

土木研究所資料

地中埋設用有継手管の耐力変形性能実験結果報告

昭和 52 年 7 月

建設省土木研究所
耐震研究室

ま え が き

本資料は継手を有する地中埋設用直管の耐力と変形性能に関する実験の結果を示すものである。

耐震研究室	室 長	栗 林	栄	一
	研究員	羽 立	隆	幸
	技 官	千 場	良	信

目 次

ま え が き	
1. 概 説	1
2. 用語の定義	2
3. 実験方法	3
3.1 供 試 管	3
3.2 実験装置	3
3.3 実験項目	3
3.4 実験手順	10
3.4.1 強 製 変 位	10
3.4.2 手 順	11
4. 実験結果	12
4.1 結果の図表	12
4.2 引張および圧縮試験の結果	12
4.2.1 荷重～変形について	12
4.2.2 歪および伸縮量について	12
4.2.3 変形および破壊の性状	13
4.3 曲げ試験の結果	13
4.3.1 荷重～変形について	13
4.3.2 歪および伸縮量について	14
4.3.3 変形および破壊の性状	14
4.4 管軸心変位試験の結果	15
4.4.1 荷重～変形について	15
4.4.2 歪について	15
4.4.3 変形および破壊の性状	15
4.5 環片圧壊試験の結果	15
4.5.1 荷重～変形について	15
4.5.2 歪、変形および破壊の性状	15
5. SPおよびPVCの単純な理論による推定値と実験値	24
6. ま と め	31
7. 謝 辞	34

1 概 説

地中埋設管については J I S 規格および各種協会の自主規格が設けられている。

地中埋設管の耐震設計では、これらの規格にない継手を有する直管の耐力、ならびに変形性能（伸縮性・屈曲性）などが重要な要素になってくる。

本実験では口径 200φ の供試管を用い、引張試験、圧縮試験、曲げ試験、管軸心変位試験および環片圧壊試験を行った。実験の結果について荷重と軸心の変位の関係、管体または継手に生じた歪と変位の関係、管体または継手の伸縮性および屈曲性、さらに塑性変形および破壊の性状等についてまとめた。本資料はその結果を示すものである。

2 用語の定義

用語の定義は次のとおりとする。

- (1) 継手……メカニカル形式、スリップオン形式、並びに溶接、接着等の接合部とする。
- (2) 変形……供試管に荷重が加えられると、局部的または全体的に形状の変化が生ずる。その変化を変形とし、そのうち、任意の点の移動量を変位とする。(特に、何点の変位と具体的に記述しない場合は、荷重作用点の載荷前後における移動量(引張試験、圧縮試験、管軸心変位試験および環片圧壊試験の場合)およびスパン中央における管軸心の移動量(曲げ試験の場合)とする。)
- (3) 耐力……載荷された荷重の最大値、または実験装置の機能限界時の荷重および明らかに流体輸送の管としての機能が損失されたと判断される時の荷重とする。特に、降伏点の荷重を降伏耐力とする。
- (4) 屈曲角度……曲げ試験の場合の屈曲角度 θ_1 を図 1 (a) のとおりとする。管軸心変位試験の場合の屈曲角度 θ_2 を図 1 (b) のとおりとする。特に、図中の②の場合の屈曲角度を継手屈曲角度とする。
- (5) 伸縮量……管の伸びまたは縮みの量とする。特に、継手近傍の伸びまたは縮みを継手伸縮量とする。

