

## 老朽管の改修方法に関する共同研究

## 第2回 各試験の試験方法・結果概要と考察

## 1. はじめに

今回は共同研究の目的と実施した試験項目と各工法の仕様についての紹介であった。今回は、実施した試験のうち、管片外圧試験・クリープ試験・繰り返し載荷試験についての試験方法と試験結果について紹介する。

## 2. 管片外圧試験

## 2-1. 試験目的

この試験の目的は、既設管に内挿する更生管の材料・力学試験を行い、製品の強度を確認することである。また、この試験結果よりクリープ試験・繰り返し載荷試験の載荷荷重を決定した。

## 2-2. 供試体

供試体は、設計条件から求めた各工法の呼び厚で作成する。長さは300mmとする。

供試体は各工法3体作成し、3回の試験を実施した。実施した各工法の供試体の寸法測定結果を表-1、測定位置を図-1に示す。

表-1 供試体寸法

工法名	平均管厚 (mm)	平均外径 (mm)
ICP	10.35	296.29
FFT	7.27	298.54
ALZ	9.36	299.54
GRO	10.14	298.38
INS	6.88	297.79
OMG	10.61	296.75
HL	5.73	298.58
SLS	6.54	302.25

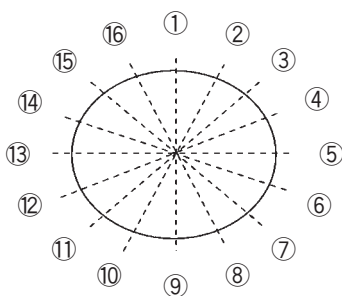


図-1 供試体寸法測定位置

工法により材料を重ね合わせている部分があり、厚さがやや大きくなる。重ね合わせ位置は試験への影響を少なくするため、⑮=斜め上45°方向とした。平均厚さは重ね合わせ部を避けて、断面位置①、⑤、⑨、⑬（鉛直、水平方向）において厚さを計測し、3つの供試体について平均値とした。

## 2-3. 試験方法

## 2-3-1. 試験方法概要

直径300mmの管を対象として、新たにパイプ内部に構築される内挿管やライナーの力学的な強度・変形性能を図-2および写真-1に示す外圧試験によって確認した。供試管をJIS A 5350の管片圧壊試験に準じて、供試管上部より載荷を行い、たわみと荷重の関係を測定した。

