8.53	0.00284	
	PE_2-2		5.0	23.46	9.60	10.60	0.03533	
	PE_2-3		1.0	21.16	10.14	11.02	0.18367	
	PE_2-4		0.2	19.06	11.38	11.86	0.98833	
	PE_2-5		0.01					
	PE_2-6		0.001					

表 3.1.1 引張試験条件および結果一覧 (続き)

管種	試験名	方向	引張速度 (mm/min)	最大応力 (MPa)	ひずみ伸び (%)	チャック変位 (mm)	最大応力までの時間 (hr)	備考
PE-GF	PEGF_t1-1	周	50.0	59.28	3.86	3.86	0.00129	JIS K 6799による 加熱・加圧後に 切出し (t=4)
	PEGF_t1-2		5.0	40.58	2.81	2.91	0.00970	
	PEGF_t1-3		1.0	48.90	4.00	4.20	0.07000	
	PEGF_t1-4		0.2	36.69	6.07	5.12	0.42662	
	PEGF_t1-5		0.01	38.57	4.22	4.66	7.77404	
	PEGF_t1-6		0.001	30.81	3.91	3.85	64.08333	
	PEGF_t2-1	軸	50.0	29.65	4.62	4.83	0.00161	
	PEGF_t2-2		5.0	26.47	5.14	5.76	0.01922	
	PEGF_t2-3		1.0	26.14	5.76	7.32	0.12199	
	PEGF_t2-4		0.2	22.40	5.85	6.23	0.51938	
	PEGF_t2-5		0.01	17.02	7.59	6.96	11.59410	
	PEGF_t2-6		0.001	15.28	6.56	6.50	108.40000	
	PEGF_1-1	周	50.0	51.43	2.02	2.98	0.00099	無負荷状態から 切出し (t=4)
	PEGF_1-2		5.0	45.02	4.04	4.13	0.01377	
	PEGF_1-3		1.0	41.06	4.86	4.67	0.07783	
	PEGF_1-4		0.2	40.32	5.52	5.10	0.42500	
	PEGF_1-5		0.01	34.50	—	5.30	8.83667	
	PEGF_1-6		0.001					
	PEGF_2-1	軸	50.0	29.41	5.51	5.52	0.00184	
	PEGF_2-2		5.0	28.79	5.72	6.20	0.02067	
	PEGF_2-3		1.0	23.43	7.26	7.47	0.12450	
	PEGF_2-4		0.2	22.86	8.91	6.79	0.56583	
	PEGF_2-5		0.01	19.94	6.90	7.82	13.03333	
	PEGF_2-6		0.001					
	PEGF_1-1	周	50.0	55.50	3.37	6.50	0.00217	無負荷状態から 切出し (t=10)
	PEGF_1-2		5.0	46.04	4.90	6.98	0.02327	
	PEGF_1-3		1.0	43.29	4.40	7.41	0.12350	
	PEGF_1-4		0.2	39.99	4.25	7.17	0.59750	
	PEGF_1-5		0.01	33.25	5.15	7.53	12.55667	
	PEGF_1-6		0.001	28.72	4.62	7.31	121.90000	
	PEGF_2-1	軸	50.0	31.83	4.33	6.50	0.00217	
	PEGF_2-2		5.0	28.50	5.38	7.55	0.02517	
	PEGF_2-3		1.0	25.25	6.03	8.06	0.13433	
	PEGF_2-4		0.2	22.68	7.48	8.78	0.73167	
	PEGF_2-5		0.01					
	PEGF_2-6		0.001					

引張強度と試験速度の関係を管種ごとに整理して図 3.1.3 に示す。

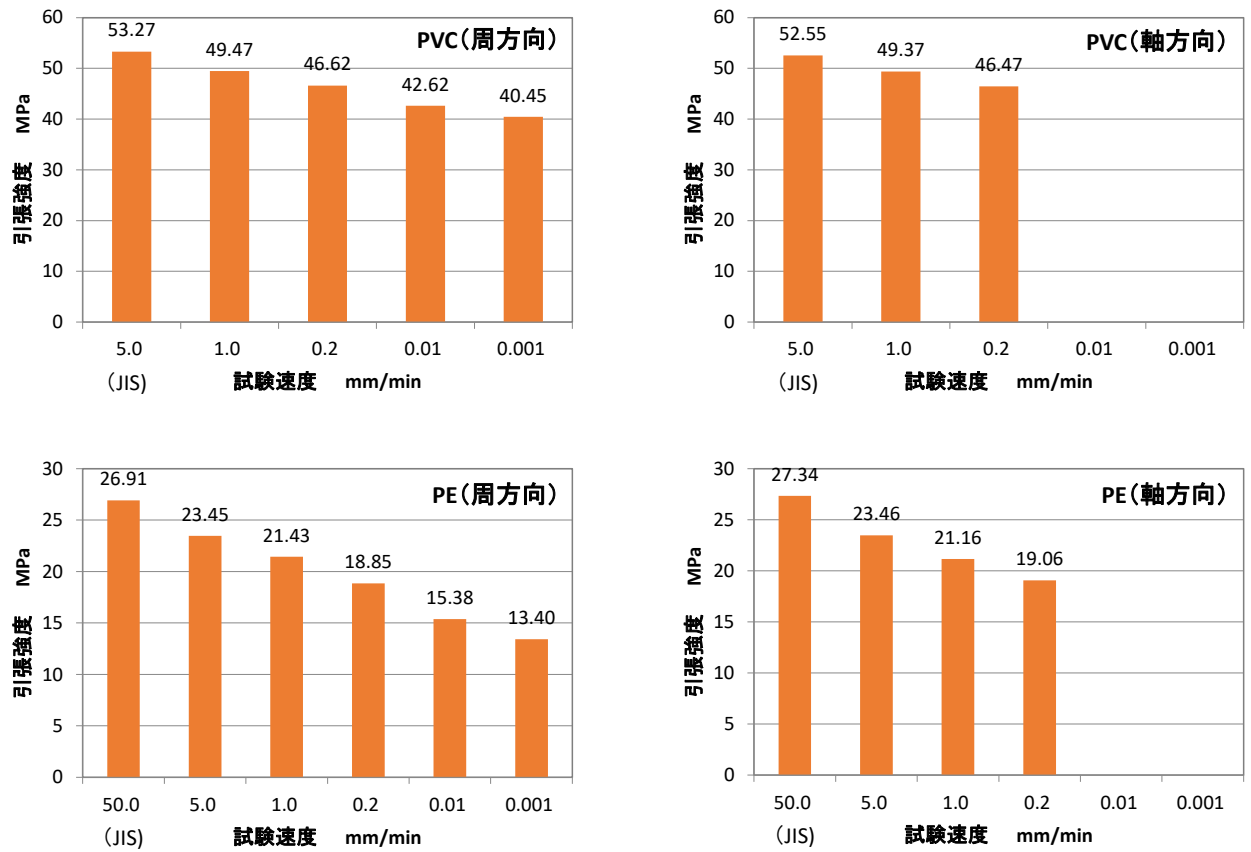


図 3.1.3 引張強度と試験速度の関係

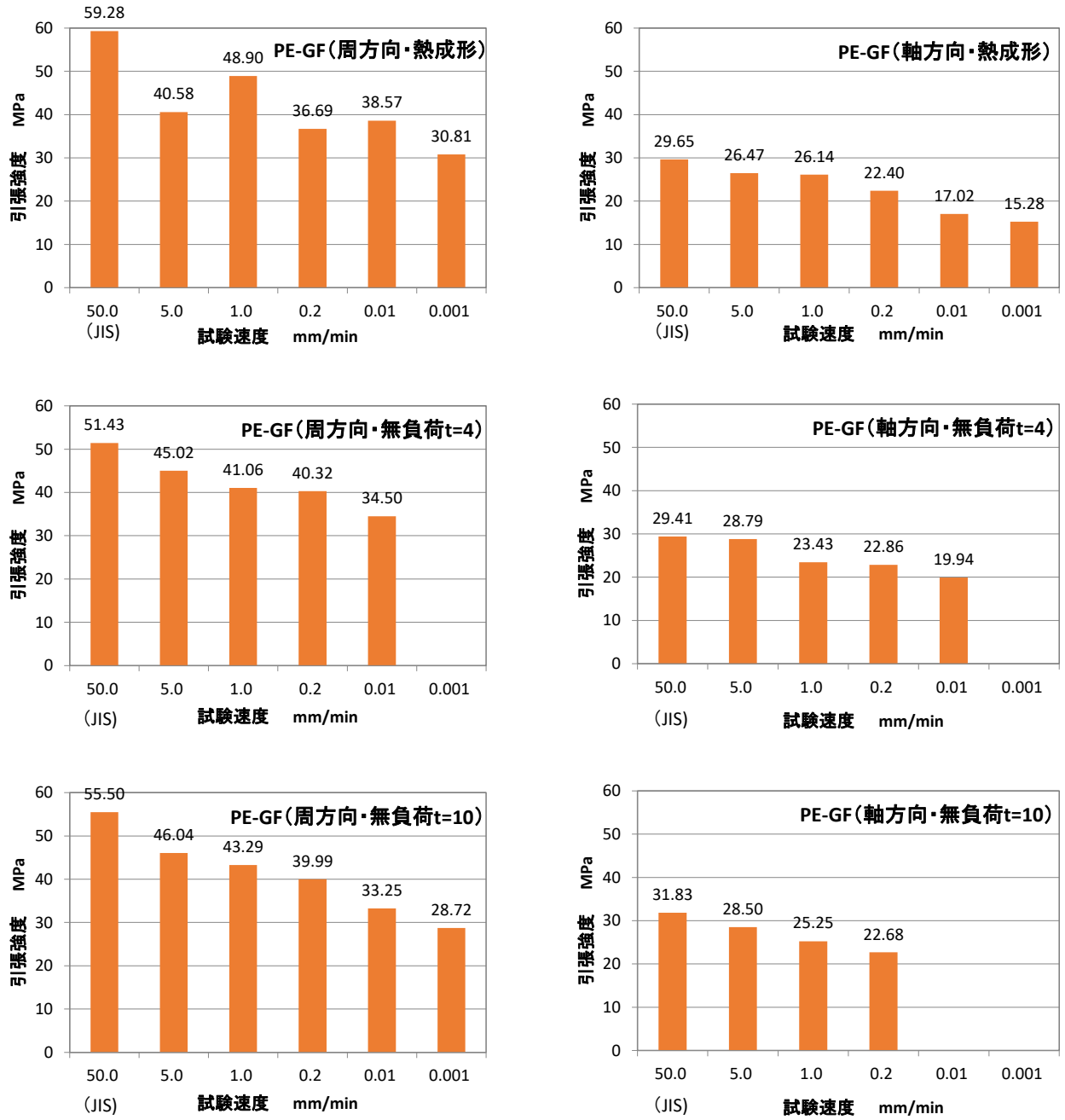


図 3.1.3 引張強度と試験速度の関係 (続き)

1. 4) 引張強度の速度依存性

図 3.1.3 より、すべての条件で試験速度が遅くなると引張強度が低下する傾向が認められる。一方で、破壊（最大応力）を生じる変位（ひずみ）については試験速度の影響は小さい。

ここでは試験片が破壊に至るまでの時間に着目し、引張強度の速度依存性を確認する。破壊（または最大応力）を示す変位量を試験速度で除した値を「最大応力までの時間」とし、引張強度との関係を両対数でプロットして図 3.1.4～図 3.1.7 に示す。図中には JIS K 7020 の方法 A にしたがって求めた回帰直線を重ねて示す。

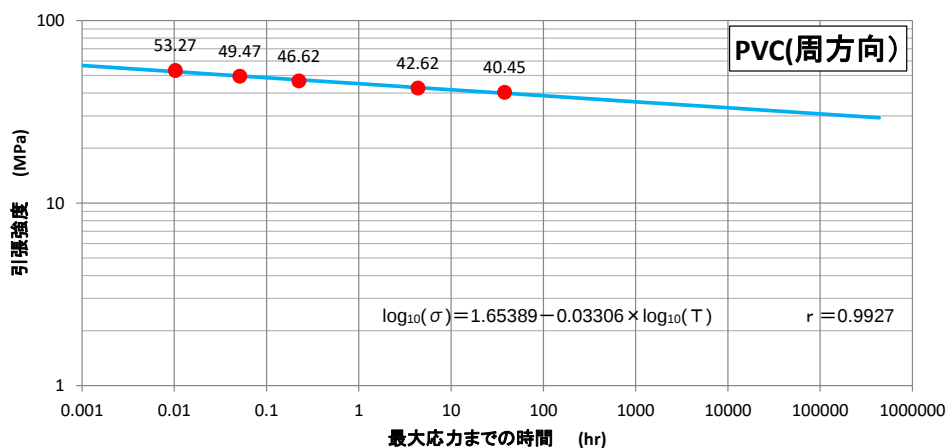


図 3.1.4a PVC(周方向)

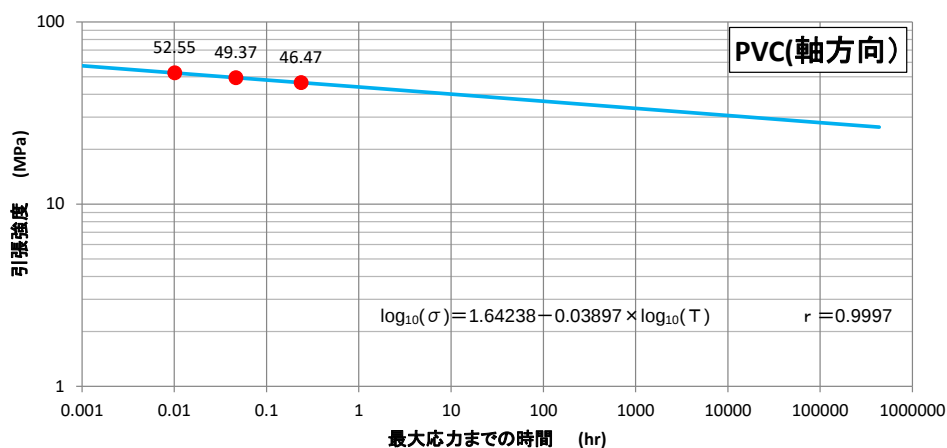


図 3.1.4b PVC(軸方向)

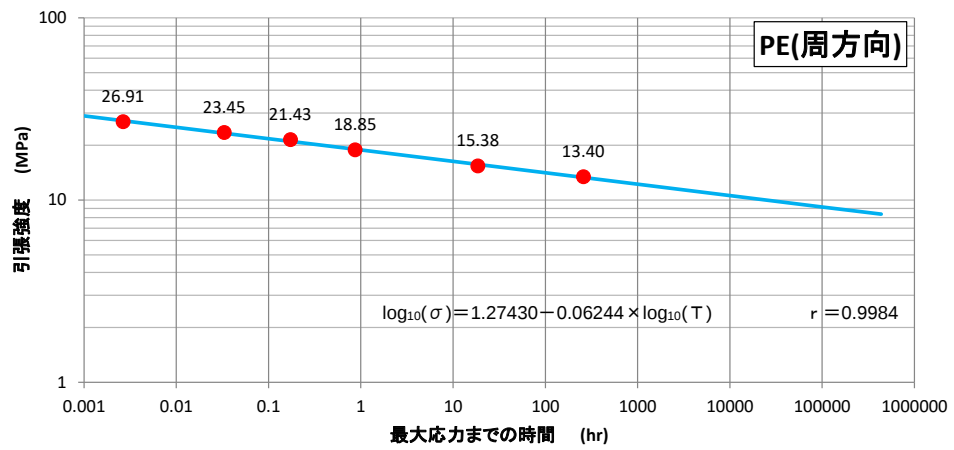


図 3.1.5a PE(周方向)

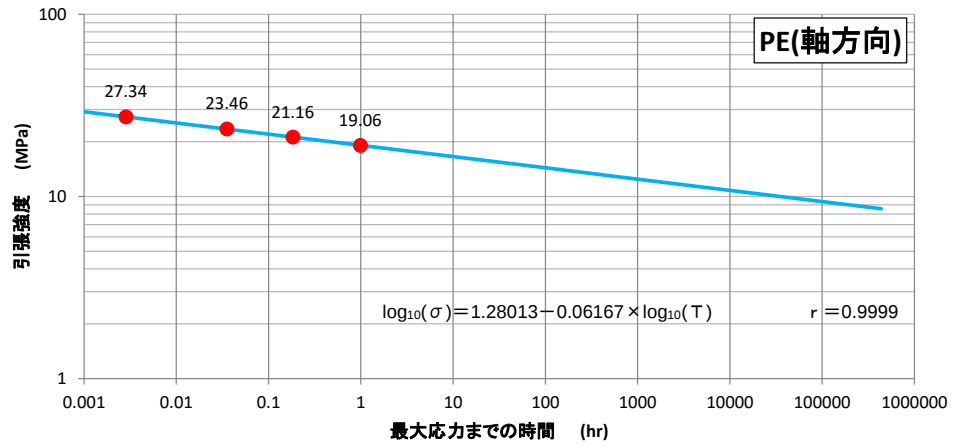


図 3.1.5b PE(軸方向)