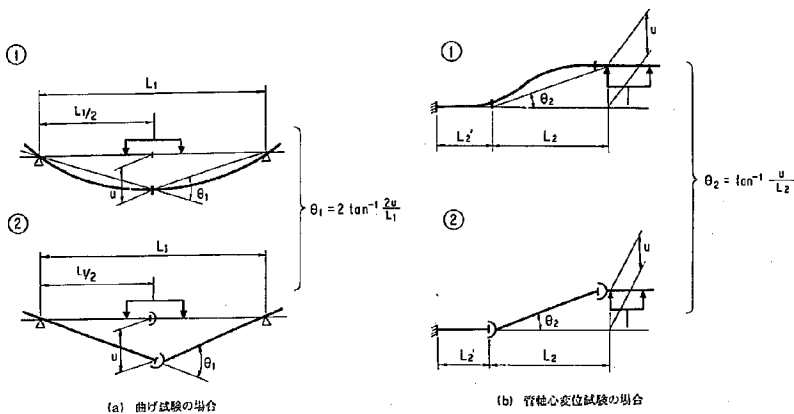


図1 屈曲角度

3 実験方法

3.1 供試管

次のJIS規格の管を供試管として用いた。管の種類は次の(1)～(4)の場合一種管、(5)の場合一般管とした。

- (1) JIS G 3451に規定される鋼管とJIS G 3452に規定される溶接継手を用いた管。
以下、単にSPと記す。
- (2) JIS G 5526に規定されるダクタイル鋳鉄管およびA形継手（メカニカル形式の継手）を用いた管。以下、単にDIと記す。
- (3) JIS A 5303規定の遠心力鉄筋コンクリート管およびセメントカラー継手（スリップオン形式の継手）を用いた管。以下、単にRCと記す。
- (4) JIS A 5301に規定される石棉セメント管およびJIS A 5315に規定される石棉セメント継手（スリップオン形式の継手）を用いた管。以下、単にACと記す。
- (5) JIS K 6741に規定される硬質塩化ビニル管および接着継手を用いた管。以下、単にPVCと記す。

引張および圧縮試験のSP、DIおよびPVCの供試管は二箇所の継手を有する構造とし、RCの場合は四箇所の継手を有する構造とした。さらに、ACについては三箇所の継手を有する構造とした。曲げ試験の場合は一箇所の継手を有する構造とした。管軸心変位試験のSP、DI、RC、ACおよびPVCの場合は二箇所の継手を有する構造とした。環片圧壊試験の供試管は継手を有しない長さ500mmの管とした。表1に引張および圧縮試験の場合の概略図、寸法、管材質を示す。表2に継手の詳細を示す。

3.2 実験装置

図2(a)～(e)に各試験の装置の概略図を示す。

3.3 測定項目

(1) 荷重

荷重には、供試管および試験の種類によって、それぞれ35 Ton、100 Tonおよび200 Tonの最大出力の油圧ジャッキ、および100 Tonのアムスラー試験機を用いた。荷重の検知は環片圧壊試験を除き、すべてロードセル（昭和測器製RC-1T、RT-1T、PCT-1Tおよび東京測器製TCLP-5T）を介し求めた。

(2) 管体および継手に生じた歪の測定

RCおよびACの管軸方向歪および円周方向歪は、共和電業製の一軸歪ゲージ（KC-70-A1-11）を用い測定した。SP、DIおよびPVCについては、共和電業製の二軸歪ゲージ（KFC-5-D16-11）を用い測定した。各供試管とも、それぞれ管体および継手に生じた歪を測定し、弾性領域における管体および継手の応力は、測定した歪から、次式によって算定した。