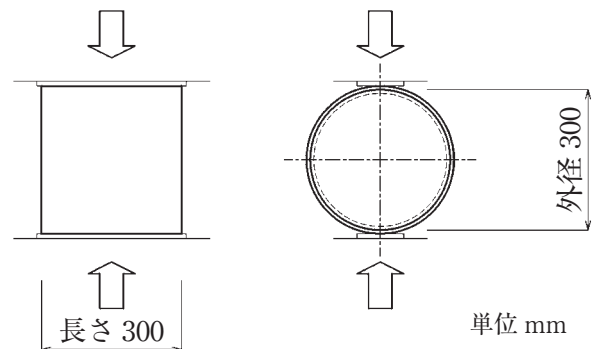


図-2 管片外圧試験 概要

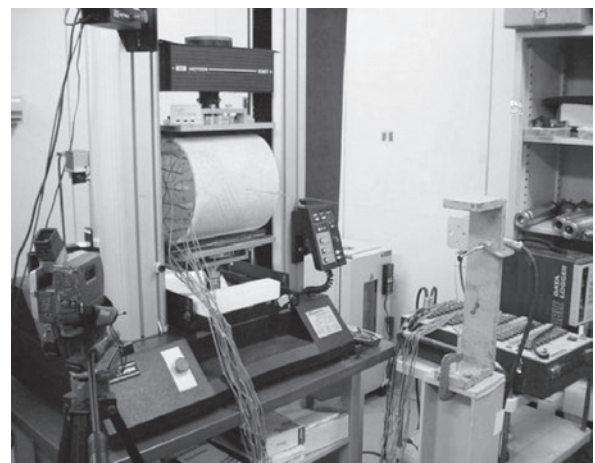


写真-1 管片外圧試験 実験装置

### 2-3-2. 測定項目

管片外圧試験における計測項目は、荷重・変位（上下、左右）・円周方向ひずみの3つである。

供試体の内側の16ヵ所にひずみゲージを貼付けた。なお、ひずみ計測位置は寸法測定位置と同じである。この位置において、上下方向に荷重を作用させた。

### 2-4. 試験結果概要と考察

#### 2-4-1. 荷重－鉛直方向たわみ率曲線

図-3に管片外圧試験による荷重－鉛直たわみ率曲線を示す。

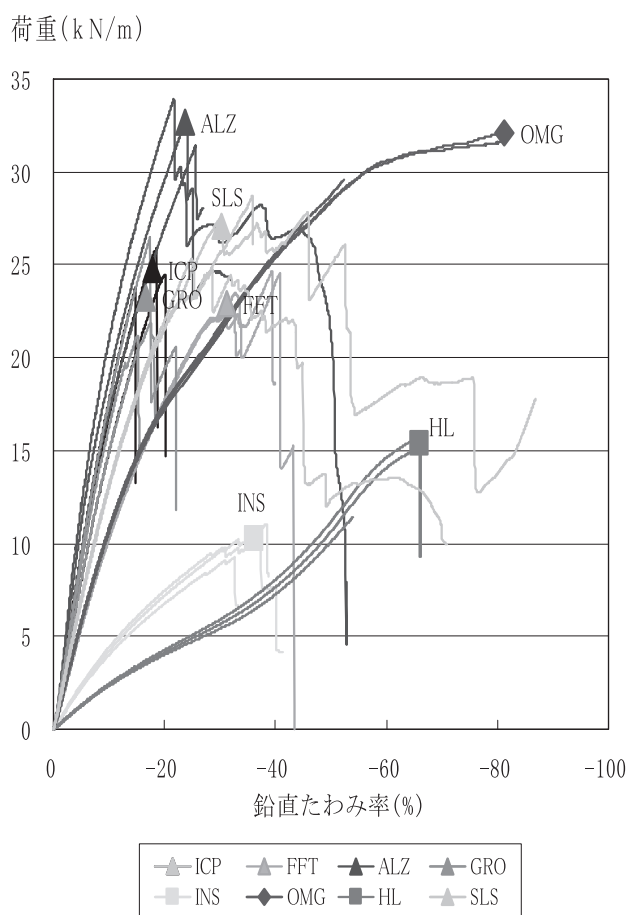


図-3 管片外圧試験結果 荷重－鉛直たわみ率曲線

図-3に示す荷重－鉛直たわみ率曲線において、三角や四角などの印がある点は、各工法の供試体が破壊した点（3供試体の平均）である。各工法の荷重－鉛直たわみ率曲線を重ね合わせると、工法により強度・変形性能に大きな差が見られた。

各工法の3本の供試体は、破壊までほぼ同じ曲線になっており、製品のバラツキは少なかった。表-2に工法別の試験結果を示す。

表-2 工法別 供試管諸元と鉛直たわみ率段階における載荷重

工法名	ICP	FFT	ALZ	GRO	INS	OMG	HL	SLS		
外径 (mm)	296.29	298.54	299.54	298.38	297.79	296.75	298.58	302.25		
内径 (mm)	275.58	284.00	280.82	278.10	284.03	275.52	287.13	289.17		
厚さ (mm)	10.36	7.27	9.36	10.14	6.88	10.61	5.73	6.54		
長さ (mm)	303.50	299.79	298.94	302.52	299.90	297.11	299.44	296.69		
載荷重 (kN/m)	たわみ率	2%時	3.36	2.07	4.01	3.36	0.92	2.27	0.51	2.79
		3%時	5.23	3.21	6.45	5.20	1.40	3.47	0.77	4.22
		4%時	7.03	4.35	8.74	7.01	1.85	4.62	1.03	5.61
		5%時	8.81	5.44	10.90	8.74	2.29	5.76	1.27	6.98
偏平弾性率 (MPa)	たわみ率	5%時	3020.4	5518.1	5147.8	3253.7	2726.1	1829.2	2652.1	10078.2
		10%時	2824.0	5216.3	4497.0	3030.0	2504.5	1707.8	2477.9	9415.8
		15%時	2203.8	4828.2	3933.9	2702.3	2289.2	1548.9	2304.5	8628.5
		20%時	-	4475.6	3516.2	-	2117.7	1383.4	2160.7	7792.8
		30%時	-	3749.9	-	-	1854.4	1140.5	1970.7	6128.6
破壊時	24.75	22.88	32.71	23.19	10.21	31.08	14.04	27.02		
破壊時	17.87	31.30	23.78	16.72	36.11	71.63	61.97	30.35		

※値は全て、各工法3つの供試体の平均値

偏平弾性率の算出は、以下の式による。<sup>1)</sup>

$$E = 1.788 \times R_m^3 \times \frac{w}{\Delta y \times t_{av}}$$

ここに、

- $R_m$  : 強化層の平均半径 (mm)
- $w$  : 単位長さあたりの力 (N/mm)
- $\Delta y$  : 試験片内径の鉛直変位 (mm)
- $t_{av}$  : 平均厚さ (mm)

#### 2-4-2. ひずみ計測結果

鉛直たわみ率5%時のひずみゲージ計測値を図-4、表-3に示す。

計測値は工法ごとに3つの供試体で試験をしてお

表-3 工法別鉛直たわみ率5%時における上下左右のひずみ計測値

工法名	計測位置	管頂 No.01( $\mu$ )	側面 No.05( $\mu$ )	管底 No.09( $\mu$ )	側面 No.13( $\mu$ )
ICP		5659	3617	5407	3650
FFT		3916	2390	4085	2279
ALZ		4296	2559	5300	2791
GRO		5753	2962	5312	3922
INS		3613	2241	3384	2349
OMG		7141	4602	7153	4457
HL		3603	1932	3397	1891
SLS		3302	2310	3922	2356