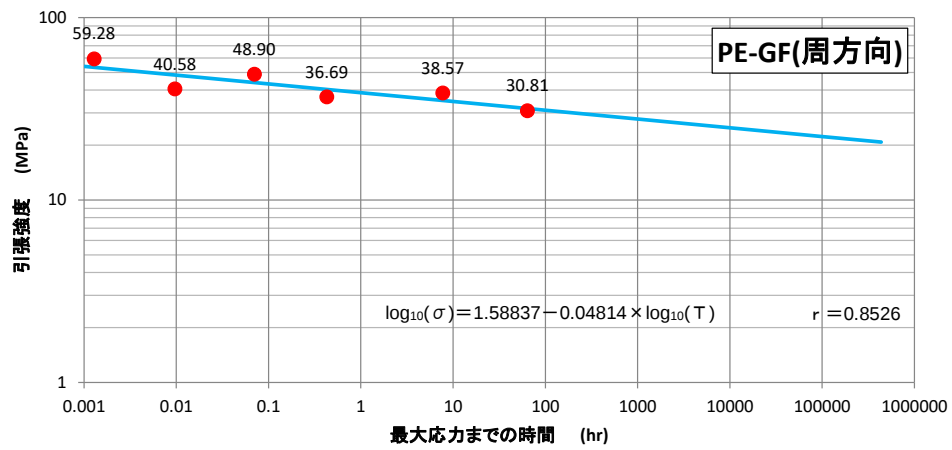


図 3.1.6a PE-GF(周方向) 加熱・加圧 $t=4$

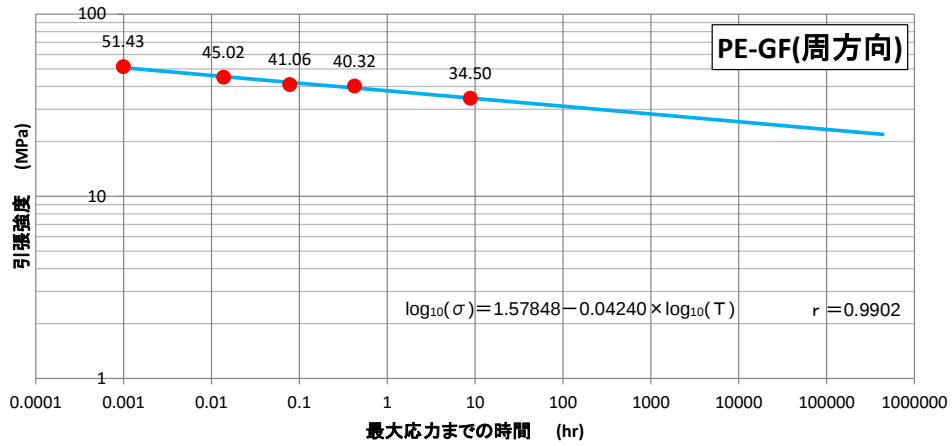


図 3.1.6b PE-GF(周方向) 無負荷 $t=4$

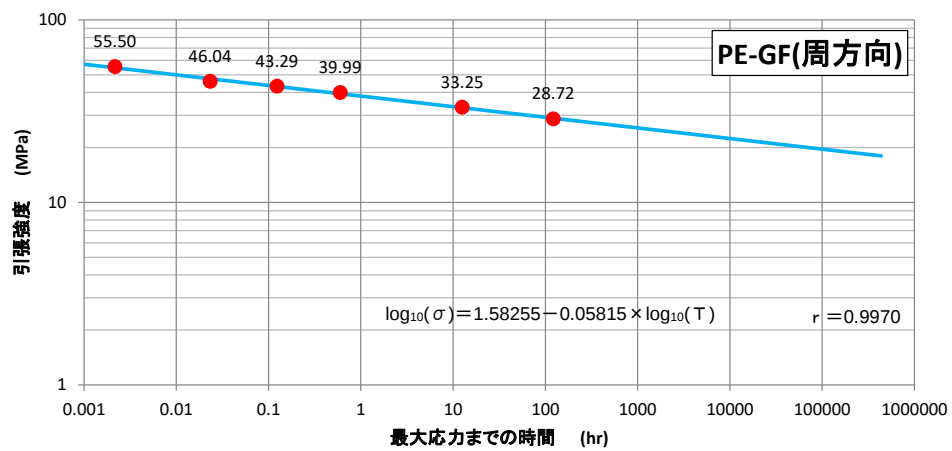


図 3.1.6c PE-GF(周方向) 無負荷 $t=10$

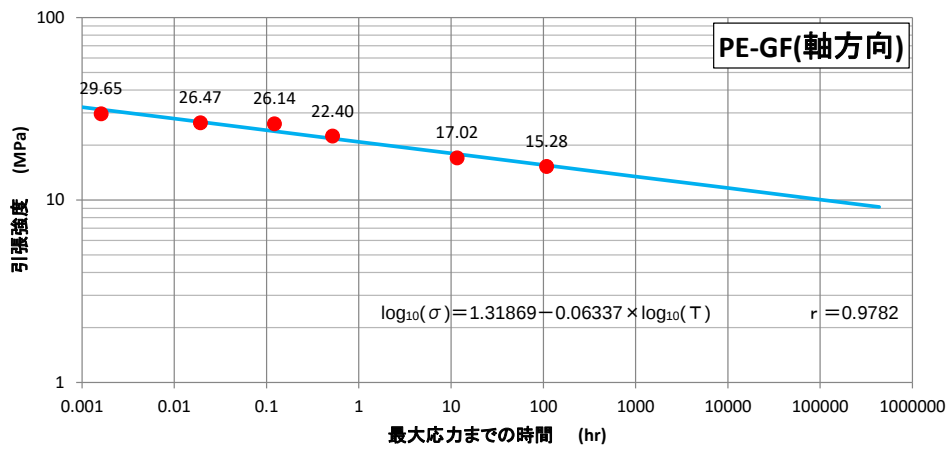


図 3.1.7a PE-GF(軸方向) 加熱・加圧 $t=4$

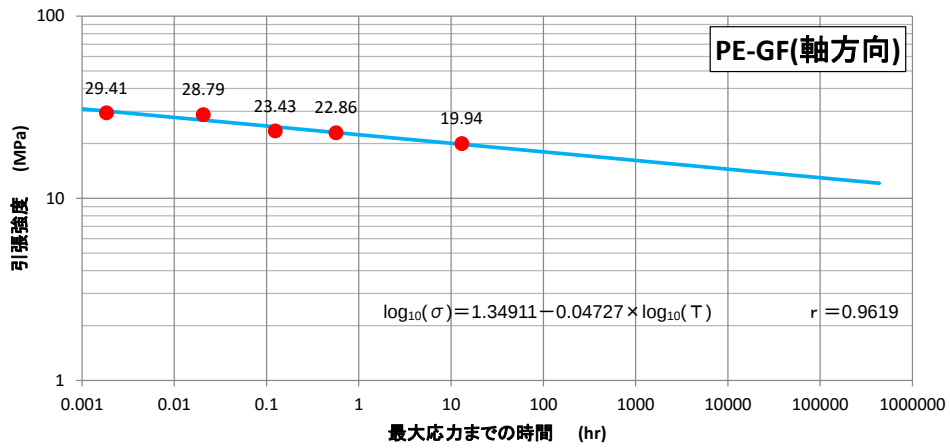


図 3.1.7b PE-GF(軸方向) 無負荷 $t=4$

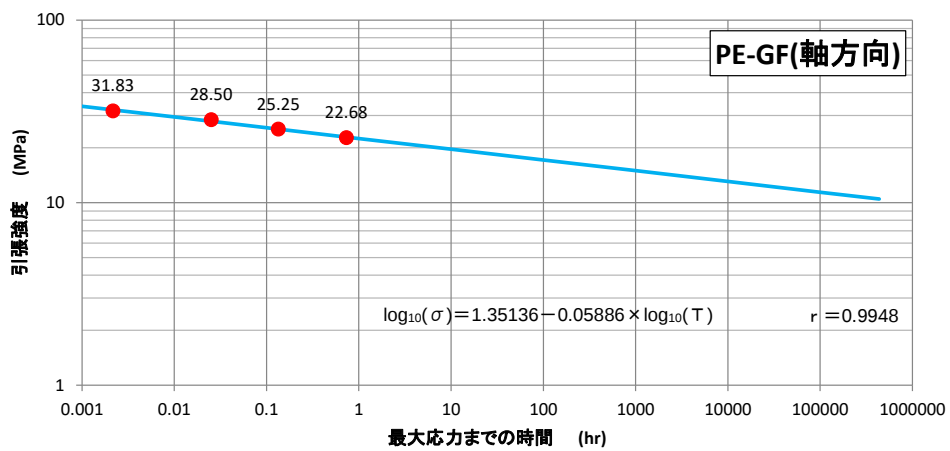


図 3.1.7c PE-GF(軸方向) 無負荷 $t=10$

1. 5) PE-GF のガラス繊維添加量

PE-GF は複合材料であり、JIS K 6799 においてガラス繊維添加量は 19.0%～21.0%とされている。

試験体の妥当性確認のため、試験実施前に原管から試験片を切り出して燃焼試験を実施し、ガラス繊維添加量を確認した。

結果を表 3.1.2 に示す。JIS K 6799 の規定を満足している。

表 3.1.2 PE-GF のガラス繊維添加量

供試体番号		No. 1	No. 2	No. 3
寸法および質量	外面面積 (mm ²)	1446	1426	1390
	内面面積 (mm ²)	1270	1323	1233
	平均厚さ (mm)	27.62	27.81	28.37
	①燃焼前 質量 (g)	41.073	42.491	40.834
燃焼試験	容器番号	1	2	3
	容器質量 (g)	239.361	238.598	166.085
	燃焼前+容器 (g)	280.434	281.089	206.919
	燃焼後+容器 (g)	247.393	246.801	174.174
	②燃焼後 質量 (g)	33.041	34.288	32.745
	燃焼後質量の割合 (①-②)/① %	19.6 %	19.3 %	19.8 %

1. 6) まとめ

(1) 引張強度

図 3.1.3 より、JIS K 6815 に示された試験速度で実施した引張試験結果は、3 管種 (PVC、PE、PE-GF) のすべてが設計基準 (PE-GF は JIS K 6799) に示された下記の短期強度を満足している。
PVC=45MPa、PE=6.2×3=18.6MPa、PE-GF(周)=40MPa、PE-GF(軸)=24MPa。

(2) 速度依存性

引張強度は試験速度の影響を受け、試験速度が遅くなるほど強度が低下する。PVC と比較して PE と PE-GF では強度低下の度合いが大きい。

(3) 材料異方性

PE-GF は周方向と軸方向とで引張強度ならびに弾性係数が異なる。PVC、PE は切出し方向による異方性は認められず、周方向と軸方向とで同等の値を示す。

2) ノルリング引張試験および内圧負荷試験

2.1) 目的

1) 材料引張試験 に示したとおり、PVC、PE、PE-GF は管体から引張試験片を切り出して引張強度を確認することができるが、FRPM は複合材料であるためダンベル型試験片の切り出しによる引張試験が難しく、その代替としてノルリング引張試験を実施する。基準強度を確認するとともに、試験速度を変化させて材料強度の速度依存性についても検証を行う。

試験対象は FRPM であるが、均質材料の PVC でも実施し、ダンベル試験片の結果と比較することで試験方法の妥当性を確認する。

また、PVC と FRPM については管に内水圧を負荷して破壊する際の材料強度を確認するとともに、内圧試験用の供試管と同じ原管から試験片を切り出したノルリング引張試験と結果を比較することで、内圧による引張特性を比較的簡易に再現できる試験方法の評価を行う。

2.2) ノルリング引張試験

(1) 試験方法

ノルリングを用いた引張試験は、JIS K 7037「プラスチック配管系—ガラス繊維熱硬化性プラスチック (GRP) 管—見掛けの初期周方向引張強さの求め方」(ISO8521 を基とする) の B 法にしたがい、図 3.2.1 に示す分割板を用いた試験方法用のリングを切り出して実施した。

試験は JIS K 7037 に示された下記の条件で実施した。

- ① 荷重負荷後 1 分から 3 分の間に破壊が生じるように分割板を一定速度で引き離す。
- ② 分割板の直径は、試験用リングの直径の 98% 以上とする。
- ③ 試験用リングには円周方向に 1 箇所の切欠き (ノッチ) を設ける。