表 1 引張および圧縮試験の供試管の形状、寸法等

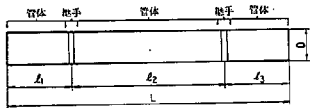
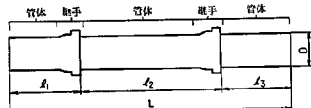
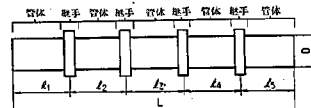
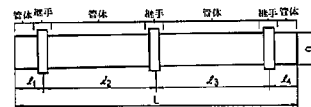
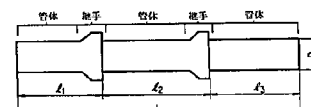
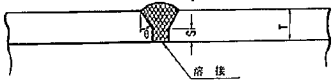
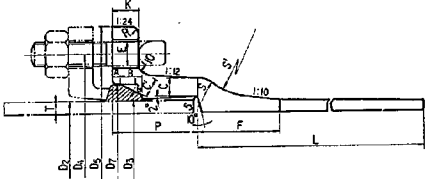
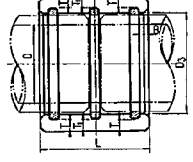
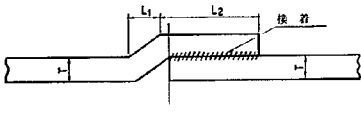
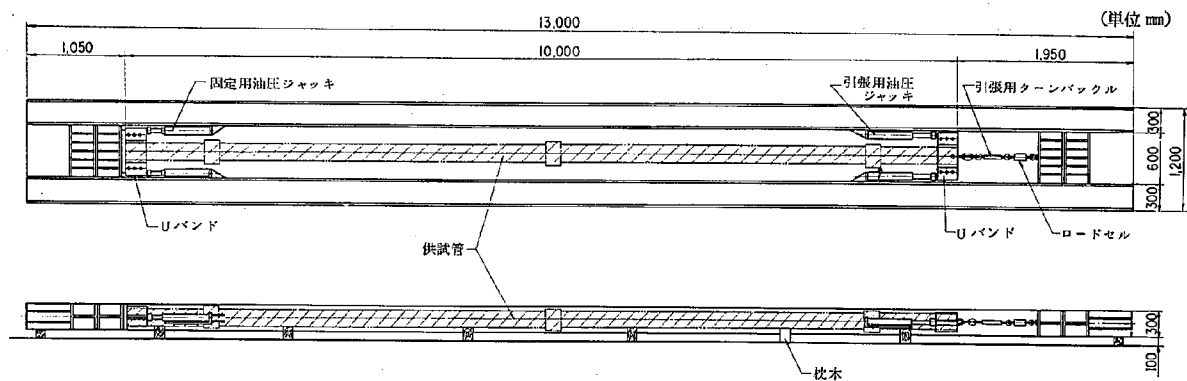
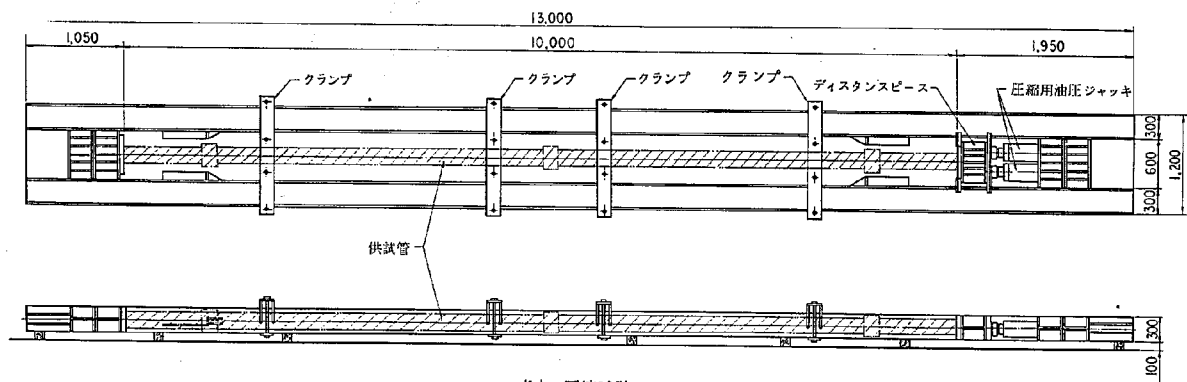
供試管	概 略 図	L (mm)	ℓ_1 (mm)	ℓ_2 (mm)	ℓ_3 (mm)	ℓ_4 (mm)	ℓ_5 (mm)	D (mm)	(Kg/m ²) 管 材 質
S P		10,000	2,250	5,500	2,250	—	—	200	T. S. = 3,000
D I		10,000	2,500	5,000	2,500	—	—	200	T. S. = 4,000
R C		10,000	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000	200	T. S. = 35
A C		10,000	1,000	4,000	4,000	1,000	—	200	T. S. = 225
P V C		10,000	3,100	3,800	3,100	—	—	200	T. S. = 5,000