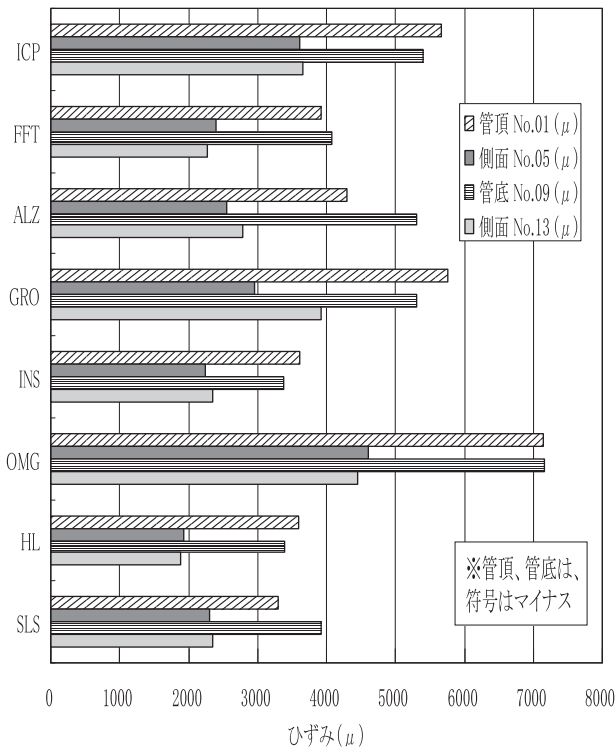


図-4 管片外圧試験上下たわみ5%時のひずみ計測

り、その平均値を示している。

### 3. クリープ試験

#### 3-1. 試験目的

地中に埋設されるパイプラインの挙動に大きな影響を及ぼす外荷重として、路面走行に伴う繰り返し荷重や土被りなどの安定した鉛直荷重がある。前者については、弾性的な変形挙動だけでなく塑性的な性質が顕在化して残留ひずみが累積することが問題となる。また、後者は人工材料特有の長期的なひずみの進展、すなわちクリープ変形が問題となる。

材料的な特性評価としてのクリープ試験だけでなく、埋設環境を再現した試験が望ましいが、反面荷重の安定性や均一性に欠ける問題がある。

このため、円管そのものを用いた水中下でのクリープ試験によって、地下水下に埋設されたパイプのクリープ挙動の特性を検証することとした。

#### 3-2. 供試体

管厚計算条件から求めた各工法の呼び厚で更生管を作成し、試験に必要な長さ（外径 300mm × 長さ 100mm）に切断したものを供試体とした。

更生管端部において、切断面から水が更生管材料構成の内部に含浸するのを防ぐために、樹脂コーティング処理を行った（OMG は除く）。

### 3-3. 試験方法

#### 3-3-1. 試験方法概要

環状供試体に上下方向に一定荷重の外圧を与え、たわみの変化を測定した。

一定荷重については、管片外圧試験における鉛直たわみ率が3%時の荷重とする。室温・水温は  $23 \pm 3^{\circ}\text{C}$  とした。

試験期間は 10,000 時間とし、計測は対数時間軸上で等間隔とした（計測は約 20 回）。

水補給等のメンテナンスを 14 日おきに実施した。

試験載荷荷重と試験概要図および試験状況を表-4、図-5、写真-2 に示す。

表-4 供試管載荷荷重と外径

工法名	鉛直たわみ率3%時荷重 (kN/m)	管片外圧試験時の平均外径 (mm)
ICP	5.23	296.29
FFT	3.21	298.54
ALZ	6.45	299.54
GRO	5.20	298.38
INS	1.40	297.79
OMG	3.46	296.75
HL	0.77	298.58
SLS	4.22	302.25