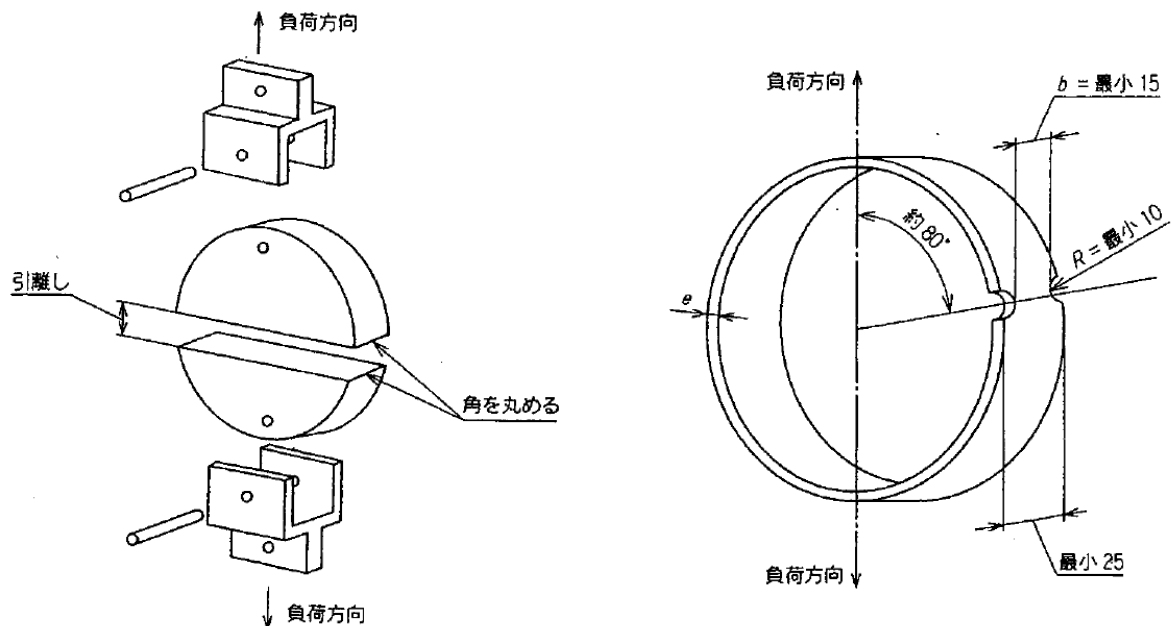


図 3.2.1 試験装置 (分割板) および試験用リングの形状

試験手順と実施状況を図 3.2.3～図 3.2.11 に示す。



図 3.2.3 $\phi 450$ PVC リングを分割板にセット



図 3.2.4 試験用リング準備完了

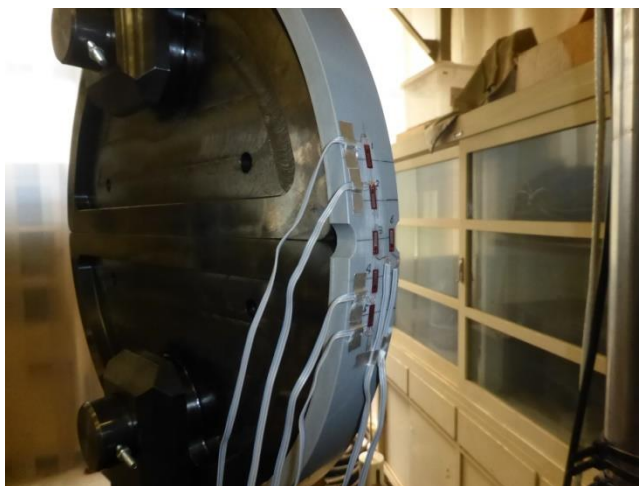


図 3.2.5 試験 No.PVC-N1（ノッチ 90° 位置）の設置状況



図 3.2.6 試験 No.PVC-N1（ノッチ 90° 位置）の破断状況

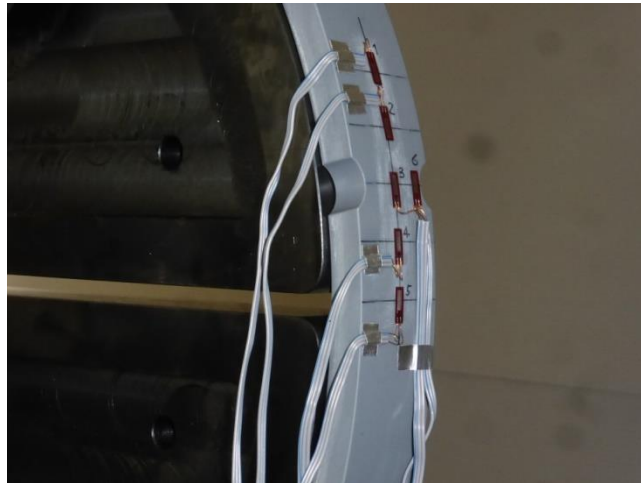


図 3.2.7 試験 No.PVC-N2（ノッチ 80° 位置）の設置状況

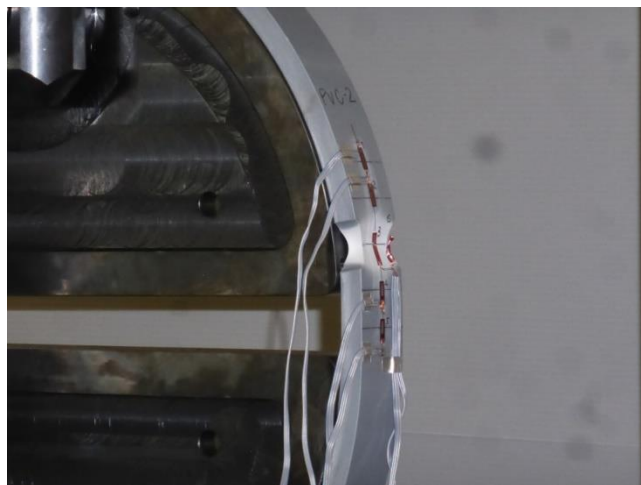


図 3.2.8 試験 No.PVC-N2（ノッチ 80° 位置）の破断直前の状況



図 3.2.9 試験 No.FRPM-N1（ノッチ 80° 位置）の設置状況

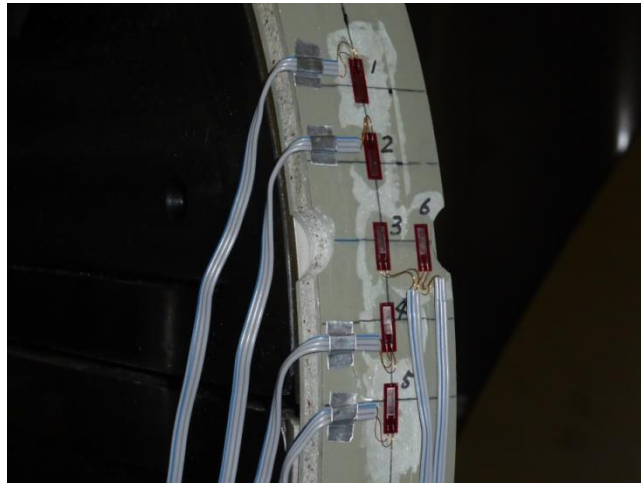


図 3.2.10 試験 No.FRPM-N1 のノッチ部分



図 3.2.11 試験 No.FRPM-N1 の破断後の状況

(4) 試験結果

試験結果の一覧を表 3.2.2 に示す。

表 3.2.2 ノルリング引張試験結果一覧

管種	試験 No.	ノッチ位置	試験速度 (mm/min)	最大変位 (mm)	引張強度 (MPa)	最大応力までの 時間 (hr)	ノッチ中心の ひずみ (μ)	備考
PVC	PVC-N1	90°	5.0	17.44	53.43	0.05053	21005	
	PVC-N2	80°	5.0	18.78	54.86	0.05443	37271	
	PVC-N3	80°	0.5	17.01	49.81	0.51667	36475	
	PVC-N4	80°	0.05	17.23	46.27	4.87667	36787	
	PVC-N5	80°	1.5	19.72	57.71	0.18911	42578	
	PVC-N6	80°	0.01	17.76	48.65	26.10	32234	
FRPM	FRPM-N1	80°	10	12.41	143.15	0.01612	18433	
	FRPM-N2	80°	1.0	9.35	116.15	0.1305	17161	
	FRPM-N3	80°	0.1	10.02	112.87	1.21167	14977	
	FRPM-N4	80°	0.01	9.22	115.84	12.75	14575	
	FRPM-N5	80°	1.0	12.80	128.22	0.15333	14304	
	FRPM-N6	80°	0.01	8.43	97.31	11.55	12624	

①PVC の場合

試験 No.PVC-N1 から PVC-N6 について、分割板を一定速度で垂直方向に引き離すときの引張変位と発生応力、最大応力までの時間、発生ひずみの関係を整理して、図 3.2.14～図 3.2.19 に示す。

引張変位と応力の関係図を見ると、いずれのケースも変位が 3mm 前後のときに荷重が作用し始めている。これは分割板と試験用リングに初期の隙間があるためである。荷重負荷開始時から最大荷重までの変位を試験速度で除し、最大応力までの時間とした。

PVC-N1 および PVC-N2 は標準の条件と考えた試験速度 5mm/min で実施したが、荷重作用時から最大応力に達するまでの変位は約 15mm (=3min) であり、JIS 規定の試験条件をほぼ満足している。

PVC-N1 および PVC-N2 より、ノッチ断面の引張強度はノッチの試験位置が変わっても 53.43MPa、54.86MPa と同等の値を示している。また、試験用リングと同一の原管から採取した供試管の内圧試験から求めた引張強度は 43.96MPa であり、その比は 1.23 となる。内圧負荷試験とひずみ速度の近い PVC-N5 では 57.71MPa であり、内圧試験の値との比は 1.31 となる。

なお、両者のノッチ周辺の円周方向ひずみを比較すると、いずれも引張初期には 90° (真横) の管外面に圧縮ひずみを生じており、曲げの影響が認められる。ノッチ部(破断部)は曲げの影響を受けにくい 80° 位置(PVC-N2)がよいと判断される。これは JIS K 7037 に示された位置であり、以降の試験はすべてノッチ部を 80° 位置として実施した。

さらに、呼び径 600PVC (VU) から切り出したダンベル型試験片の引張強度 (52～53MPa) と同等の値を示している。

試験速度を 0.5mm/min、0.05mm/min と遅くするにしたがって引張強度は漸減し、この傾向もダンベル型試験片の場合と整合している。

②FRPM の場合

試験 No.FRPM-N1 から FRPM-N6 について、分割板を一定速度で垂直方向に引き離すときの引張変位と発生応力、発生ひずみの関係を整理して図 3.2.20～図 3.2.25 に示す。

PVC と同様、分割板と試験用リングに初期の隙間があるため、いずれのケースも引張変位が 2mm ～4mm を超えたあたりで荷重が作用し始めている。試験用リングの破壊は、瞬間的に荷重がゼロになるものや、ノッチ部の FRP 内層が破断して荷重が低下し、引張を継続すると FRP 外層が剥離して円周方向繊維の配向方向にクラックを生じるように段階的に破断するものもあった。

FRPM-N1 の最大荷重をノッチ断面積で除したみかけの引張強度は 143.15MPa となり、内圧試験から求めたみかけの値 (114.57MPa) との比は 1.25 となる。内圧負荷試験とひずみ速度が近い条件 (FRPM-N2 および FRPM-N5 の平均値) では 122.19MPa であり、内圧試験の値との比は 1.07 となる。

試験速度を 1/10 ずつ遅くすると最大変位、引張強度とも低下傾向を示している。

(5) 引張強度の速度依存性

表 3.2.2 より、ダンベル型試験片と同様の手法を用いて試験用リングが破壊に至るまでの時間に着目し、引張強度の速度依存性を確認する。

荷重負荷開始から破壊（最大応力）までの変位量を試験速度で除した値を「最大応力までの時間」とし、引張強度との関係を両対数でプロットして図 3.2.12～図 3.2.13 に示す。図中には JIS K 7020 の方法 A にしたがって求めた回帰直線を重ねて示す。

材料引張試験と比べると相関係数が小さく、バラツキの影響を考慮すると試験個数を増やす必要があると思われるが、ダンベル試験片と同様に試験速度が遅くなると引張強度が低下する傾向がみられる。

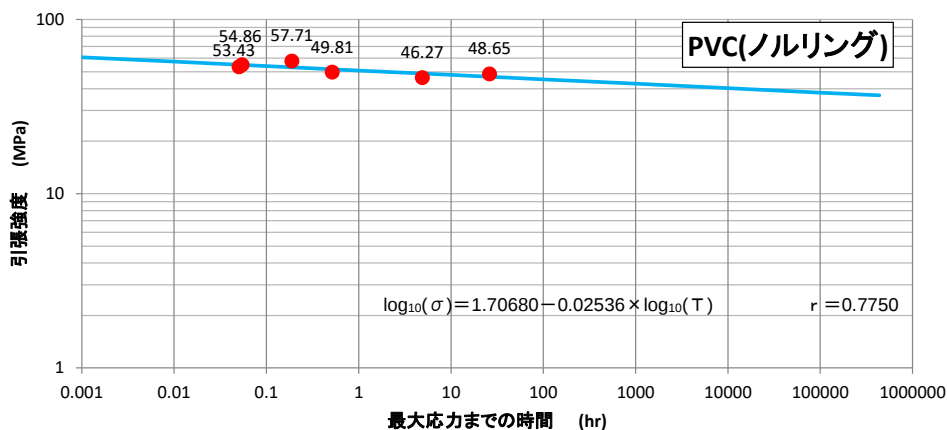


図 3.2.12 PVC のノルリング引張試験結果

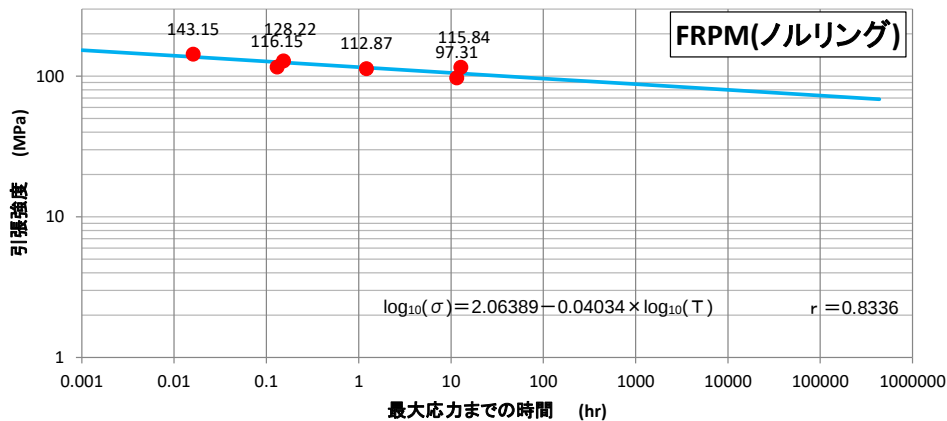


図 3.2.13 FRPM のノルリング引張試験結果

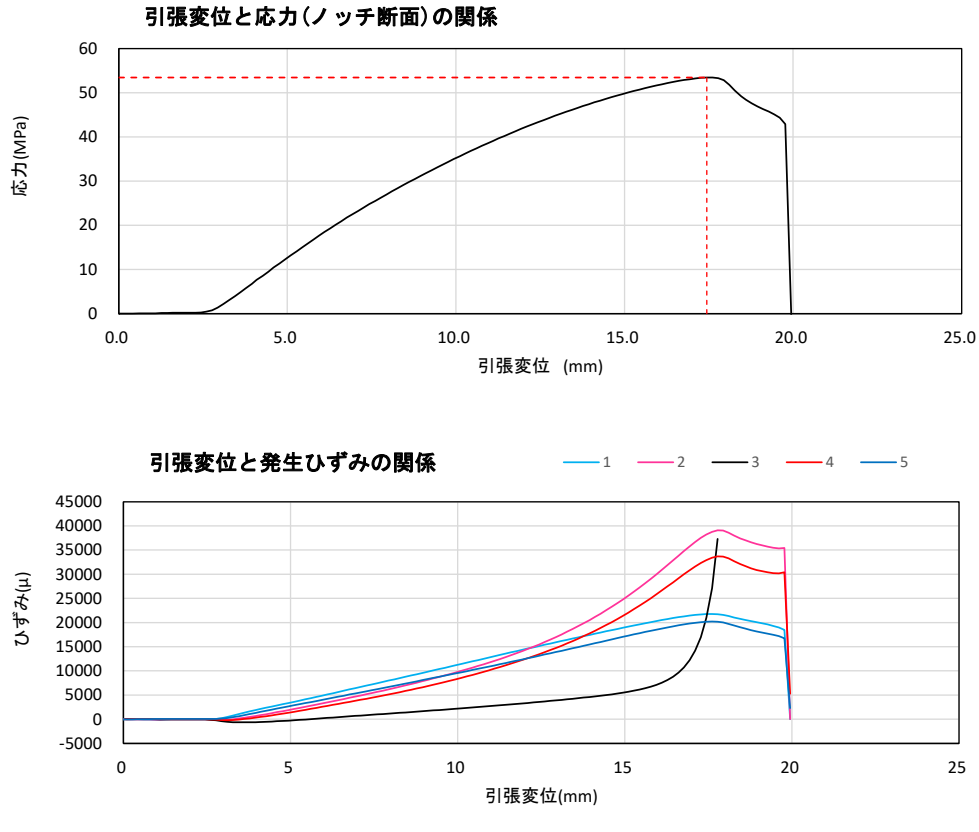


図 3.2.14 PVC-N1 (5mm/min) の引張変位と発生応力・ひずみの関係

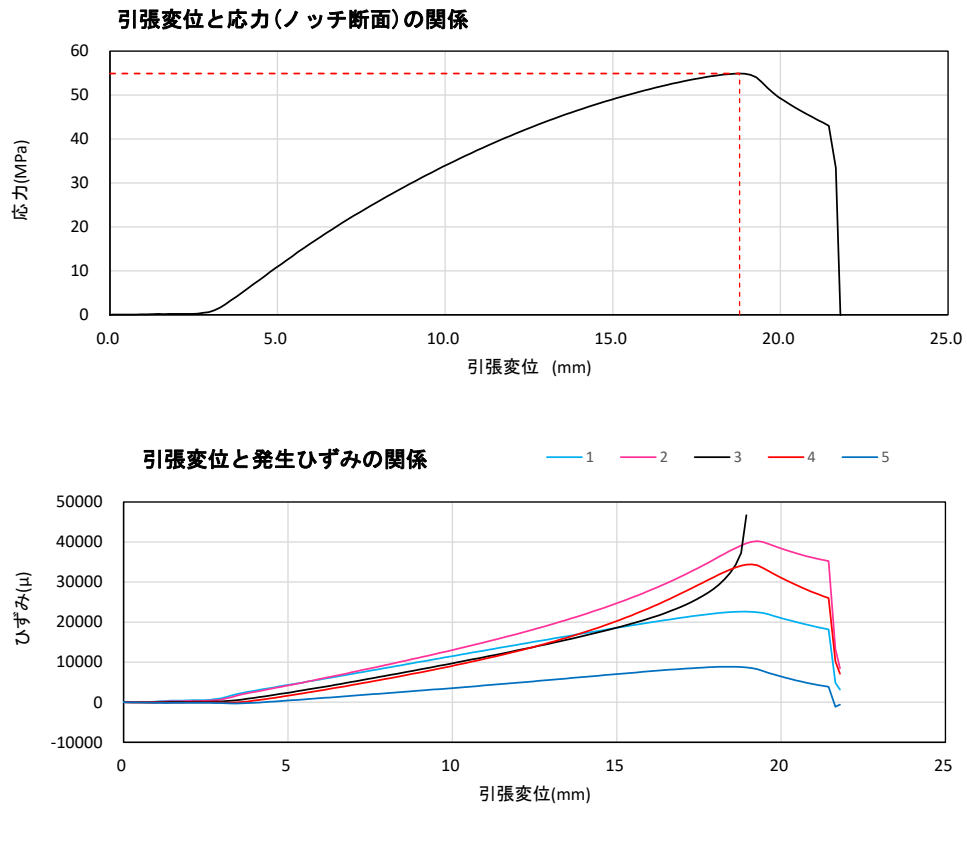


図 3.2.15 PVC-N2 (5mm/min) の引張変位と発生応力・ひずみの関係

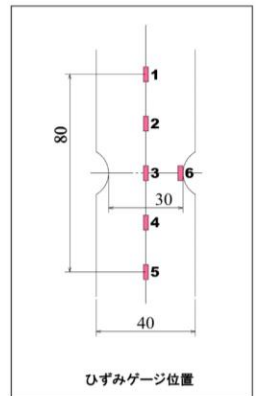
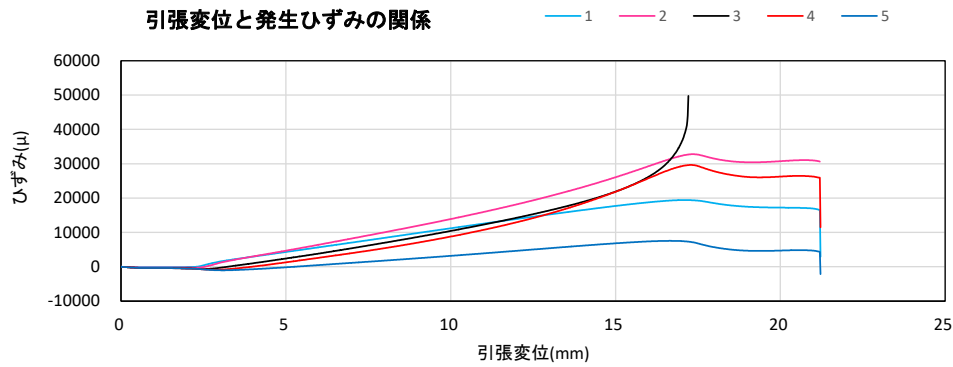
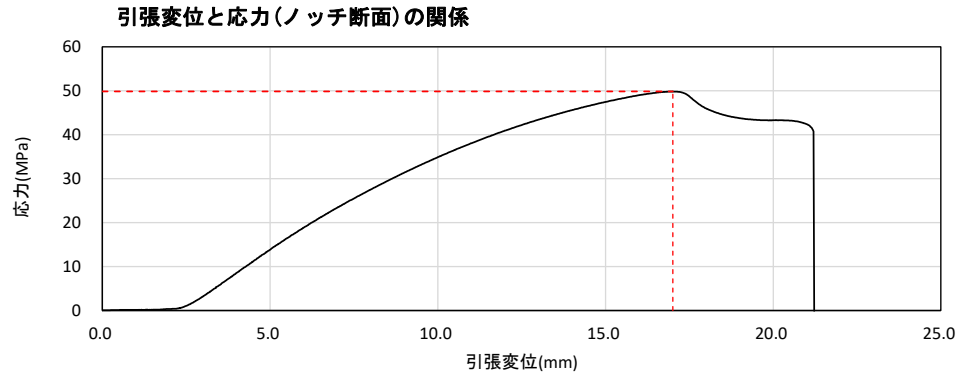