表 2 継手の形状、寸法等

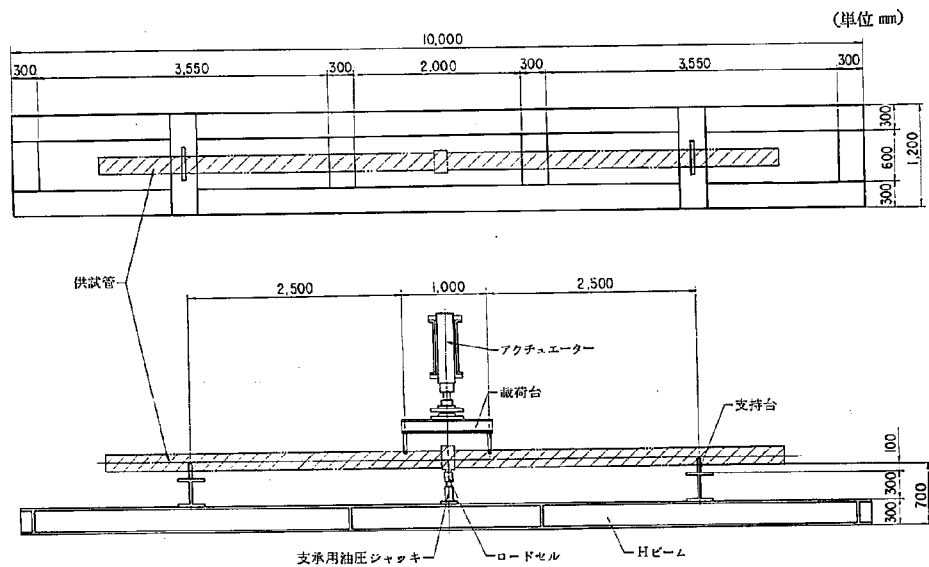
供試管	供試管の 継手 (JIS規格)	継 手 詳 細 図	形状寸法等 (mm)
SP	溶 接 (G3451)		T=5.8、 $\theta = 30^\circ + 5^\circ$ S=2.4 以下 管端部の外径許容差： ± 0.5 ㎜
DI	A 形 (G5526)		T=7.5、D ₂ =220、 D ₃ =224、D ₄ =292、 D ₅ =338、D ₇ =252、 A=8、B=19、 C=12、E=23、 F=80、P=65、 K=21、S=26、 S'=50、C'=14.5、 R=10、α=28° L=5000 ボルトの数：6本
RC	セメントカー (A5308)		T _C =30、D _C =278、 L _C =150 カラーの内周方向の鉄 筋比は0.5以上（普通 型）とし、カラーの長 さ方向に沿って均等に 配置する。
AC	石綿セメン トカラー (A5301)		T=22 (最小)、 B=12 (最小) D ₃ =248、L=180 (備考) 1. T ₁ は T より大 きくしなければい けない。 2. B の最大寸法は 最小寸法に10mm を加える
PVC	T S 形 (K6741)		T=10.3 (許容差+1.4) L ₁ =35 L ₂ =215