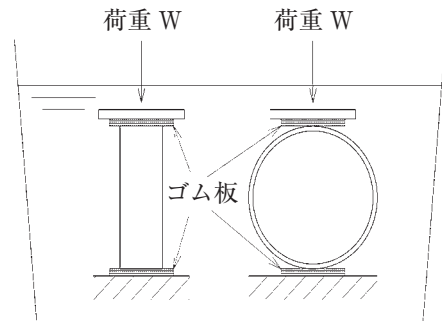


図-5 クリープ試験概要図

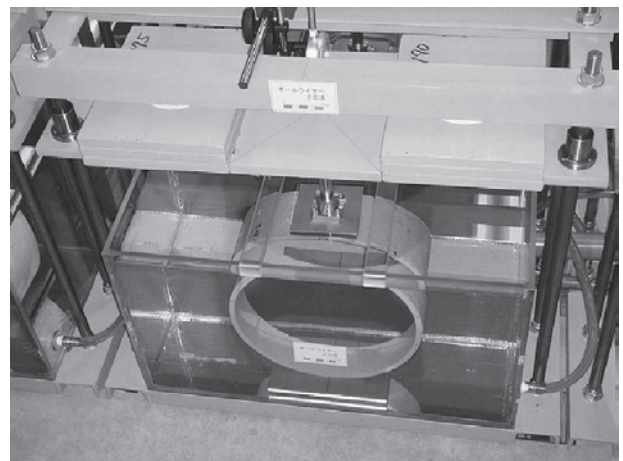


写真-2 クリープ試験状況

### 3-3-2. 測定項目

鉛直たわみを測定し、計測日時と併せて記録する。計測回数と時間を表-5に示す。

表-5 計測回数と計測時間

計測回数	対数時間	時間 =10 <sup>対数時間</sup>	計測日時
1	0.0	1.00	2004/12/10 08:00
2	0.2	1.58	2004/12/10 08:35
3	0.4	2.51	2004/12/10 09:30
4	0.6	3.98	2004/12/10 10:58
5	0.8	6.31	2004/12/10 13:18
6	1.0	10.00	2004/12/10 17:00
7	1.2	15.85	2004/12/10 22:50
8	1.4	25.12	2004/12/11 08:07
9	1.6	39.81	2004/12/11 22:48
10	1.8	63.10	2004/12/12 22:05
11	2.0	100.00	2004/12/14 11:00
12	2.2	158.49	2004/12/16 21:29
13	2.4	251.19	2004/12/20 18:11
14	2.6	398.11	2004/12/26 21:06
15	2.8	630.96	2005/01/05 13:57
16	3.0	1000.00	2005/01/20 23:00
17	3.2	1584.89	2005/02/14 07:53
18	3.4	2511.89	2005/03/24 22:53
19	3.6	3981.07	2005/05/25 04:04
20	3.8	6309.57	2005/08/30 04:34
21	4.0	10000.00	2006/01/30 23:00

### 3-4. 試験結果概要

各工法の初期変形と10,000時間経過後の変形量との差分から、クリープ変形率を算出した。試験結果を表-6に示す。

鉛直たわみ率の経時変化(抜粋)を図-6に示す。

FFTとSLSは10,000時間まで線形な変化を示しているが、HLやOMGについては1,000時間前後に変曲点があり、鉛直たわみ率の増加に変化が見られる。FFTとSLSを除く工法については、10,000時間後には初期たわみ率の2倍以上の変形が生じており、クリープ的な変形挙動を設計に取り入れる必要

表-6 クリープ試験結果(鉛直たわみ率 時間別増加)

工法名	鉛直たわみ率(%)				
	35分~ 10時間の 増加	10時間~ 100時間の 増加	100時間~ 1000時間の 増加	1000時間~ 10000時間の 増加	35分~ 10000時間の 増加
ICP	-0.33	-0.41	-0.84	-1.20	-2.78
FFT	-0.24	-0.36	-0.61	-0.72	-1.94
ALZ	-0.33	-0.50	-1.09	-0.90	-2.82
GRO	-0.41	-0.44	-0.76	-1.55	-3.17
INS	-0.58	-0.64	-1.30	-1.58	-4.09
OMG	-0.86	-0.75	-1.08	-2.83	-5.51
HL	-0.30	-0.34	-1.11	-1.62	-3.37
SLS	-0.29	-0.24	-0.36	-0.45	-1.34

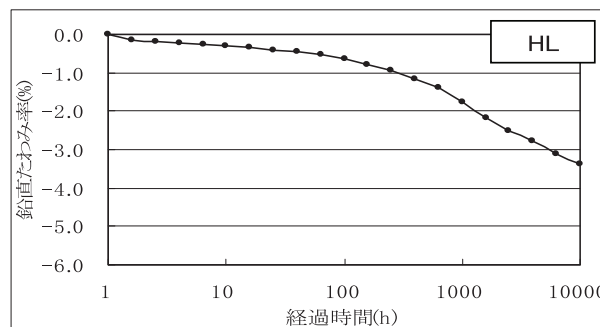
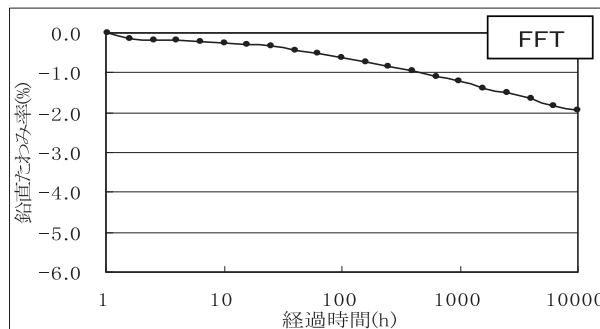
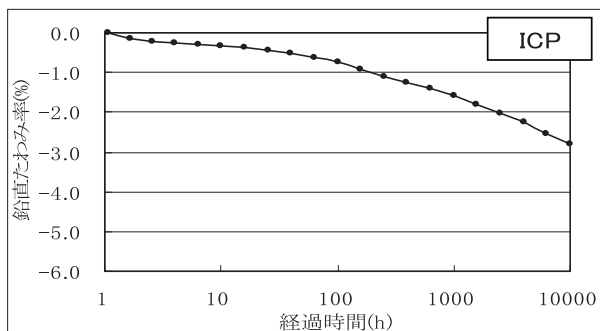


図-6 クリープ試験結果 経過時間-鉛直たわみ率(抜粋)  
(経過時間0~35分のたわみ量を除いた変化を示す)

性が伺える。

クリープ特性は、管を更生している樹脂とガラス繊維(フェルトなど)などの材料そのもののクリープ特性に影響を受けるとともに、その界面の影響を受けて長期的な変形挙動が顕在化していると考えてよい。材料的には不飽和ポリエステルはエポキシ樹脂に比較して長期的な変形が進行しやすいものの経済性に優れており、多くの工業材料に使用されている。また、ガラス繊維については、スチールを上回る高い剛性を有しており、これらの相互作用として高い曲げ剛性が確保され長期的な安定性が得られている。