図 3.2.16 PVC-N3 (0.5mm/min) の引張変位と発生応力・ひずみの関係

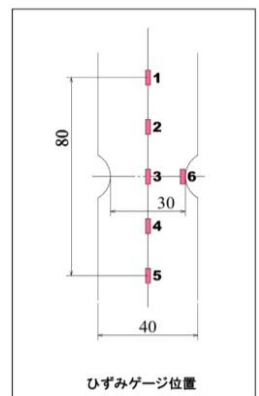
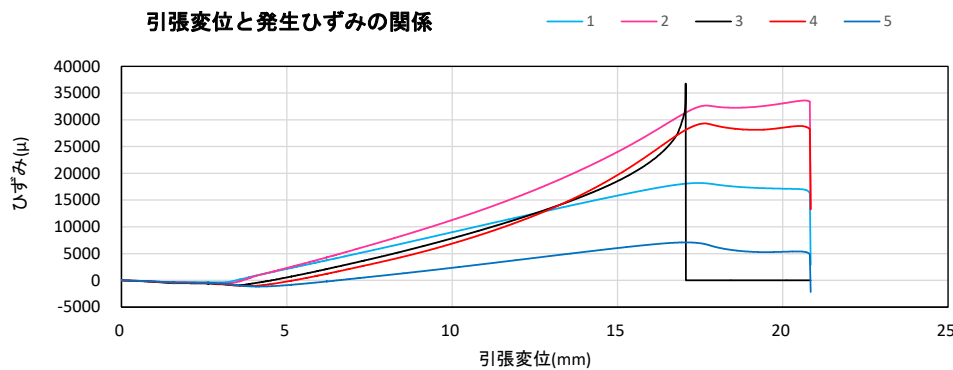
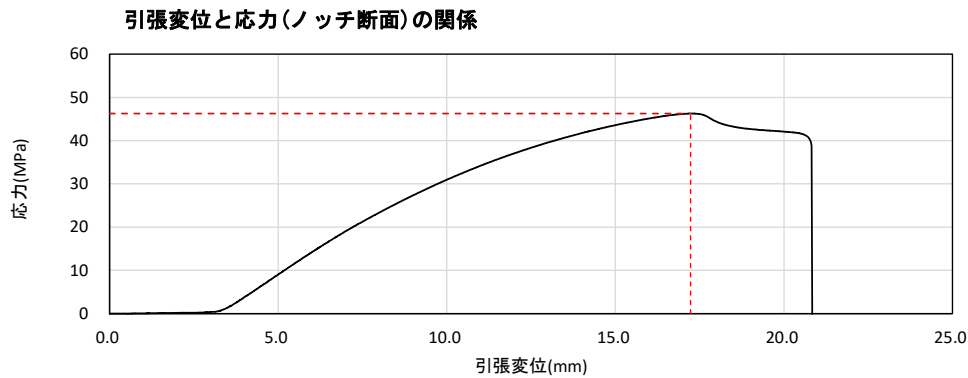