(a) 引張試験

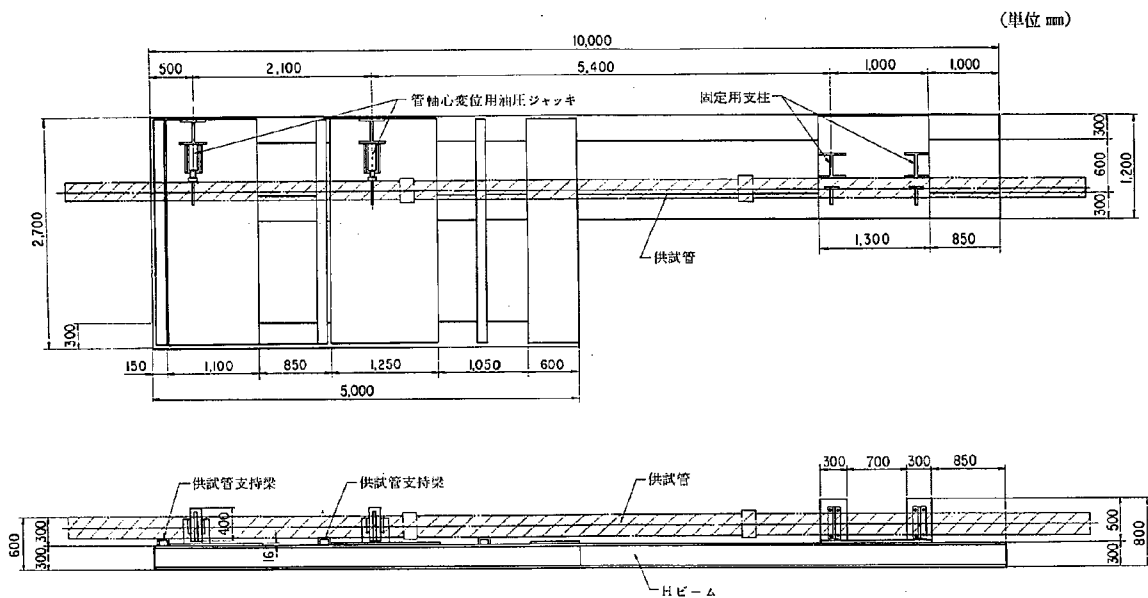


(b) 圧縮試験
図2 実験装置



(c) 曲げ試験

図2 実験装置



(d) 管軸心変位試験

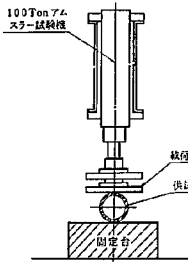
図2 実験装置

① 二軸歪ゲージの場合

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\varphi} &= \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_{\varphi} + \nu \varepsilon_z) \\ \sigma_z &= \frac{E}{1 - \nu^2} (\varepsilon_z + \nu \varepsilon_{\varphi}) \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(1)$$

② 一軸歪ゲージの場合

$$\sigma_z = E \varepsilon_z \dots\dots\dots(2)$$



(c) 環片圧壊試験
図2 実験装置

σ_{φ} ; 円周方向応力 (Kg/mm²), σ_z ; 管軸方向応力 (Kg/mm²)
 ε_{φ} ; 円周方向歪 ε_z ; 管軸方向歪
 E ; 縦弾性係数 (Kg/mm²) ν ; ポアソン比

であり、Eおよび ν は表3の値を仮定し用いた。

表3 縦弾性係数およびポアソン比

	SP	DI	RC	AC	PVC
$E (\times 10^4) \text{ Kg/mm}^2$	2.1	1.6	0.2	0.26	0.027
ν	0.3	0.3	0.16	0.23	0.37

(3) 屈曲角度および伸縮量の測定

屈曲角度を算定するための変位 u の測定には、TECLOCK製のダイヤルゲージおよびスチールテープを用いた。

伸縮量については歪ゲージ式変位計（共和電業製DT-100A）を用いた。

(4) 供試管と架台間の摩擦係数の測定

引張試験、圧縮試験および管軸心変位試験における供試管とそれを載せる架台間の摩擦抵抗の低減は、架台上にグリスを塗布することによって行った。結果の整理に、摩擦力を考慮するため、図3のようにして摩擦係数の測定を行った。その結果を表4に示す。