## 4. 繰り返し载荷試験

### 4-1. 試験目的

新たに既設管内部に構築されるライナーの繰り返し荷重に対する耐久性を確認する。この試験は、供試体を水中に沈めた状態で行った。

#### 4-2. 供試体

管厚計算条件から求めた各工法の呼び厚で更生管を作成する。外径 300mm × 長さ 300mm の更生管を対象とした。供試体寸法を表-7に示す。

更生管端部において、切断面から水が更生管材料構成の内部に含浸するのを防ぐために、樹脂コーティング処理を行った（OMGは除く）。

表-7 供試体寸法

工法名	平均外径(mm)	平均長さ(mm)
ICP	297.25	304.50
FFT	298.25	301.19
ALZ	299.88	299.19
GRO	299.00	303.81
INS	298.38	300.00
OMG	297.13	297.88
HL	299.00	297.94
SLS	302.38	294.56

#### 4-3. 試験方法

##### 4-3-1. 試験方法概要

繰り返し載荷試験は、図-7のように環状供試体を水中に沈め、上下方向に繰り返し荷重を加える。水温は23℃とする。

繰り返し荷重の大きさは、管片外圧試験における、

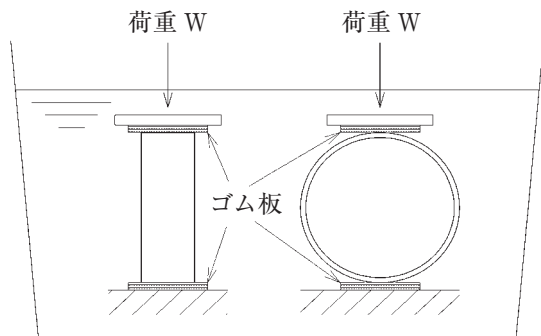


図-7 繰り返し載荷試験概要

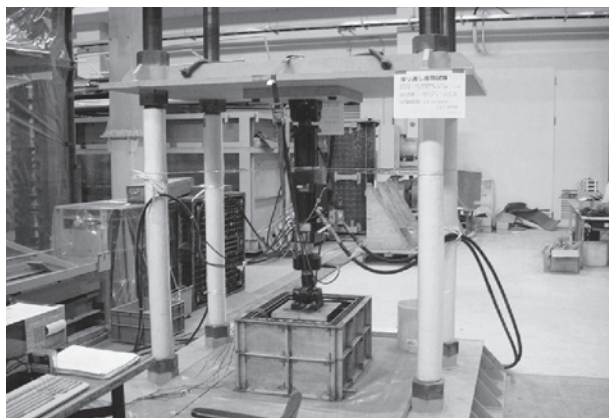


写真-3 繰り返し載荷試験装置

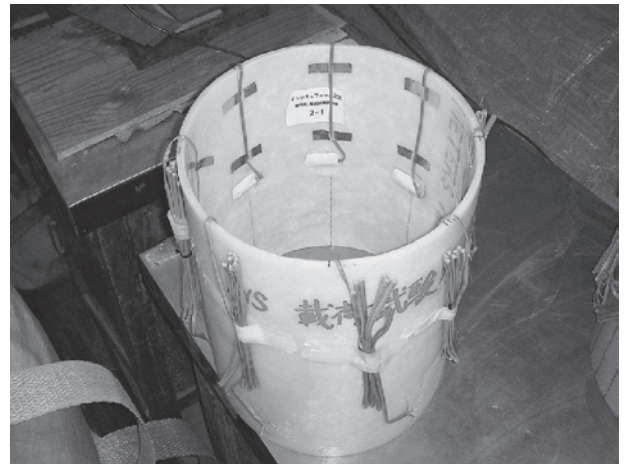


写真-4 ひずみゲージ取付状況

鉛直たわみ率2%時と4%時の荷重を、繰り返し載荷する。

繰り返し載荷の周波数は0.5Hz、繰り返し回数は100,000回とする。計測は対数軸上で等間隔とする。

供試体の内側の8カ所にひずみゲージを貼付け繰り返し載荷試験前後のひずみを計測した(写真-4)。

また、繰り返し載荷試験後、管片外圧試験を行い、外圧強度を測定した。

試験概要を図-7、写真-3に示す。

載荷荷重は、管片外圧試験における鉛直たわみ率が2%時と4%時の荷重を繰り返し載荷する。各工法の載荷荷重を表-8に示す。

表-8 繰り返し載荷試験における載荷荷重

工法名	鉛直たわみ率 2%時荷重 (kN/m)	鉛直たわみ率 4%時荷重 (kN/m)	管片外圧試験 時の平均外径 (mm)
ICP	3.36	7.03	296.29
FFT	2.07	4.35	298.54
ALZ	4.01	8.74	299.54
GRO	3.36	7.01	298.38
INS	0.92	1.85	297.79
OMG	2.27	4.62	296.75
HL	0.51	1.03	298.58
SLS	2.79	5.61	302.25