図 3.2.17 PVC-N4 (0.05mm/min) の引張変位と発生応力・ひずみの関係

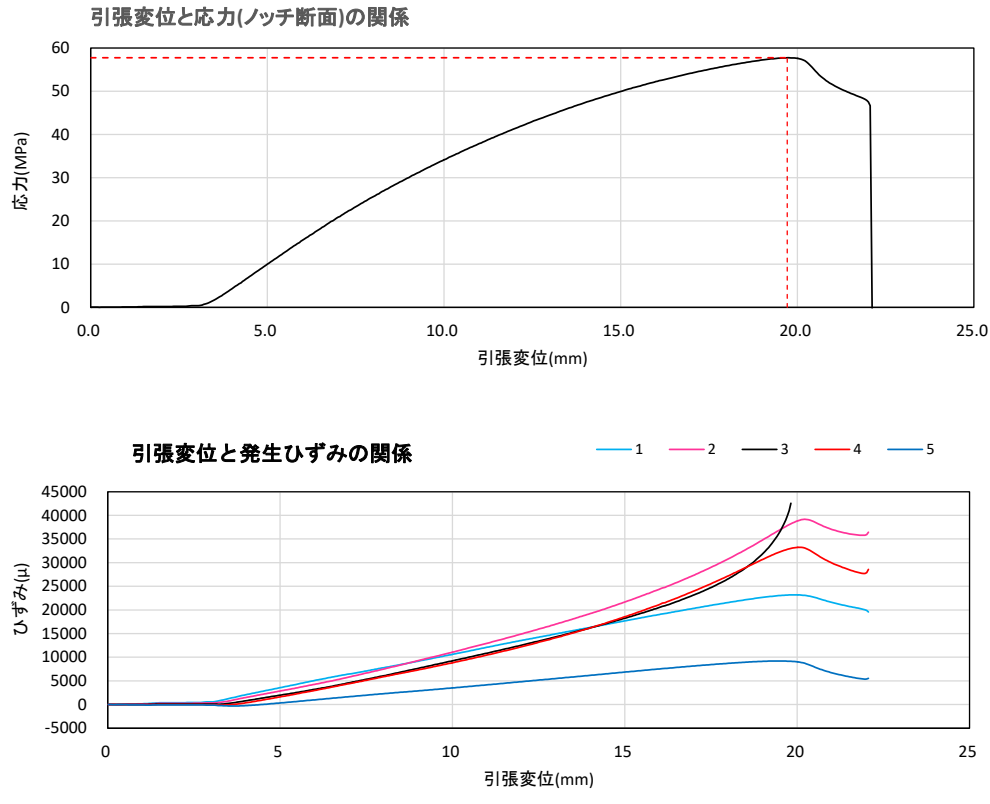


図 3.2.18 PVC-N5 (1.5mm/min) の引張変位と発生応力・ひずみの関係

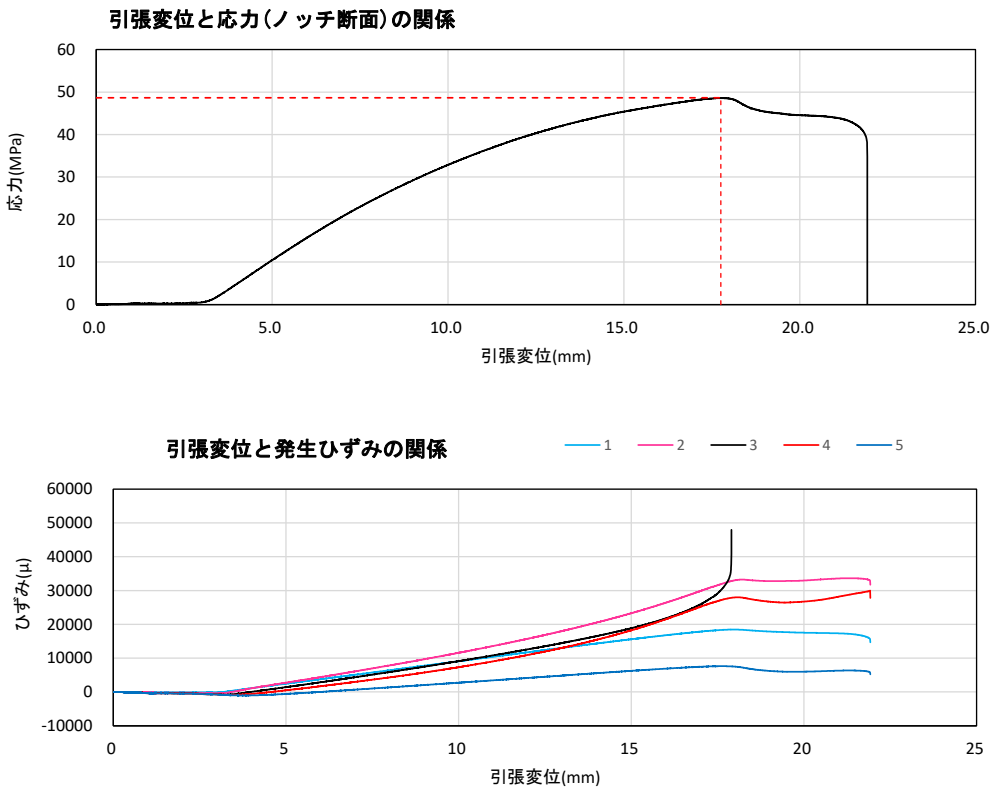


図 3.2.19 PVC-N6 (0.01mm/min) の引張変位と発生応力・ひずみの関係

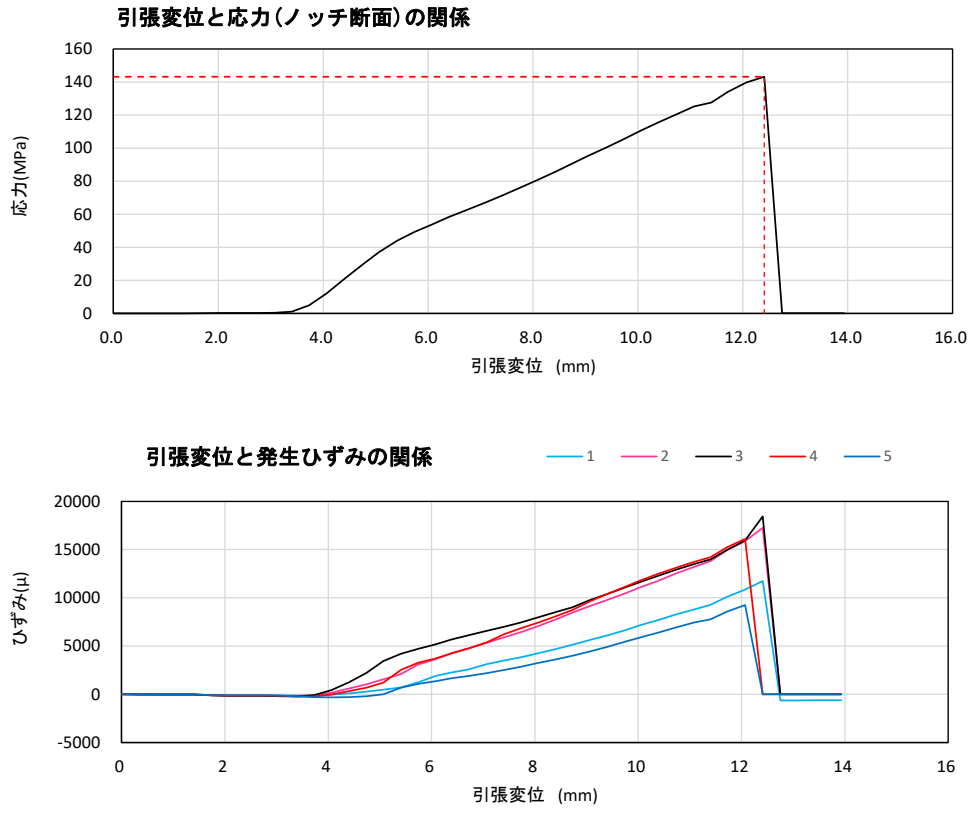


図 3.2.20 FRPM-N1 (10mm/min) の引張変位と発生応力・ひずみの関係

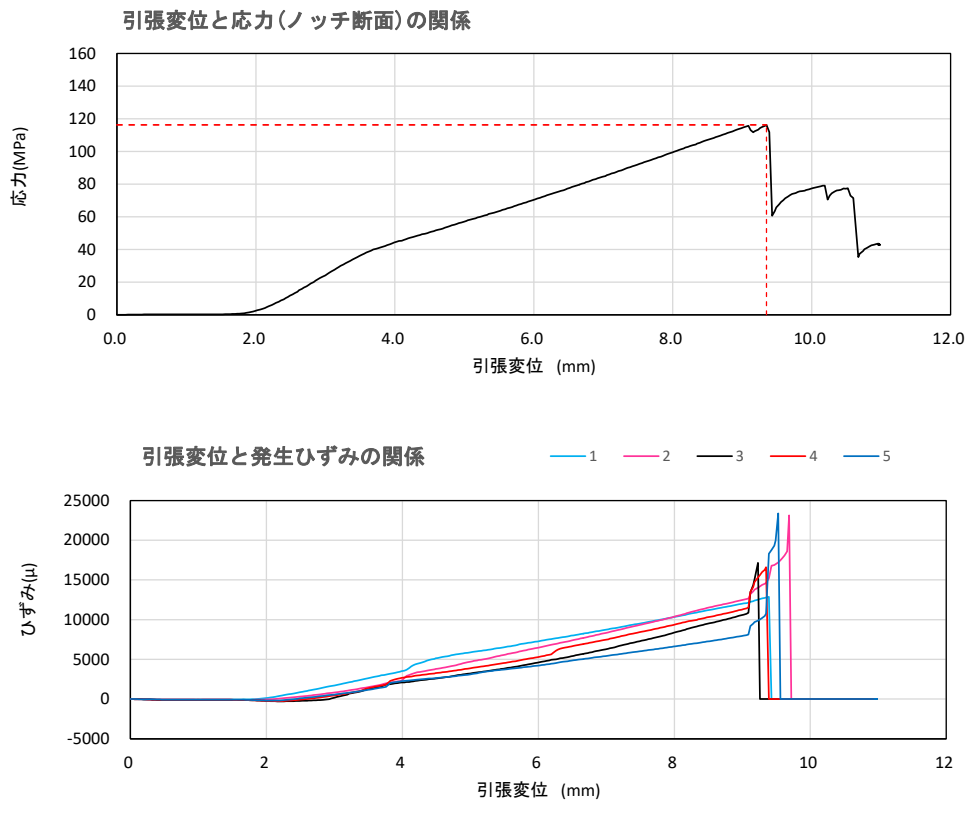


図 3.2.21 FRPM-N2 (1.0mm/min) の引張変位と発生応力・ひずみの関係

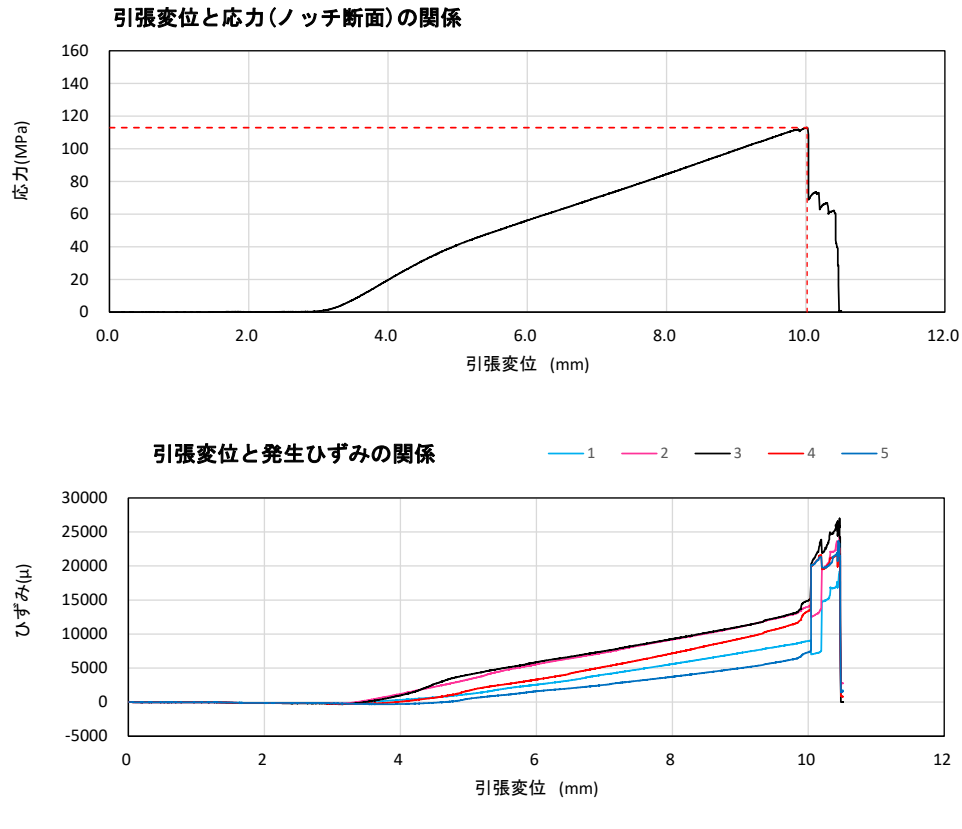


図 3.2.22 FRPM-N3 (0.1mm/min) の引張変位と発生応力・ひずみの関係

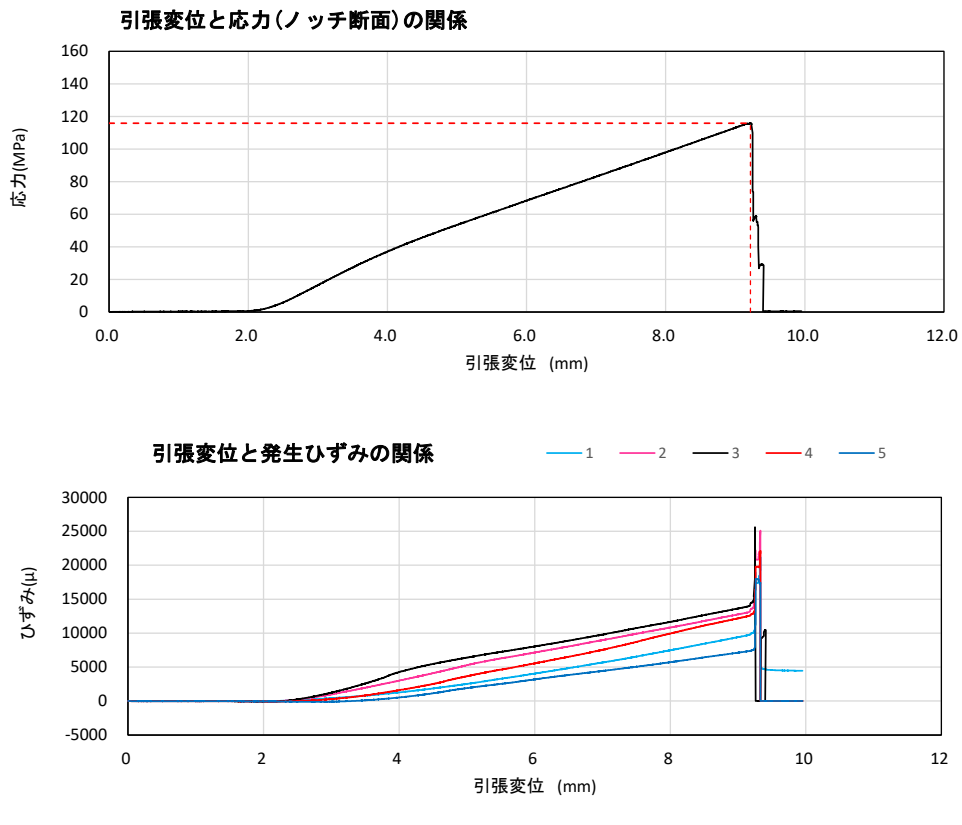


図 3.2.23 FRPM-N4 (0.01mm/min) の引張変位と発生応力・ひずみの関係

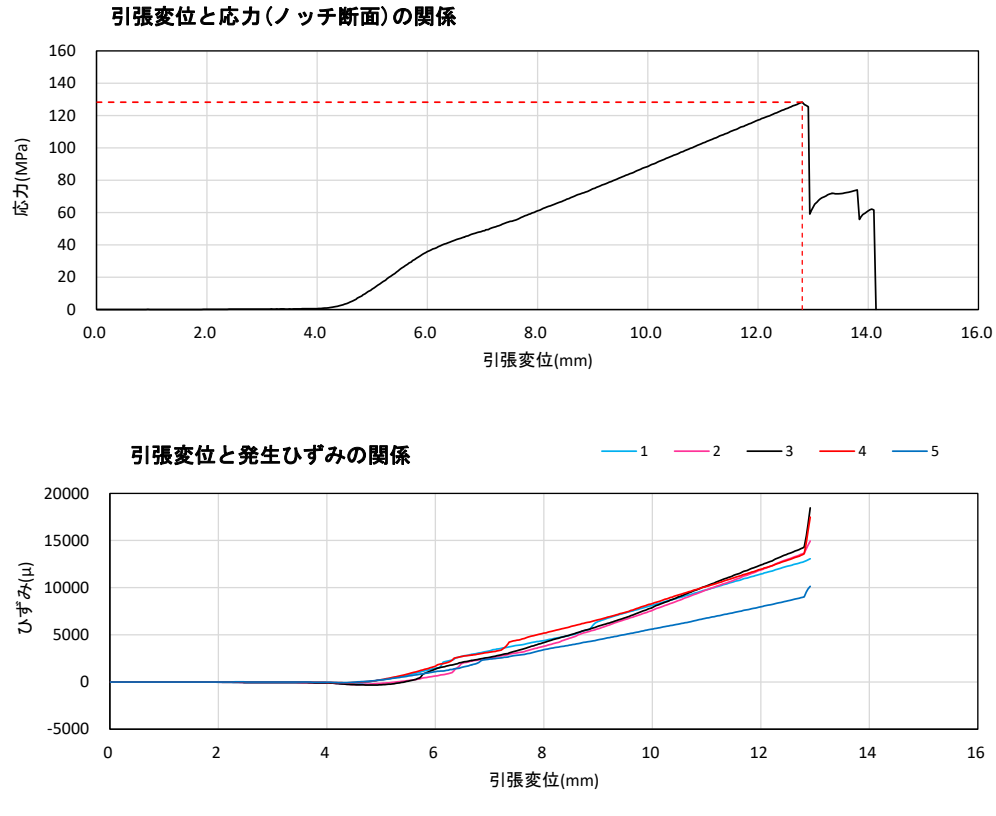


図 3.2.24 FRPM-N5 (1.0mm/min) の引張変位と発生応力・ひずみの関係

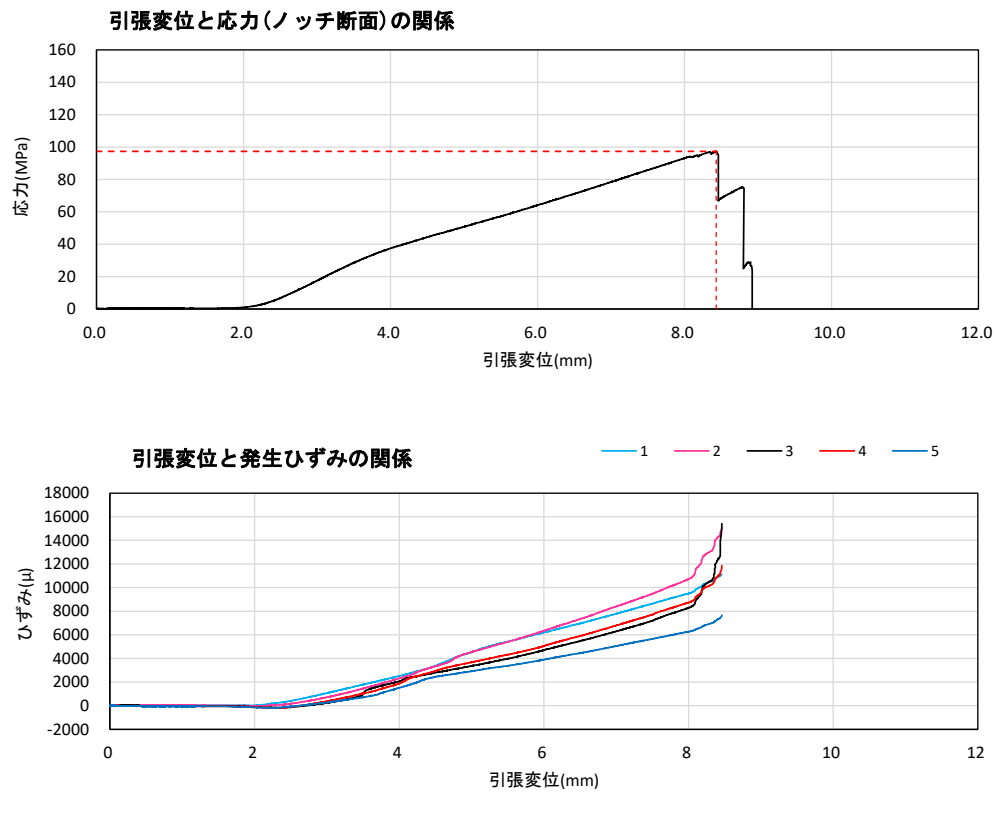


図 3.2.25 FRPM-N6 (0.01mm/min) の引張変位と発生応力・ひずみの関係

(2) 供試管

呼び径 450PVC 管 (VU) および呼び径 450FRPM 管 (内圧 3 種) を供試管とし、供試管の寸法を表 3.3.1 に示す。

表 3.3.1 供試管の寸法

管種	管外径 (mm)	平均管厚 (mm)	管厚中心直径 (mm)	管長 (mm)	備考
PVC	469.4	13.53	455.9	1499.6	
FRPM	472.8	12.07	460.7	1507.5	

供試管の中央断面 16 等分点に円周方向ひずみゲージを貼付した。
試験装置にセットした供試管を図 3.3.3、図 3.3.4 に示す。



図 3.3.3 呼び径 450PVC 管(VU)



図 3.3.4 呼び径 450FRPM 管(内圧 3 種)

(3) 試験結果

試験結果を要約して表 3.3.2 に示す。

表 3.3.2 内圧負荷試験結果概要

管種	概要	備考
PVC	試験開始から約 10 分後、2.61MPa まで加圧した時点で管中央部が膨らみ始め、体積増加により圧力上昇が困難な状態に。 ポンプ給水を継続するも 1.96MPa まで徐々に減圧し、試験開始から 26 分後に管側部の微小亀裂から漏水発生。	
FRPM	試験開始から 13 分後に 5.94MPa に到達、6.0MPa 前後を保持するも異状なし、30 分後に除圧。 2 回目の 6.0MPa 昇圧、5 分保持。1 箇所で発汗発生。 3 回目の 6.0MPa 昇圧。5 分保持。2 回目から変化なし。 4 回目の 6.0MPa 昇圧、5 分保持中に止水蓋近くの管底部から破断。	

破壊（漏水）直後の供試管を図 3.3.5、図 3.3.6 に示す。



図 3.3.5 呼び径 450PVC 管(VU)漏水状況



図 3.3.6 呼び径 450FRPM 管(内圧 3 種)漏水状況

PVC の負荷水圧と円周方向ひずみ（16 点平均）の時刻歴を図 3.3.7、図 3.3.8 に、試験開始から最大水圧に達するまでの水圧と平均ひずみの関係を図 3.3.9 に示す。

なお、図中の赤丸印はひずみ速度を求める区間を示す。

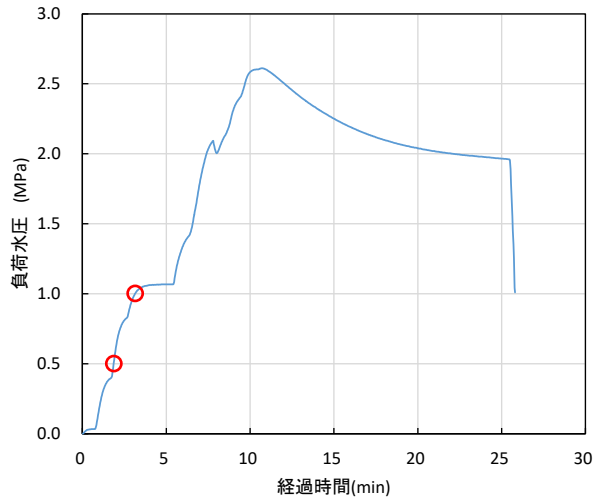


図 3.3.7 PVC 管の負荷水圧

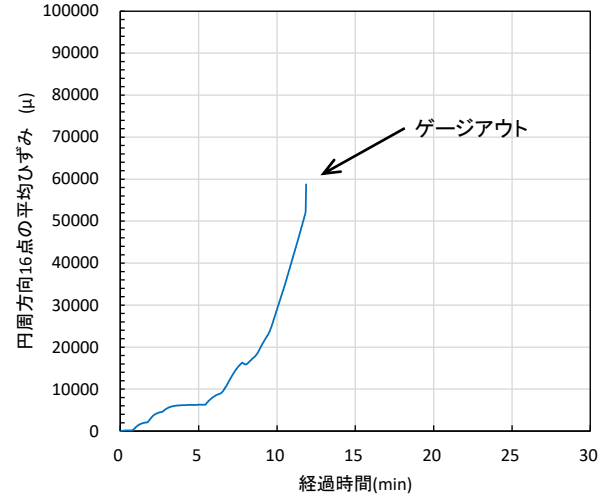


図 3.3.8 PVC 管の平均ひずみ

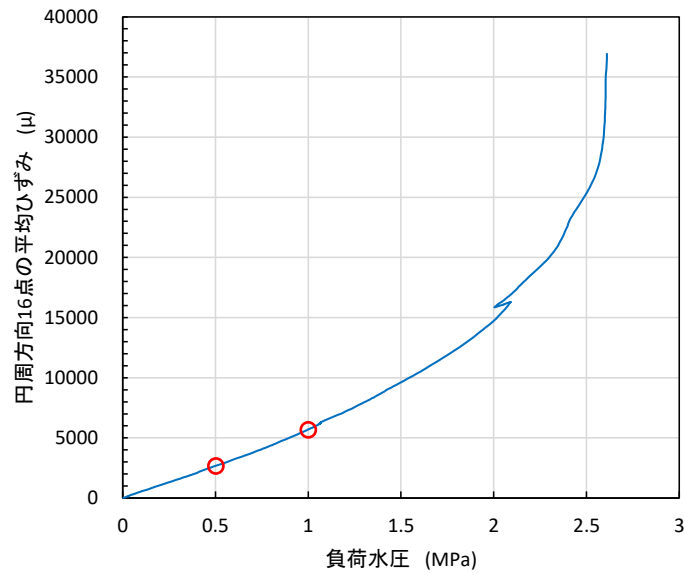


図 3.3.9 負荷水圧と平均ひずみの関係

FRPM の負荷水圧と円周方向ひずみ（16 点平均）の時刻歴を図 3.3.10、図 3.3.11 に、最初の水圧負荷と平均ひずみの関係を図 3.3.12 に示す。

なお、図中の赤丸印はひずみ速度を求める区間を示す。

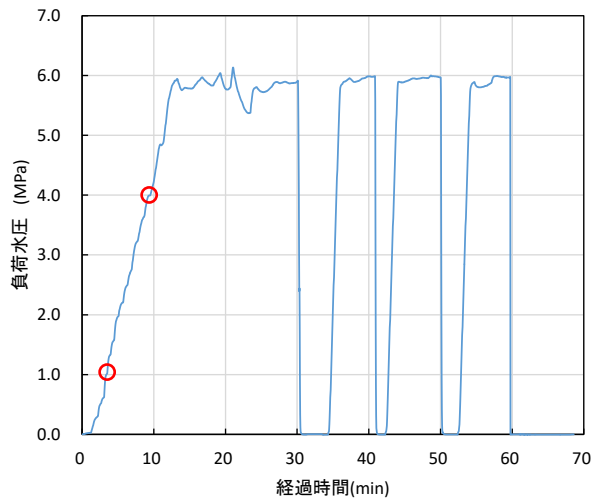


図 3.3.10 FRPM 管の負荷水圧

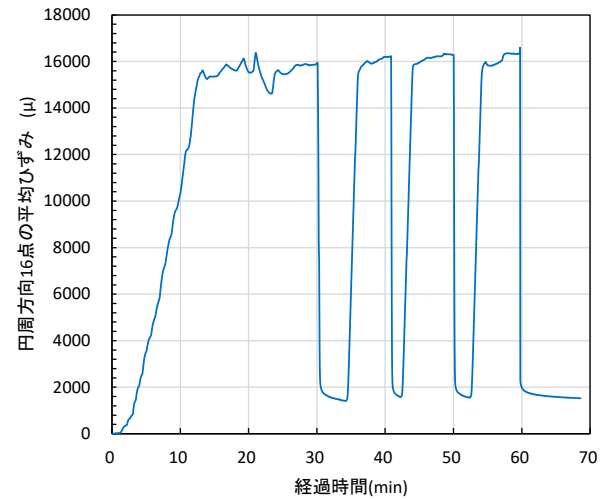


図 3.3.11 FRPM 管の平均ひずみ

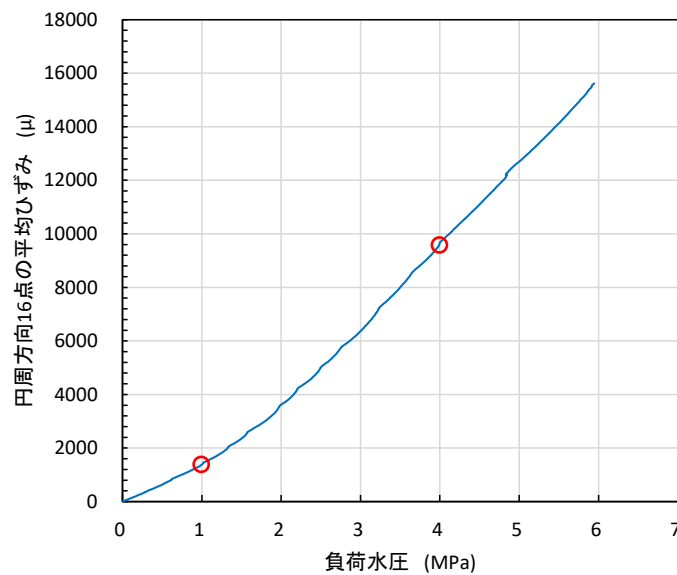


図 3.3.12 負荷水圧と平均ひずみの関係

①PVC の内圧負荷による引張強度

管が変形を生じる前の最高内圧 2.61MPa をもとに、PVC の引張強度を下式により求める。

$$\sigma = \frac{P \cdot (D - t)}{2 \cdot t} = \frac{2.61 \times (469.4 - 13.53)}{2 \times 13.53} = 43.96 \quad (\text{MPa})$$

設計基準に記載された強度(短期)の 45MPa とほぼ合致する。

②FRPM の内圧負荷による引張強度

繰り返し 4 回の内圧負荷で破壊を生じた 6.0MPa と平均管厚をもとに、FRPM のみかけの引張強度を下式により求める。

$$\sigma = \frac{P \cdot (D - t)}{2 \cdot t} = \frac{6.0 \times (472.8 - 12.07)}{2 \times 12.07} = 114.57 \quad (\text{MPa})$$