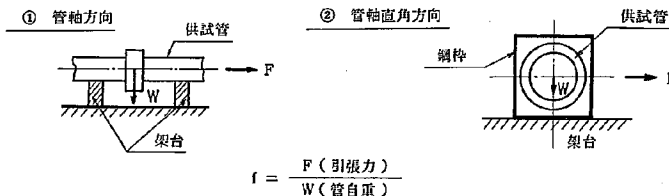


図3 摩擦係数 f の測定方法

表4 摩擦係数fの測定値

	供試管	架 台	静止摩擦係数	動摩擦係数	備 考
① 管軸方向	SP	木 材	0.34	0.31	引張および圧縮試験
	DI	"	0.29	0.28	
	RC	"	0.17	0.14	
	AC	"	0.21	0.20	
	PVC	"	0.20	0.17	
② 管軸直角方向	SP、DI	銅	0.22	0.16	管軸心変位試験
	RC	"	0.16	0.15	
	AC	"	0.14	0.13	
	PVC	"	0.22	0.16	

3.4 実験手順

3.4.1 強制変位

実験は変位強制とした。管長と管径によって、事前に目標とした強制変位を、表5のように定めた。この表で引張試験、圧縮試験および管軸心変位試験の場合のLは供試管の全長を示しており、曲げ試験の場合は供試管を支えている支持点の間隔を示している。さらに、dは供試管の管体の口径を示す。

表5 目標とした強制変位 (単位mm)

実 験	供試管	強 制 変 位 の 目 標 値 u		
		u_1	u_2	u_3
引 張 圧 縮	SP	$0.01L$	$0.01L$	$0.01L$
	DI	3	2	
	RC			
	AC	≈ 34	≈ 50	≈ 100
	PVC			
曲 げ	SP	$\frac{L}{d} \approx 30$	$\frac{2L}{d} \approx 60$	$\frac{3L}{d} \approx 90$
	DI			
	RC	≈ 15	≈ 30	≈ 45
	AC PVC	≈ 30	≈ 60	≈ 90
管軸心変位	SP	$\frac{L}{d} \approx 34$	$\frac{2L}{d} \approx 67$	$\frac{3L}{d} \approx 100$
	DI	≈ 32	≈ 63	≈ 95
	RC	≈ 15	≈ 30	≈ 45
	AC	≈ 30	≈ 60	≈ 90
	PVC	≈ 26	≈ 52	≈ 78
環 片 圧 壊	SP	$0.1d$	$0.1d$	$0.1d$
	DI	3	2	
	RC			
	AC PVC	≈ 6.6	≈ 10	≈ 20

3.4.2 手 順

(1) 引張試験

図2(a)に示すように、Uバンドで供試管の一端を試験設備のフレームに固定し、他端をロードセルを介し油圧ジャッキを用い引張力を作用させた。

(2) 圧縮試験

図2(b)に示すように、供試管の一端の載荷方向の変位を拘束し、他端を油圧ジャッキを用い圧縮力を作用させた。クランプの間隔は供試管の種類によって適宜定めた。なお、供試管と油圧ジャッキの間のディスタンスピースの加工および製作には特に注意を払い、偏心荷重が加わらないよう留意し、試験を行った。

(3) 曲げ試験

図2(c)に示すように、供試管を支えている点を結んだ線を水平の基準とし、二点載荷によって試験を行った。D IおよびACの試験の場合、自重および載荷台の重量によって供試管の屈曲が予想されたため、図のように終手直下に油圧ジャッキを挿入し、油圧ジャッキを数回ずつ下げ試験を行った。なお、自重および載荷台の重量を支える状態になったのちは、アムスラー試験機を用い、載荷した。載荷速度は10～15 Kg/s とほぼ一定に保った。