##### 4-3-2. 測定項目

計測は対数軸上において等間隔となるようなタイミングで10回実施する。

測定項目	備考
1. 載荷荷重	
2. ひずみ	更生管内面の8分割点
3. たわみ量変化	鉛直方向
4. 破壊荷重	繰り返し試験後の破壊荷重(管片外圧試験による)

#### 4-4. 試験結果概要

##### 4-4-1. 繰り返し载荷試験

表-9に、载荷回数約100,000回を終えた段階での鉛直たわみ率円周ひずみを示す。

载荷を繰り返すことにより、供試体の変形は大きくなり、測定される鉛直たわみ率は増加する。特に10,000回を越えた繰り返し荷重による増加が顕著であるが、工法によってその特性は異なっており、クリープ試験で見られた挙動と同様の特性が見て取れ

る。鉛直たわみ率の増加割合は、OMGが最大で1%である。ALZとINSは比較的増加が大きく、HL、SLSは比較的小さい増加である。

INS、OMGはクリープ試験においてもたわみが大きく、またSLSはたわみが小さい。2つの試験で同様の傾向が見られたが、HLはクリープ試験でのたわみは大きい、繰り返し载荷試験においては小さいたわみとなった。

载荷回数(横軸)と鉛直たわみ率の最大・最小(縦軸)関係(抜粋)を図-8に示す。

最大・最小ひずみについて、载荷初期と約100,000回载荷後の比較(抜粋)を図-9に示す。

管頂、管側、管底における、約10万回载荷時の最大ひずみに着目した(表-10参照)。

管に発生する円周方向ひずみが大きい工法はOMG、ICP、GROであった。ひずみが小さい工法は、HL、ALZ、INSであった。変形量を2%と4%に設定しているため、同じ変形量が発生した管のひずみ量は管の厚みに比例して大きくなる。このため、管厚が10mmを越えているOMG、ICP、GRO工法は、大きなひずみが管頂部に発生している。

表-9 工法別 繰り返し载荷による鉛直たわみ率の増加

工法名	変位	鉛直たわみ率(%)			供試管外径(mm)	
		約100回 载荷時	約10万回 载荷時	繰り返し による 増加	繰り返し試験の 供試管	管片外圧試験の 供試管
ICP	最大	-3.64	-4.36	-0.72	297.25 (t=9.90)	296.29 (t=10.36)
	最小	-1.89	-2.58	-0.69		
FFT	最大	-3.59	-4.28	-0.69	298.25 (t=7.51)	298.54 (t=7.27)
	最小	-1.83	-2.56	-0.73		
ALZ	最大	-3.27	-4.26	-0.99	299.88 (t=9.41)	299.54 (t=9.36)
	最小	-1.62	-2.54	-0.92		
GRO	最大	-3.85	-4.39	-0.54	299.00 (t=10.35)	298.38 (t=10.14)
	最小	-2.15	-2.67	-0.52		
INS	最大	-3.76	-4.64	-0.88	298.38 (t=6.50)	297.79 (t=6.88)
	最小	-1.93	-2.78	-0.85		
OMG	最大	-2.92	-4.19	-1.27	298.38 (t=10.60)	296.75 (t=10.61)
	最小	-1.53	-2.76	-1.23		
HL	最大	-2.61	-2.99	-0.38	299.00 (t=5.93)	298.58 (t=5.73)
	最小	-1.26	-1.62	-0.36		
SLS	最大	-3.94	-4.25	-0.31	302.38 (t=6.56)	302.25 (t=6.54)
	最小	-2.06	-2.38	-0.32		

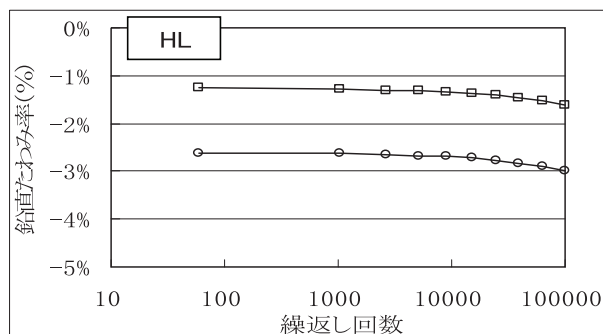
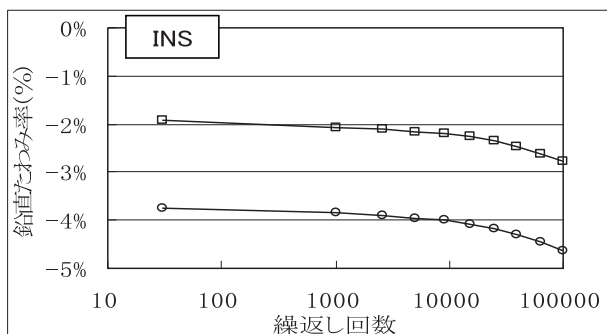
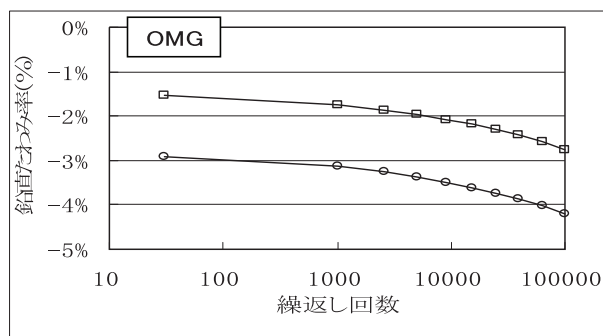
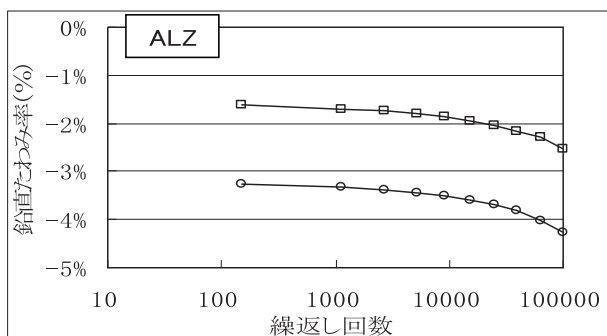