今回の試験では、試験装置の上限水圧が 6.0MPa であり、これ以上を負荷できなかったため、繰り返し負荷により破壊した。もし破壊まで単調負荷していれば 6.0MPa よりも高い水圧で破壊していたと考えられ、上記のみかけの引張強度は若干小さめの値と推定される。

(4) ひずみ速度

図 3.3.9 および図 3.3.12 について、負荷水圧～円周方向ひずみ線図の初期勾配 (赤丸区間) から、昇圧時のひずみ速度を求める。

PVC 管は 0.5～1.0MPa 区間を、FRPM 管は 1.0～4.0MPa 区間を考え、時間増分から求めたひずみ速度を表 3.3.3 に示す。

表 3.3.3 内圧負荷試験のひずみ速度

		負荷水圧 (MPa)	16 点平均ひずみ (μ)	時間
PVC 管	始点	0.502	2676	10 : 52 : 43
	終点	1.005	5729	10 : 54 : 01
	増分	0.503	① 3053	② 00 : 01 : 18
	ひずみ速度	①/② = 2348 μ /min		
FRPM 管	始点	1.003	1395	15 : 18 : 16
	終点	4.004	9691	15 : 24 : 24
	増分	3.001	① 8296	② 00 : 06 : 08
	ひずみ速度	①/② = 1353 μ /min		

一方、ノルリング引張試験のノッチ中央部のひずみ (#3) に着目して求めたひずみ速度は、表 3.3.4 のとおりである。

表 3.3.4 ノルリング引張試験のひずみ速度

試験No.	引張速度	垂直変位 (mm)	ひずみ (ノッチ中心)	時間 (min)
PVC-N1	5mm/min (ノッチ90°)	4.94	-290	
		15.1	5672	
		①変位増分	②ひずみ増分	③時間増分
		10.16	5962	2.032
		②/③=	ひずみ速度	2934 μ /min
PVC-N2	5mm/min (ノッチ80°)	4.93	2290	
		14.94	18478	
		①変位増分	②ひずみ増分	③時間増分
		10.01	16188	2.002
		②/③=	ひずみ速度	8086 μ /min
PVC-N3	0.5mm/min (ノッチ80°)	5.01	2397	
		15.01	21901	
		①変位増分	②ひずみ増分	③時間増分
		10	19504	20
		②/③=	ひずみ速度	975 μ /min
PVC-N4	0.05mm/min (ノッチ80°)	5.00	552	
		15.00	18544	
		①変位増分	②ひずみ増分	③時間増分
		10.003	17992	200.06
		②/③=	ひずみ速度	90 μ /min
FRPM-N1	10mm/min (ノッチ80°)	5.07	3454	
		10.06	11673	
		①変位増分	②ひずみ増分	③時間増分
		4.99	8219	0.499
		②/③=	ひずみ速度	16471 μ /min
FRPM-N2	1mm/min (ノッチ80°)	3.99	2092	
		7.99	8337	
		①変位増分	②ひずみ増分	③時間増分
		4	6245	4
		②/③=	ひずみ速度	1561 μ /min
FRPM-N3	0.1mm/min (ノッチ80°)	4	991	
		8	9260	
		①変位増分	②ひずみ増分	③時間増分
		4	8269	40
		②/③=	ひずみ速度	207 μ /min
FRPM-N4	0.01mm/min (ノッチ80°)	4.02	4329	
		8.02	11728	
		①変位増分	②ひずみ増分	③時間増分
		4	7399	400
		②/③=	ひずみ速度	18 μ /min

ノルリング引張試験と内圧負荷試験のひずみ速度を比較する。

PVC の場合、引張速度 5mm/min (PVC-N2) のノルリング引張試験のひずみ速度は、内圧負荷試験の約 3.4 倍であり、ひずみ速度が同等となる引張速度は 1.5mm/min となる。

FRPM の場合、引張速度 10mm/min (FRPM-N1) のノルリング引張試験のひずみ速度は内圧負荷試験の約 12 倍であり、ひずみ速度が同等となる引張速度は 0.8mm/min となる。

ノルリング引張試験と内圧負荷試験から求めた引張強度を一覧して図 3.3.13、図 3.3.14 に示す。

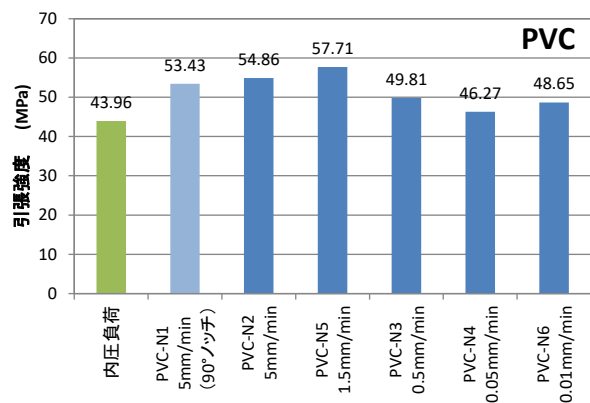


図 3.3.13 PVC の引張強度

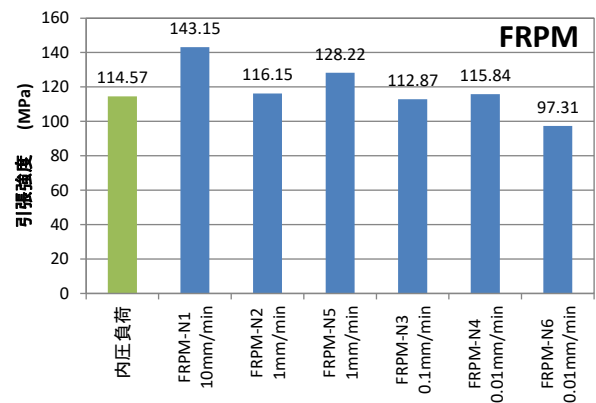


図 3.3.14 FRPM の引張強度

(5) 試験体の物性確認

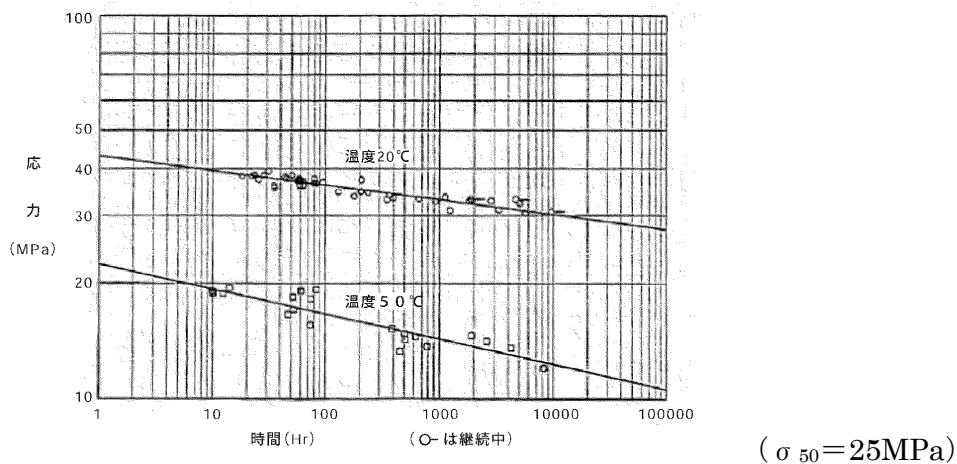
FRPM 管は複合材料であり、管厚が同じであってもガラス繊維等の構成割合によって強度が異なることから、管厚だけでは見かけの強度しか求めることができない。

詳細な材料特性を把握するためには燃焼試験等により、試験体のガラス繊維量の特定が必要である。

3) 長期強度特性のまとめ

3.1) 引張試験の速度依存性

既往の PVC、PE、PE-GF の長期強度試験結果は、図 3.4.1a～図 3.4.1c のとおり。



塩化ビニル管・継手協会(H21.3), 硬質塩化ビニル管の長期寿命の評価について, 内圧クリープ試験結果

図 3.4.1a PVC の内圧クリープ試験結果

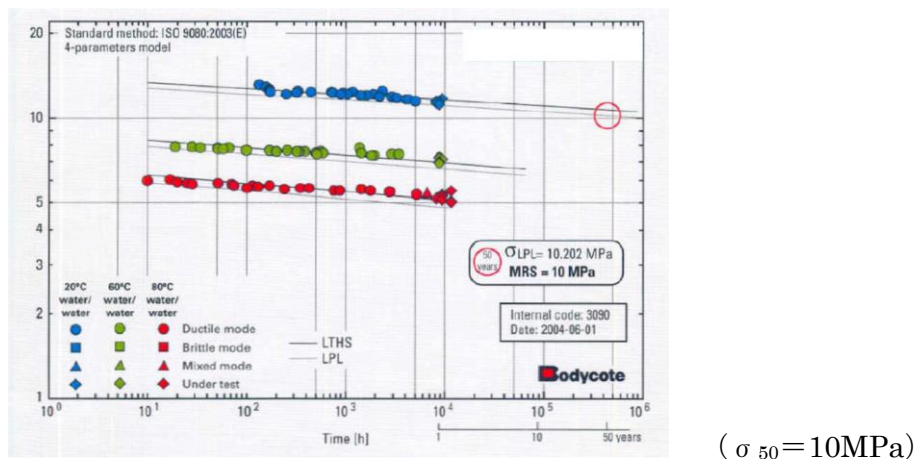
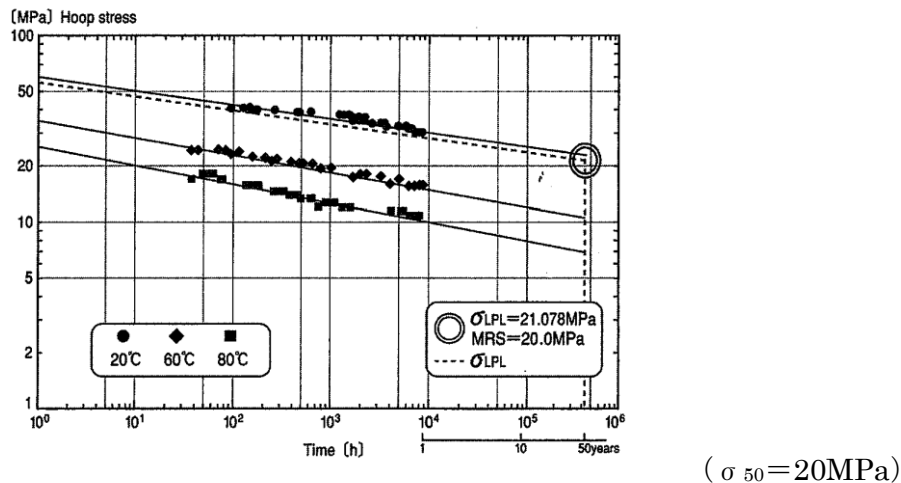


図 3.4.1b PE の熱間内圧クリープ試験結果



JIS K 6799-2 ガラス繊維強化ポリエチレン管システム, 長期熱間内圧クリープ試験結果

図 3.4.1c PE-GF の長期熱間内圧クリープ試験結果

本試験で実施した PVC、PE、PE-GF の引張試験結果を図 3.4.2a～図 3.4.2c に再掲する。

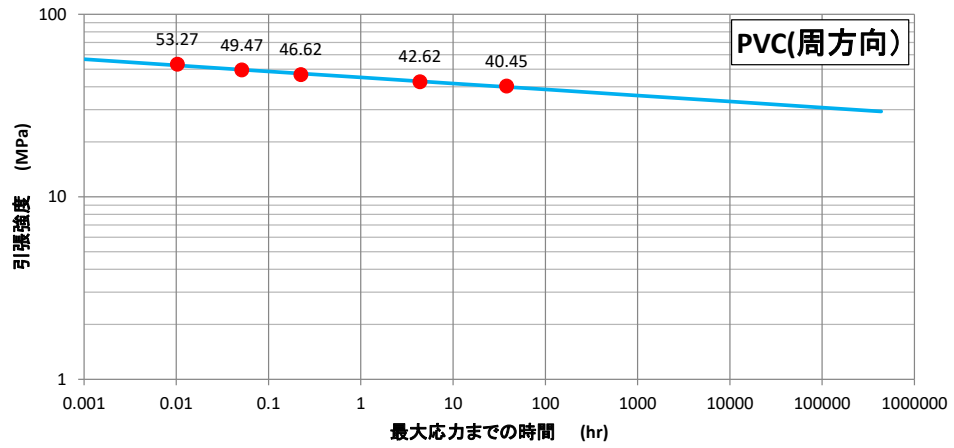


図 3.4.2a PVC の引張試験結果

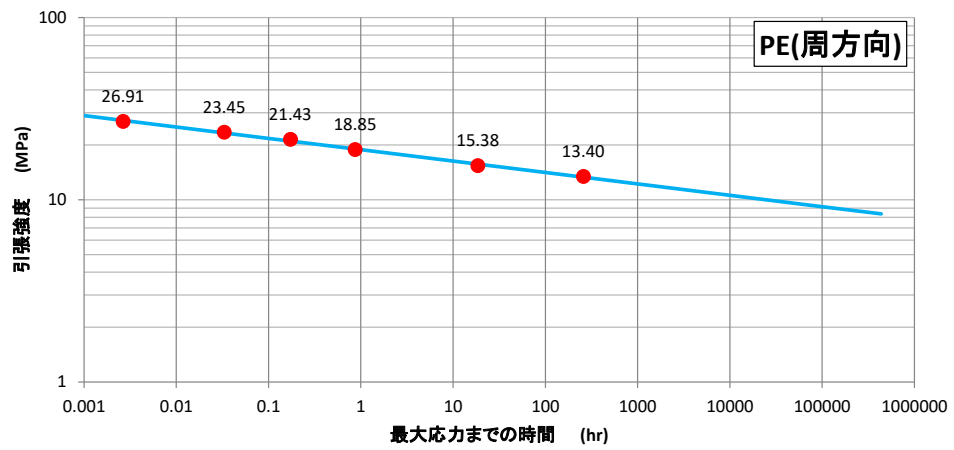


図 3.4.2b PE の引張試験結果

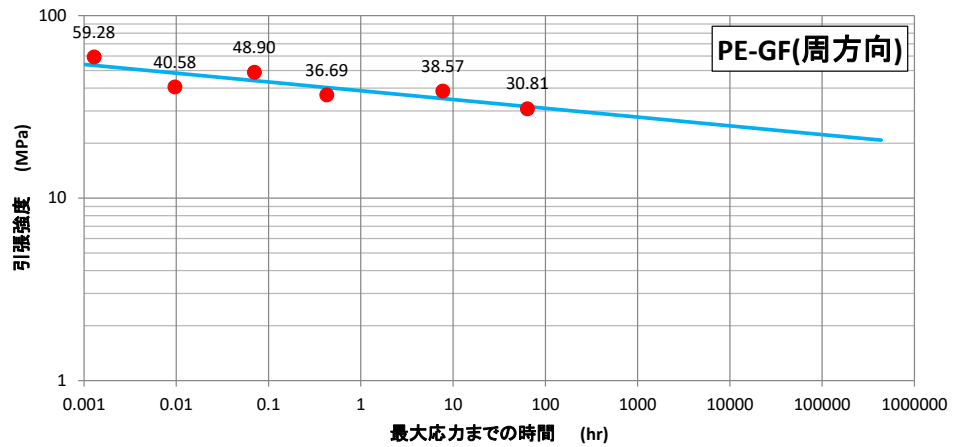


図 3.4.2c PE-GF の引張試験結果

引張速度を変えた引張試験結果を最大応力までの時間と引張強度の関係で整理し、両対数目盛でプロットすると明確な回帰直線が得られる。本試験のデータは熱間内圧クリープ試験では棄却される短い時間帯の値であるが、外挿して求められた各管材の 50 年後の強度は、おおむね既往のデータと同程度の値を示している。

2 種類の強度試験の結果から長期性能の変化は、試験方法による差異はあるものの、極めて調和的であり材料の本質的な特性を捉えている。

引張試験における変位速度を変えた試験は、長期性能の影響と考えられる特性が見られ、多様な管種・管材の試験データを蓄積することにより、さらに簡便な品質試験方法の開発が期待できる。

3. 2) 試験方法の妥当性

PVC について、ダンベル引張試験、ノルリング引張試験の結果を図 3.5.1、図 3.5.2 に再掲する。ノルリング引張試験はバラツキがやや大きいものの、引張強度は速度依存性が認められ、いずれも熱間内圧クリープ試験から求めた長期強度の 25MPa に近い値が外挿されている。

ノルリング引張試験は、本研究では試験個数が少なく、定量的な評価を行うにはデータの蓄積を進める必要がある。ただ、ひずみ速度が同等の条件で内圧負荷試験と比較すると、引張強度が同程度となり、速度依存性も認められることから、ダンベル引張試験と同様に簡便な試験方法としての可能性があると考ええる。