(4) 管軸心変位試験

図2(d)に示すように固定用支柱で供試管の一端を試験設備のフレームに固定し、載荷点側の管軸心が固定端側管軸心と平行になるように、水平面上で載荷した。

(5) 環片圧壊試験

図2(e)に示すように、供試管を水平な固定した台上置き、管断面が偏平になるよう、鉛直に荷重を10～15 Kg/s の速さで載荷した。載荷板と固定した台の間隔を随時測定するとともに、管断面の偏平の形状も調べた。

4 実験結果

4.1 結果の図表

各試験の荷重と変位の関係を示すと図4のようになる。引張試験および圧縮試験の管体に生じた代表的な管軸方向歪と変位の関係を示すと図5(a)のようになる。曲げ試験の継手における管軸方向歪と変位の関係および円周方向歪と変位の関係を示すと図5(b)のようになる。管軸心変位試験における管体に生じた管軸方向歪と変位の関係および継手に生じた管軸方向歪と変位の関係を示すと図5(c)のようになる。環片圧壊試験の円周方向歪と変位の関係を示すと図5(d)のようになる。引張試験および圧縮試験における最大の伸縮を生じた継手の継手伸縮量と変位の関係を示すと図6(a)のようになる。曲げ試験における継手上部の継手縮みおよび継手下部の継手伸びと変位の関係を示すと図6(b)のようになる。引張試験および圧縮試験のPVCの破壊の性状を示すと図7(a)および(b)のようになる。

4.2 引張および圧縮試験の結果

4.2.1 荷重～変形について

図4(a)から引張試験のSPの最大荷重はほぼ120 Ton、圧縮試験の場合はほぼ75 Tonである。SPの場合引張試験で供試管全長のほぼ1.4%、および圧縮試験でほぼ1.0%の変位を生じている。図中におけるSPの圧縮荷重と変位の関係で、降伏点(変位は20 mmの時)を超え、変位の増加とともに荷重が漸減している理由は、管中央で圧縮座屈を起こしているためである。DIについては、継手がメカニカル形式のため、ほとんど引張荷重に抵抗せず、圧縮荷重に対してのみ抵抗し、圧縮荷重の最大値は、今回試験した供試管中の最大の135 Ton(変位は50 mmの時)を示す。DIの引張試験における継手の完全な抜け出し時の変位は、供試管全長のほぼ0.8%である。圧縮試験の圧縮座屈時の場合はほぼ0.3%である。RCの圧縮試験の場合他の供試管に比べ、継手破壊時の変位が極めて小さいことが特徴的である。その時の変位は供試管全長のほぼ0.10%であり、この時の荷重すなわち耐力はほぼ18 Ton(実験1回目) またはほぼ10 Ton(実験2回目)と小さい。ACについては、カラーを用いたスリップオン形式の継手のために、ほとんど引張荷重に力で抵抗できるものではないが、圧縮荷重に対しては、ほぼ53 Ton(実験1回目、変位は50 mmの時)およびほぼ40 Ton(実験2回目、変位は28 mmの時)の耐力を示している。図4(a)におけるACの圧縮荷重と変位の関係で、変位20 mm(実験1回目)および15 mm(実験2回目)まで圧縮荷重が0である理由は、継手に変位を吸収する呑み込み量があるためである。PVCの引張荷重と変位の関係および圧縮荷重と変位の関係はほぼ線型関係で示される。破壊は継手に起こり、引張試験の場合のその時の変位は供試管長のほぼ0.8%(実験1回目)および0.7%(実験2回目)である。圧縮試験の場合は、実験1回目および2回目ともほぼ0.95%である。

4.2.2 歪および伸縮量について

図5(a)の管軸方向歪は、管中央の管体歪である。SPの場合、引張歪は、最初にはほぼ線型的増加を示しているが、圧縮歪は6000 μ 近傍で非線型的増加を示している。さらに6000 μ を超え、9000 μ 近