図-8 繰り返し回数-鉛直たわみ率(抜粋)

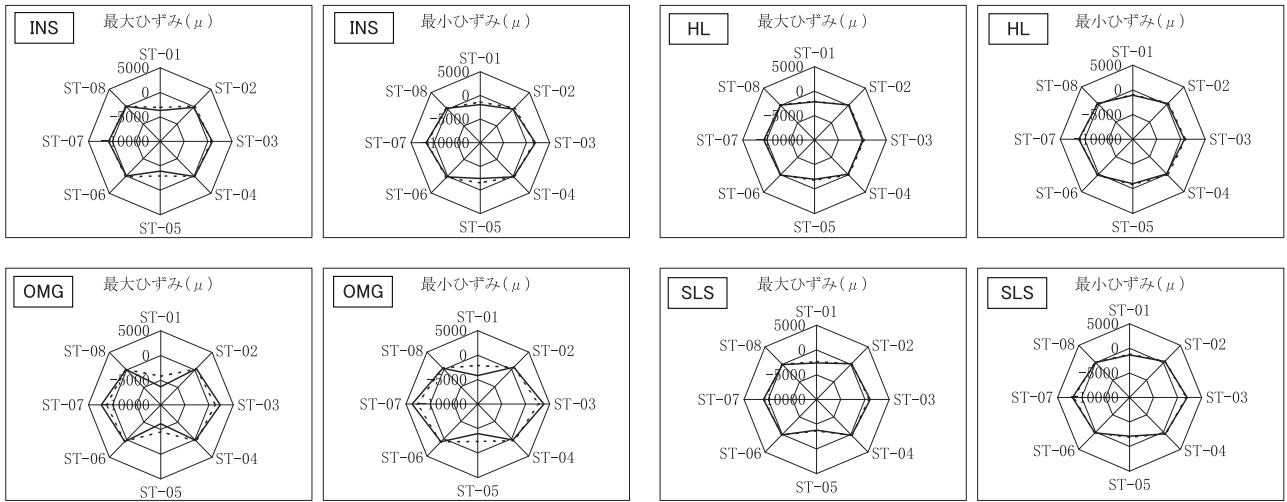


図-9 繰返し载荷試験結果 ひずみ計測 (抜粋)  
 (実線：約10万回载荷後 点線：载荷初期)

表-10 载荷初期と約10万回载荷後の最大・最小ひずみ (μ)

工法名		载荷	ST-01 管頂	ST-02 斜上	ST-03 側方	ST-04 斜下	ST-05 管底	ST-06 斜下	ST-07 側方	ST-08 斜上
ICP	最大	初期	-4298	309	1237	220	-4048	-183	1118	76
		約10万回	-5551	305	1571	134	-4853	-385	1358	-33
	最小	初期	-2064	589	2604	473	-1942	-78	2355	179
		約10万回	-3245	598	2968	374	-2700	-266	2618	73
FFT	最大	初期	-2427	271	896	18	-2559	308	781	-135
		約10万回	-2876	327	1209	29	-3068	418	1088	-542
	最小	初期	-1114	592	1921	25	-1226	658	1665	-76
		約10万回	-1577	654	2260	43	-1754	761	1963	-480
ALZ	最大	初期	-2183	170	703	79	-2381	147	733	28
		約10万回	-2391	61	705	-117	-2868	-286	443	-363
	最小	初期	-907	382	1638	165	-1042	308	1686	110
		約10万回	-1247	198	1635	-9	-1507	-207	1399	-283
GRO	最大	初期	-3923	264	1217	183	-3942	201	1434	93
		約10万回	-4784	222	1438	66	-4454	103	1723	196
	最小	初期	-1828	547	2503	282	-1989	330	2958	210
		約10万回	-2623	531	2736	158	-2505	232	3259	315
INS	最大	初期	-3094	162	771	118	-2931	186	722	146
		約10万回	-3687	-150	896	124	-3936	8	768	150
	最小	初期	-1378	358	1765	229	-1485	393	1655	297
		約10万回	-1905	66	1925	226	-2475	215	1733	295
OMG	最大	初期	-4226	290	1384	320	-4550	485	1338	178
		約10万回	-6330	357	2339	148	-6168	474	2310	177
	最小	初期	-2137	551	2769	568	-2373	901	2713	342
		約10万回	-4165	620	3794	368	-3969	871	3731	332
HL	最大	初期	-2067	147	435	55	-1798	111	511	124
		約10万回	-2167	133	170	-181	-1985	101	562	89
	最小	初期	-945	324	1002	115	-800	250	1129	270
		約10万回	-1058	306	716	-121	-1017	236	1172	239
SLS	最大	初期	-2374	168	895	264	-3617	105	887	-6
		約10万回	-2643	182	1052	267	-3785	90	999	-1
	最小	初期	-1118	364	1884	500	-1915	215	1807	7
		約10万回	-1344	383	1980	492	-2139	205	1924	16