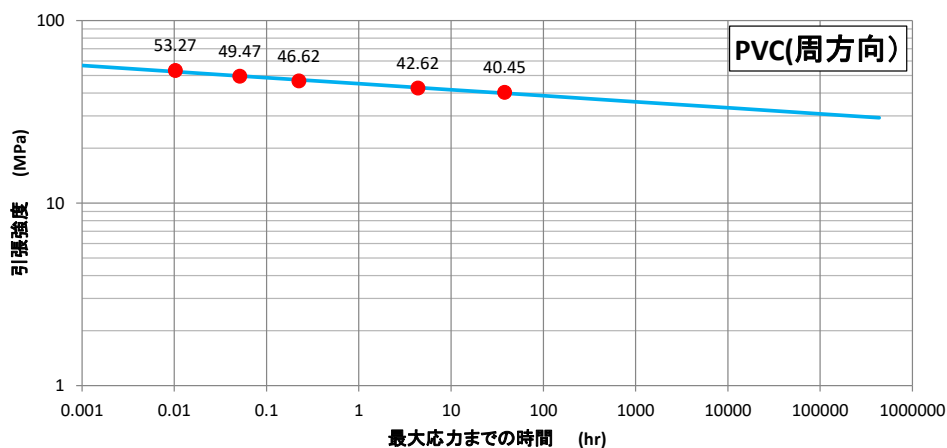


図 3.5.1 PVC のダンベル引張試験結果

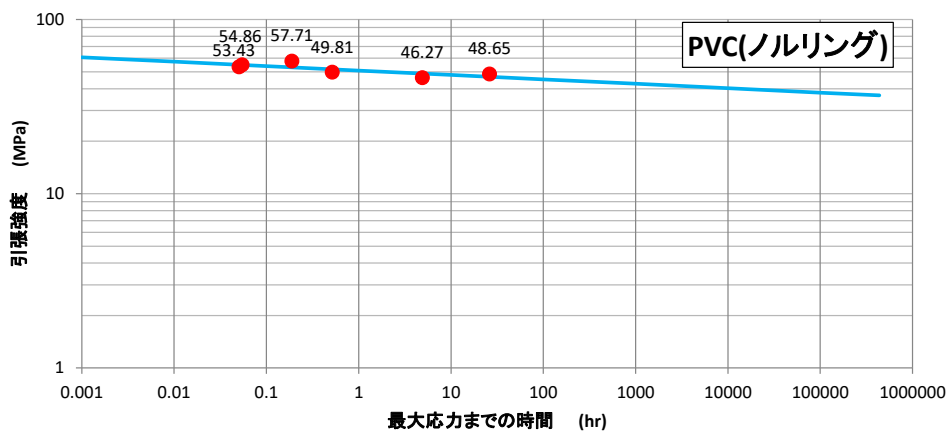


図 3.5.2 PVC のノルリング引張試験結果

(4) 内外圧繰り返し作用時の臨界特性の解明

内外圧複合状態の再現には、土槽内に埋設した供試管に内水圧と上載荷重を負荷する方法などが知られているが、埋め戻し材料の影響が大きく、また試験には多大な労力を要する。そこで、供試管の内外圧負荷状態の性能をより簡便に評価する方法について検討した。

ゴムチューブを用いて供試管に内圧に相当する均等な引張応力を負荷した状態で偏平させる方法、リング状の供試管を引張することで内圧負荷を再現する方法、繰り返し引張荷重を作用する方法、等について検討した。

1) ゴムチューブを用いた繰り返し内圧負荷試験

(1) 試験方法

幅 100mm に切断したリング状の $\phi 350$ PVC を供試管として、内部にゴムチューブをセットし、チューブがリングの幅以上に膨らまないよう SUS 板で両側を拘束する。このとき SUS 板と供試管との間には隙間を設けた。(図 4.1 参照)

3 軸セルを水圧負荷用のシリンダーとして用い、ゴムチューブに注水して内水圧を負荷し、PVC に引張応力を負荷する。内圧負荷と計測のフローを図 4.2 に示す。

供試管の円周方向 4 箇所にはひずみゲージを貼付し、負荷水圧と発生ひずみを計測した。

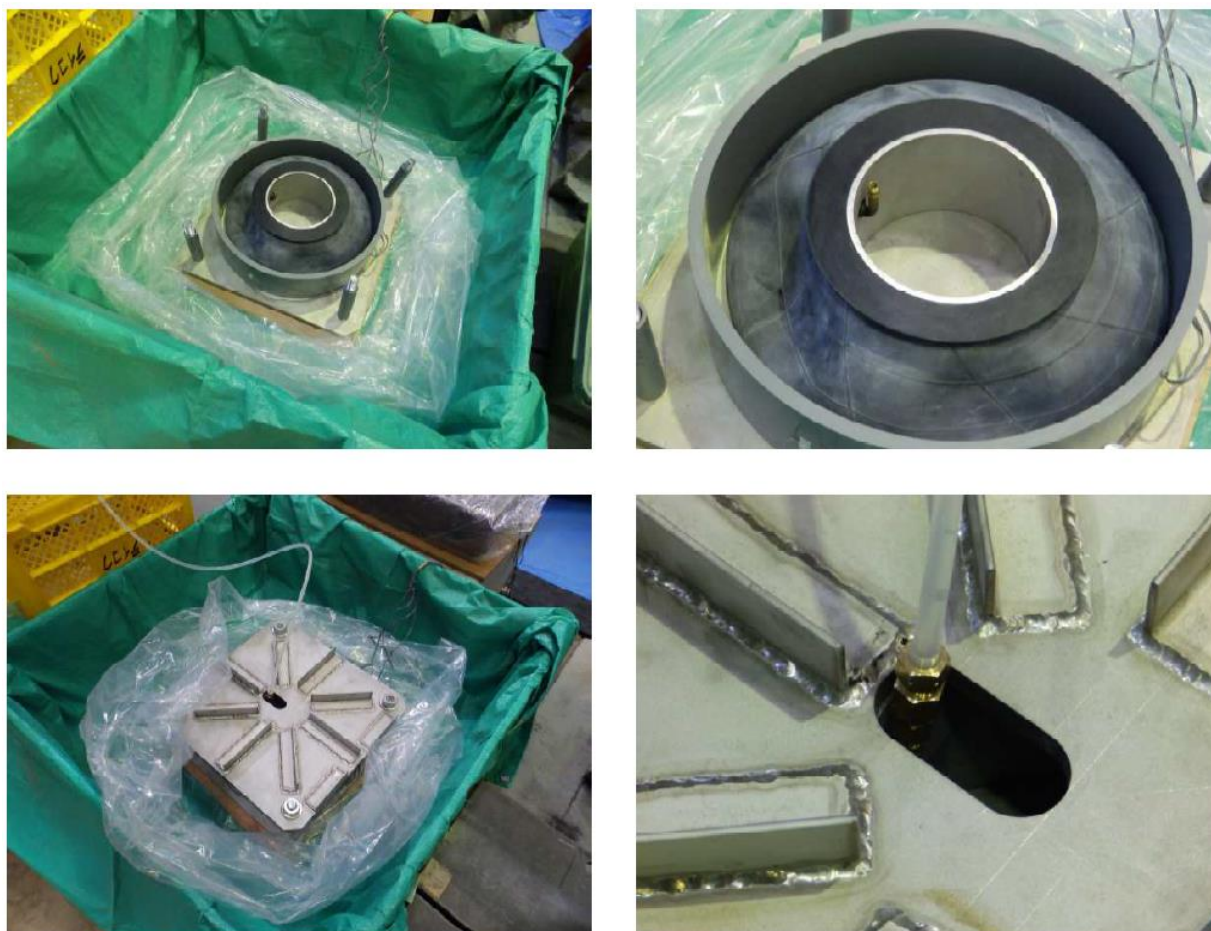


図 4.1 $\phi 350$ PVC 供試管へのゴムチューブ設置状況

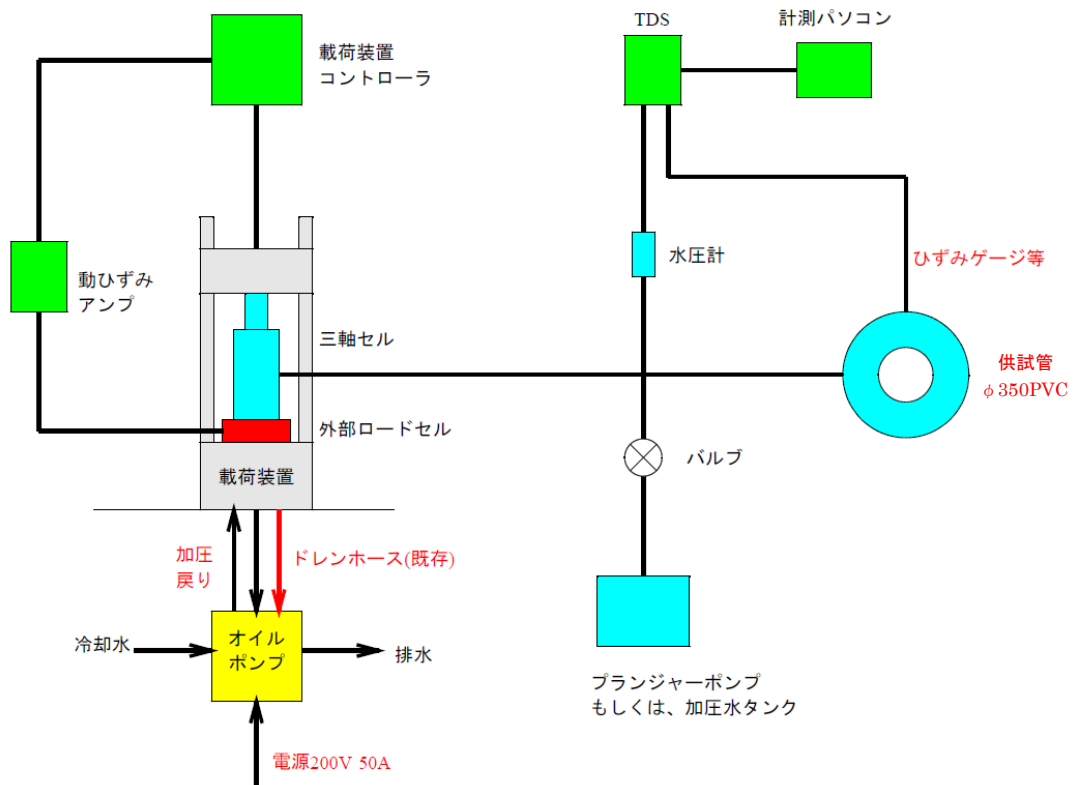


図 4.2 内圧負荷機構および計測システム略図

(2) 試験結果

シリンダーを載荷装置で押し込み、負荷内圧 100kPa ごとに発生ひずみとの関係を計測した。内圧を 1300kPa に昇圧中、内圧負荷用のゴムチューブが破損して漏水したため試験を中止した。内圧と円周方向ひずみの関係を図 4.3 に示す。

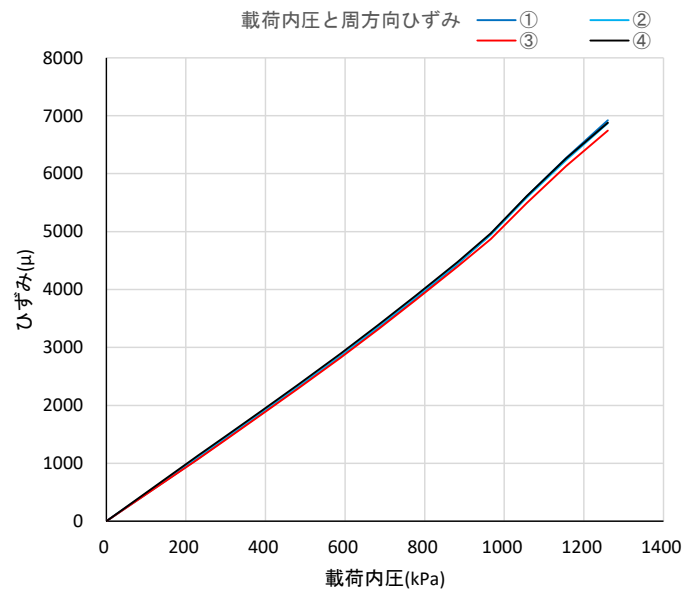


図 4.3 負荷内圧と円周方向ひずみ(4 点)の関係

ここで、円周方向ひずみについて評価する。

φ 350PVC の外径 370mm、厚さ $T=10.5\text{mm}$ 、近似内径 $d=348\text{mm}$ 、ヤング係数 $E=3 \times 10^6 \text{kN/m}^2$ より、

$$\varepsilon = \frac{P \cdot d}{2 \cdot T} / E = \frac{1260 \cdot 0.348}{2 \cdot 0.0105} / 3 \times 10^6 = 0.00696 = 6960\mu$$

図 4.3 より、実測値は円周 4 箇所が均等で、ほぼ計算どおりの引張ひずみを発生していることがわかる。

しかしながら、この試験には下記の課題があることがわかった。

- ・ 供試管を内圧破壊させるには、 $3\text{MPa} \sim 5\text{MPa}$ 以上の水圧負荷が必要であるが、汎用品のゴムチューブは $0.2 \sim 0.3\text{MPa}$ 程度で用いられているため、周囲を拘束した状態であっても常用圧の 10 倍の内圧負荷は難しい。
- ・ ゴムチューブ内に水圧を負荷するためのシリンダーは、呼び径 600 で実施するには大断面のものが必要となる（今回の呼び径 350 では $\phi 80 \times 50\text{mm}$ ）。しかし現有のアクチュエータでは油圧ポンプの吐出量の関係で、高速度での繰り返し負荷が難しい。

2) ノルリングによる周方向引張試験の検討

多くのケースを実施するためには、試験が比較的簡便に行えることが優先事項となる。このことから、ノルリングにより円周方向の引張荷重を負荷する方法を検討する。

管に内圧が作用するときの引張強度を求めるにあたり、供試管に内水圧を負荷する方法と比べて簡易に性能評価できる方法を検討している。

本試験を実施するために参考とした規格は下記のとおりである。

- ・ JIS K 7037 「プラスチック配管系—ガラス強化熱硬化性プラスチック（GRP）管—見掛けの初期周方向引張強さの求め方」
- ・ ASTM D2290-16 「Standard Test Method for Apparent Hoop Tensile Strength of Plastic or Reinforced Plastic Pipe」

（1）試験方法

外圧クリープ試験を実施した 4 管種（ $\phi 600$ ）を対象として、原管から試験片（リング）を切り出し、JIS K 7037 の B 法に準じた図 4.4 の試験装置を用いて供試管の周方向引張試験を行う。

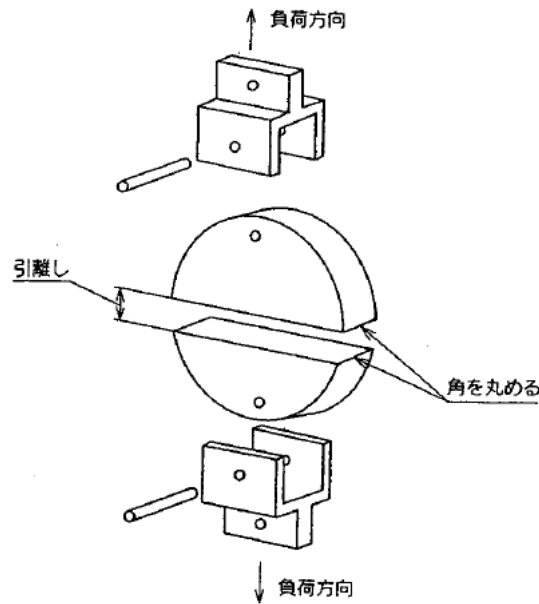


図 4.4 分割板による試験装置

試験手順は下記のとおりである。(試験片に切欠き部を設ける場合はカッコ内を参照)

- ①試験片の断面寸法を（リングの切欠き部の内表面および外表面で測定して平均し）0.1mm の精度で求める。
- ②（切欠き部の位置を考慮して）分割板外周の外側にリングを装着する。
- ③分割板を上下方向に一定速度で引き離し、供試管に引張荷重を負荷する。
- ④荷重負荷過程の変位と荷重を測定する。
 - (a) 供試管を破壊する場合
 - ・荷重負荷後 1 分～3 分で破壊が生じるよう、分割板を一定速度で引張する。
 - ・荷重負荷中の変位と荷重を測定し、破壊までの時間と最大荷重を記録する。（破壊は切欠き部で生じることを確認する）
 - (b) 供試管に繰り返し荷重を負荷する場合
 - ・載荷荷重、載荷速度等の条件を設定し、所定回数の繰り返し荷重を負荷する。

(2) 試験条件

- ①引張による破壊荷重を確認
- ②内圧相当の引張荷重を繰り返し加えた後、偏平試験で曲げ強度の低下度合いを確認
- ③内圧レベル、繰り返し回数を変えて②を実施

(3) 試験片（リング）の形状

原管から幅 40mm で切り出したリングとする。ただし、切欠きを有するリングとするか否か、またその場合の切欠き部の幅は予備試験等により決定する。

3) 内外圧複合状態の評価方法の検討

(1) ゴムチューブを用いた繰り返し内圧負荷試験

供試管が破壊するまでの高内圧負荷を行う試験には適さないが、止水用のフタなどが不要で、長さの短いリング状の供試管に均等な内圧が負荷できる大きな利点がある。そこで、リング状の供試管を扁平させた状態で内圧を負荷する内外圧複合状態の再現試験など、非破壊状態での評価方法に利用できると考えられる。