#### 4-4-2. 繰り返し载荷試験後の管片外圧試験

100,000回の繰り返し荷重を受けた供試管の管片外圧試験の結果（抜粋）を図-10に示す。

この図では荷重と鉛直たわみ率の関係を示しており細い線3本は先行して実施した荷重履歴のない管の管片外圧試験結果を、太線は繰り返し载荷試験を経た供試管による管片外圧試験結果を示す。

破壊までの荷重－鉛直たわみ率曲線を見ると、繰り返し载荷を受けた供試管であっても、繰り返し載

荷を受けていない供試管と比較して、荷重が小さくなるなどの傾向は見られず、繰り返し载荷を行っていない供試体での試験結果とほぼ同様の結果が見られた。

以上が今回実施した管片外圧試験・クリープ試験・繰り返し载荷試験の試験結果である。

次回は、曲げ試験・引張試験と継手部の曲げ試験の試験方法と試験結果を報告する予定である。

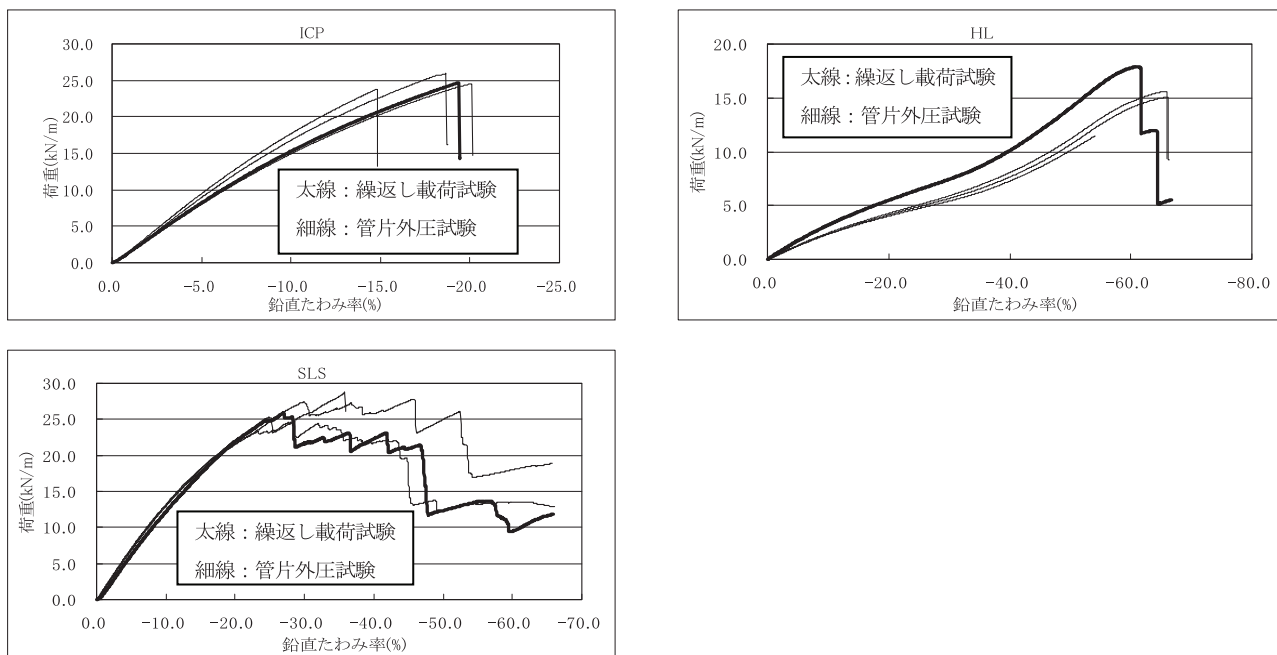


図-10 荷重－鉛直たわみ率曲線（抜粋）

#### 【参考図書】

- 1) JIS K 7013 : 1997 繊維強化プラスチック管

#### 連載講座小委員会

委員長	宮川 恒夫	EX・ダンビー協会	技術委員
委員	大塚 孝	3SICP 技術協会	技術部長
委員	渡辺 充彦	積水化学工業(株)	環境土木システム事業部 課長
委員	眞田 和彦	光硬化工法協会	技術委員長
委員	池ヶ谷貴之	オールライナー協会	技術委員