また、内圧負荷用のシリンダー、アクチュエータを整備することで内圧繰り返し試験にも利用できる。

(2) ノルリングによる周方向引張試験

荷重制御方式の試験装置で引張荷重を負荷する。

所定の繰り返し回数経過後、供試管（リング）を扁平破壊させて荷重の低下度合いを確認する。様々な内圧レベルの試験条件を設定し、内圧繰り返しの評価が可能と考えられる。

(5) 設計マニュアルの作成

研究成果をとりまとめ、設計マニュアルを作成した。
樹脂系材料の長期特性把握に必要な試験項目、方法、手順の標準化を図るとともに、品質管理等の考え方について評価方法の検証を行った。

内容を下記に示す。

1. 目的
2. 長期性能試験と実施手順
 - 2-1 既往資料
 - 2-2 長期外圧強さ
 - 2-3 長期内圧強さ
3. 内外圧繰り返し試験と実施手順
4. 試験環境および試験体
 - 4-1 恒温室と試験装置
 - 4-2 試験体作製の留意点
5. 結果の評価方法
6. 品質管理

2 事業の成果

2. 1 成果の内容

突発事故の増加する樹脂系パイプラインについて、現行の設計基準「パイプライン」に記載された 3 管種（硬質ポリ塩化ビニル管、強化プラスチック複合管、一般用ポリエチレン管）にガラス繊維強化ポリエチレン管を加えた 4 管種を対象として、長期的な性能変化を予測する手法を開発するために性能試験を実施し、以下の成果を得た。

（1）長期外圧剛性の確認

長期性能の基礎となる外圧に関するクリープ特性について、4 管種ともに既往のデータがないことから、試験装置を製作し外圧クリープ試験を実施した。試験環境、口径や設定たわみ率などの試験条件を統一して実施した結果、いずれの管種もクリープ変形を生じ、材料の違いにより異なるクリープ特性を示すことがわかった。変位量の経時変化から外挿される 50 年後の剛性と初期剛性の比からクリープ係数を求めた。

（2）長期強度の評価手法の検討

既往の文献データや製造メーカー保有の長期特性データの再評価を行う場合、あるいは新たな管種の性能を評価する場合などに、その物性値の妥当性を検証するための試験方法を検討した。

管体から採取した切出し片による引張試験、管体からリング状に切り出した環片によるノルリング引張試験について、試験速度を変化させることで引張強度が低下する傾向を確認できた。今後もデータの蓄積と検証が必要であるが、比較的簡易な試験方法で長期特性を推定できる可能性のある方法を見出した。

（3）設計マニュアル

樹脂系材料の長期特性把握のため本研究で実施した試験項目、方法、手順の標準化を図るとともに、品質管理等の考え方について評価方法の検証を行い、マニュアルを作成した。

長期特性に基づく設計の考え方について、研究開発組合内各社の見解を整理して巻末の参考資料に示す。

2. 2 目標の達成度

（1）成果から得られる効果

パイプラインの突発事故の要因としては、施工に起因するもの、材料に起因するもの、管理に起因するもの（バルブ操作に伴う水撃圧等）などが考えられるが、これらを明確に事象としてとらえ、個別に原因を特定することは困難である。

このうちの材料に起因するものについては、長期性能の変化を定量的に予測、把握することで、適切な長期供用の可能性の判断、突発事故リスク低減、補強対策、更新時期の判断などに貢献することができる。

（2）従来技術との比較

1) 比較する従来技術

JIS 規格などを満足する製品品質や施工後のたわみ量の規定は、パイプ製造直後の短期

性能を用いた構造設計であるため、供用期間内で確保されている安全性の低下を定量的に判断できない。本研究は現行の構造設計では用いられていない長期性能を考慮した設計を具体化する役割を果たすものであり、比較すべき従来技術はない。

2) 従来技術に対する優位性

①経済性

供用中の経年・突発事故リスクの低減による経済効果が期待できる。

②工程

構造設計や配管施工に関しては、従来の管布設工と同等である。

③品質

材料特性を踏まえた製品の品質管理、適切な構造設計手法の運用により、経年・突発事故に対する安全性が向上する。

④安全性

材料特性を踏まえた製品の品質管理、適切な構造設計手法の運用により、経年・突発事故に対する安全性が向上する。

⑤施工性

現場での配管施工に関しては、従来の管布設工と同等である。

⑥周辺環境への影響

経年・突発事故リスクの低減により、管路そのものの被害や、漏水に伴う土砂流失による周辺農地被害などを未然に抑止できるため、周辺環境を健全に保つことができる。

2. 3 成果の利用に当たっての適用範囲・留意点

本研究の成果は現行の製品について得られたものであるが、今後新たな管種の採用を検討する場合や、新規参入を希望する事業者等に対しても、品質データの取得、検証等の考え方は踏襲できるものとする。

3 普及活動計画

3. 1 想定される利用者

すべての農業用パイプラインの事業発注者ならびに設計技術者

3. 2 利用者への普及啓発等の方法

①技術基準への反映

②設計マニュアルの公表

3. 3 利用者に対するサポート体制、参考資料等

①公的機関を通じた技術説明会の開催

②設計業務における技術支援活動

3. 4 特許・実用新案等の申請予定

パイプラインの設計施工に広く用いるべき技術と考え、特許出願はしていない。

4 研究総括者による自己評価

審査の ポイント	着眼点	申請時計画目標 ^{注1}	自己評価 ^{注2}	自己評価 の理由 ^{注3}
目標の 達成度	・効果 (従来技術に対する優位性)	・既設管の性能変化を把握し、突発事故のリスクを低減する ・新設管の品質向上、供用する全期間を通じた安全性の担保	A : 優れている B : 概ね妥当 C : 不十分	現行の設計に用いられていない長期性能を考慮した設計を具体化するものであり、従来技術はない。
	・信頼性 (品質、精度、安全性、耐久性等)		A : 優れている B : 概ね妥当 C : 不十分	経年・突発事故に関する安全性の向上に資する。
	・適用範囲・適用条件等	PVC、FRPM、PE、PE-GFの4管種を対象とし、その長期的な性能の変化を予測する手法を開発する。	A : 広範囲に適用 B : 概ね妥当 C : 限定的	本研究の成果は対象とした4管種について得られたものであるが、今後新たな管種の採用を検討する場合や、新規参入事業者等に対しても、品質データの取得、検証等の考え方は踏襲できるものとする。
普及の 可能性	・想定される利用者への普及啓発の方法	技術基準への反映、技術資料の整備	A : 十分な利用が見込まれる B : 概ね妥当 C : 限定的	設計基準への反映 設計マニュアルの公表
	・利用者に対するサポート体制 (設計・積算・施工等の参考資料、相談窓口等)		A : 十分に整備されている B : 概ね妥当 C : 改善が必要	技術サポート等については、本研究が対象とした4管種の各メーカーおよび協会が窓口となり、対応する。
総合 コメント ^{注4}	樹脂系のパイプの長期に亘る力学的特性の変化を定量的に明らかにすることができ、製造直後の短期的な性能から供用期間中の品質の基本的な変化を確認することができたことは大きな成果である。 また、長期特性を簡便に試験し評価する試験方法と検証プロセスを確立し、策定した試験・品質評価マニュアルを用いて、新たに開発される管材も含めて統一的に品質確認する道が開けたことは、パイプラインの長期的な安全性を保障することにつながる。			

注1) 成果報告書に記載の研究開発目標を記載する。

注2) 評価結果欄は、A・B・Cのうち「A」を最高点、「C」を最低点として3段階で記入(○付け)する。

注3) 自己評価の理由を記載する。

注4) 総合的なコメントを記載する。

5 今後の課題及び改善方針

（１）設計基準類への反映

長期供用されるパイプラインの不測の事故や損傷、機能障害を未然に防止するためには、土地改良事業計画設計基準「パイプライン」を適用する事業において、そのパイプに要求する性能を明確にする必要がある。本官民連携事業によって、管材に応じて長期的な力学特性が明らかとなったことから、耐用年数と要求性能の考え方や品質管理基準に適切に反映することが重要である。このためには、実際の事業現場での実証的なモニタリングを継続的に展開することによって多様な現場のデータを蓄積するとともに、事業現場や設計担当者の理解を深めることができれば、設計や施工、維持管理基準類の総合的な革新が図れると考える。

（２）品質管理の向上

管材の短期性能に加えて供用期間中の基本的な性能変化を示すことができた。このことは、事業に供給する管材の品質を長期に亘って保証することにつながり、パイプに対する信頼性を高めるとともに、突発的な事故の削減と水利システム全体に及ぶリスク低減につながる。

さらに、パイプの長期に亘る信頼性を保証するためには、品質管理体制の確立が不可欠である。新たに開発されるパイプについても、この品質管理体制における検証を受けることによって、既往の管材と同等の位置づけとするなどの展開も期待される。このためには、土地改良技術事務所と大学、試験研究機関が一体となって体制を維持し、オープンな受け入れ試験ができることも重要なフォローアップと考える。

長期特性に基づく構造設計の考え方

参考表 1 研究開発組合内 各社の見解（1）

管種	現行基準の設計照査式	クボタ	栗本鐵工所	積水化学工業	ダイプラ	現行基準の諸元
PVC	1. 応力 $t \geq \frac{0.5D \cdot H + \sqrt{(0.5D \cdot H)^2 + 24\alpha \cdot \sigma_a \cdot M}}{2\sigma_a} \dots\dots\dots (9.4.5)$ ここに、 t : 応力計算から求められる必要管厚 (mm) D : 管の内径 (mm) H : 設計水圧 (MPa)、$H=H_1+H_2$ H_1 : 静水圧 (MPa) H_2 : 水撃圧 (MPa) M : 外圧によって延長 1mm 当たりの管体が発生する最大曲げモーメント (N・mm/mm) (表-9.4.2 参照) (単位変換 1kN・m/m=1,000N・mm/mm) α : 引張応力/曲げ応力 ダクタイル鋳鉄管 0.7 鋼管 0.7 硬質ポリ塩化ビニル管 0.55 ポリエチレン管 0.75 σ_a : 許容引張応力度 (N/mm²) 硬質ポリ塩化ビニル管 : 安全率を 3 とし、$\sigma_a=45 \div 3=15\text{N/mm}^2$ ポリエチレン管 : 安全率を 3 とし、$\sigma_a=6.2\text{N/mm}^2$ (MPa)	【応力】 応力の照査は (9.4.5) 式を用いる。 PVC の α (引張応力/曲げ応力) は 0.55 とする。 許容引張応力度 σ_a は、塩ビ管・継手協会の内圧クリープ試験結果より、長期強度 25N/mm² に対して安全率を 2 とする。 【たわみ】 たわみの照査は (9.4.9) ～ (9.4.11) 式を用いる。 管材のヤング係数 E は、初期のヤング係数に外圧クリープ試験 (JIS K 7020 方法 C による二次回帰式) で求めたクリープ係数 α_{50} (PVC では 0.5) を乗じた長期のヤング係数を用いる。 PVC 以外の PE、PE-GF についても上記と同様に考え、長期強度に対する安全率は管種に関わらず 2 とする。		【応力】許容引張応力度は、JISK6741 硬質ポリ塩化ビニル管に示される引張降伏強度 45N/mm² を安全率 3 で除した 15N/mm² を基準とする。 すなわち 50 年後のクリープ引張強度 25N/mm² を安全率 1.66 で除した値 (=15N/mm²) とする。 【たわみ】数十年埋設後の PVC 管の弾性率は現行設計の 3000N/mm² から大きく低下していない。長期の弾性率についても 3000N/mm² を適応すべき。 (第 15 回資料より)		【許容応力】 安全率を 3 とし、 $\sigma_a=45 \div 3=15\text{N/mm}^2$ 【ヤング係数】 $E=3,000\text{N/mm}^2$
PE	2. たわみ $\frac{\Delta X}{2R} \times 100 = \frac{F_1(K \cdot W_v + K_0 \cdot w_0 \cdot R + K_p \cdot W_p) + F_2 \cdot K \cdot W_w}{\frac{E \cdot I}{R^3} + 0.061e'} \times 100 (\%) \dots\dots\dots (9.4.9)$ ここに、 ΔX : 水平たわみ量 (m) ΔX_1 : 鉛直荷重、管内水重及び管体の自重によるたわみ量 (m) ΔX_2 : 活荷重又は軌道荷重又は施工時荷重によるたわみ量 (m) R : 管厚中心半径 (m) W_v : 土圧、上載荷重による鉛直荷重 (kN/m²) W_w : 活荷重又は軌道荷重又は施工時荷重による鉛直荷重 (kN/m²) w_0 : 水の単位体積重量 (9.8kN/m³) W_p : 管体の単位面積当たりの重量 (長さ方向 1m の環片から円周方向に 1m の間隔で切取ったものの重量) (kN/m²) (管体の自重が示されていない場合は、表-9.4.8 を用いて管体の単位面積当たりの重量を求めてよい。) K、K_0、K_p : 基礎の支持角によって決まる係数 (表-9.4.7 参照) F_1 : 荷重 (活荷重を除く) による変形遅れ係数 (表-9.4.9 参照) F_2 : 活荷重による変形遅れ係数 (ここでは 1.0 とする) E : 管材のヤング係数 (kN/m²) (表-8.2.1 参照) I : 管軸方向を軸とし、管延長 1m 当たりの管壁の断面二次モーメント (m⁴/m) e' : 基礎材の反力係数 (kN/m²) (次項 (5) 参照) $I = \frac{R^3}{E} \cdot \left\{ \frac{F_1(K \cdot W_v + K_0 \cdot w_0 \cdot R + K_p \cdot W_p) + F_2 \cdot K \cdot W_w}{\frac{\Delta X}{2R}} - 0.061e' \right\} \dots\dots\dots (9.4.10)$ 次に、断面二次モーメントは $b \cdot t^3 / 12$ であるから、$b=1.0\text{m}$ とすると、式 (9.4.11) により管厚 t (m) が求められる。 $t \geq \sqrt[3]{12 \cdot I} \dots\dots\dots (9.4.11)$			【設計式】上水道・下水道・ガスと同様、内圧と外圧を個別に検討する。 【応力】内圧に対する許容応力 σ_a = 曲げに対する許容応力 σ_b = 10 / 1.25 = 8MPa 【たわみ】初期弾性率 800～1000MPa を用い、許容たわみ率 5% 以下。 (第 14 回資料に追加)		【許容応力】 安全率を 3 とし、 $\sigma_a=6.2\text{N/mm}^2$ 【ヤング係数】 $E=1,300\text{N/mm}^2$
PE-GF					【設計式】上水道の PE 管と同じ内外圧分離式が妥当と判断。 【応力】許容応力は、熱間内圧クリープ試験に基づく最小要求強度 20MPa に安全率 1.25 を見込んで 16MPa とする。(JIS K 6799 規格を参照) 【たわみ】設計たわみ率は、通水断面の確保を考慮し 5% とする (JSWAS K-2 規格を参照)。ヤング率は、クリープを考慮のではなく、初期の値 2500MPa でよいと判断。(官民連携新技術研究開発事業 No.83 より) (第 14 回資料より)	未掲載

参考表 2 研究開発組合内 各社の見解（2）

管種	設計照査式	クボタ	栗本鐵工所	積水化学工業	ダイプラ	備考
FRPM	1. 応力 $H_p = \frac{H_c}{S} \left\{ 1 - \left(\frac{P_H}{P_c / S} \right)^n \right\} = \frac{H_c}{S} \left\{ 1 - \left(\frac{P_H}{P_c / S} \right)^{2.0} \right\} \dots\dots\dots (9.4.7)$ ここに、 H_p : 外圧が P_H のときの（許容）内圧（MPa） P_c : 内圧が 0 のときの外圧線荷重（kN/m） H_c : 外圧が 0 のときの内圧（MPa） P_H : 内圧が H_p のときの（許容）外圧線荷重（kN/m） S : 安全率（2.0 以上） n : 管の種類や構造等によって決まる係数 （強化プラスチック複合管は 2.0 とする） 2. たわみ PVC、PE、PE-GF と同じ式を用いる。	【応力】 応力の照査は（9.4.7）式を用いる。 内圧が 0 のときの外圧線荷重 P_c および外圧が 0 のときの内圧 H_c は、長期極限曲げひずみ試験 および内圧クリープ試験の結果から、 t=0.1（初期）の観測値と t=438,000（50 年後）の推定値の比率を低減率として 現行の P_c および H_c に乗じ、 長期の P_c および H_c を求める。 【たわみ】 たわみの照査は（9.4.9）～（9.4.11）式を用いる。 管材のヤング係数 E は、初期のヤング係数に外圧クリープ試験（JIS K 7020 方法 C による二次回帰式）で求めたクリープ係数 α_{50} を乗じた長期のヤング係数を用いる。	【応力】 現行の（9.4.7）式を用いて、 内圧が 0 のときの外圧線荷重 P_c は 50 年後の想定破壊外圧＝初期破壊外圧の 50%を、 外圧が 0 のときの内圧 H_c は初期の試験内圧を、 それぞれ用いる。 【たわみ】 50 年後の EI 値は、初期の EI 値にクリープ係数 0.7（2 直線による一次回帰式）を乗じて求める。 （第 13 回資料より）	【応力】 現行の（9.4.7）式を用いて、 内圧が 0 のときの外圧線荷重 P_c は 50 年後の想定破壊外圧を、 外圧が 0 のときの内圧 H_c は 50 年後の想定破壊内圧を、 それぞれ用いる。 【たわみ】 50 年後の EI 値は、初期の EI 値にクリープ係数 0.75（JIS K 7020 方法 B による一次回帰式）を乗じて求める。 （第 14 回資料より） ただし、活荷重に関連する項は初期の EI 値を代入して算出する。		