傍ではほぼ横ばい状態を示しているが、これは管中央で局部座屈し、管全体として大きなたわみ変形を生じたためである。一方、D IおよびA Cの圧縮歪は指数関数的増加の傾向を示し、D Iの最大圧縮歪がA Cの最大圧縮歪のはば1.3倍となっている。これは継手の構造および材質強度の相違による。P V Cの引張歪および圧縮歪は、変位の増加とともに、ほぼ線型的増加の傾向を示す。

図6(a)は、供試管の最大の伸縮を生じた継手の継手伸縮量と変位の関係を示したものである。この図から判るように、D I、R CおよびA Cの継手の伸びの最大値は、変位のはば7.6% (D IおよびR C) および9.7% (A C) を示し、ほとんど一箇所の継手で抜け出しが生じていることを示している。継手近傍の平均歪に換算するとほぼ1.5% (D I)、1.6% (R C) および1.3% (A C) となる。継手の縮みは、D Iが最も大きく、変位のはば1.7%を示す。継手近傍の平均歪に換算するとほぼ3%となる。

4.2.3 変形および破壊の性状

供試管別に変形および破壊の性状をまとめると次のようになる。

- (1) S P 引張試験の場合、変位はば1.5 mmで、継手に局部的な塑性変形を生じた。クラックは生ぜず、140 mmまで変形が増大し、この状態がさらに続く状況下にあった。圧縮試験の場合、変位はば1.5 mmで、管中央に局部座屈が生じ、近似的に管全体としてオイラーの一次の座屈形で長柱座屈した。継手にクラックは生ぜず、管中央の斜め下側で窪みがみられた。
- (2) D I 引張試験の場合、継手で完全に抜け出した。圧縮試験の場合、S Pと同様長柱座屈した。管中央の窪みは湾曲した管の真下に生じ、クラックはみられなかった。
- (3) R C 引張試験の場合、変位はば10 mmで継手のカラーと管を接合しているモルタルが剥離した。その後、変位はば90 mmで完全に抜け出した。圧縮試験の場合、載荷方向側から、継手のカラーにクラックが生じた。最終的に、載荷点に最も近い継手のカラーが完全に破断した。
- (4) A C 引張試験の場合、継手のカラーにとりつけられているゴム輪から、完全に抜け出した。圧縮試験の場合、継手で管端が喰い込み合い、それによる管軸心の変位によって、カラーに円周方向の引張応力が生じ、最終的にカラーが破断し飛散した。
- (5) P V C 引張試験の場合、継手の受口の部分、特に管断面が漸削していく部分にクラックが集中し、載荷点に最も近い継手が完全に破壊した。図7(a)に破壊の性状を示す。一方、図7(b)に、圧縮試験の場合の破壊の性状を示す。この図から判るように、クラックが管体にも生じているが、最終的に引張試験の場合と同様、受口の部分のクラックの集中によって破壊に至っている。したがって、受口と差口の接着強度は継手における管の材料強度より大きく、引張荷重および圧縮荷重が作用するような場合、継手の受口の漸削部が弱点となりやすい。

4.3 曲げ試験の結果

4.3.1 荷重～変形について

図4(b)から、S Pの荷重と変位の関係は、変位はば2.5 mm (屈曲角度に換算して 0.96°)まで線形的増加の傾向を示す。弾性限度(変位はば5.0 mm)における荷重はほぼ4 Ton、曲げモーメントに換算し

て5 Ton・Mである。その後、荷重は変位はば360 mm (13.6°)まで漸増し、継手で局所的な塑性変形を生じた。しかし、クラックはみられず流体輸送の機能は十分保ち得るものであった。SP以外の供試管の最大荷重については、いずれも2 Tonに満たない小さなものであった。図のDIの場合、変位はば100 mm (3.9°、実験1回目)、160 mm (6.2°、実験2回目)から荷重の漸増がみられるが、この理由は継手の差口の管外面と受口の管内面に摩擦が生じ、抜け出し抵抗として働いているためである。RCについては、変位はば20 mm (1.5°)で、継手のカラーと管を接着しているモルタルが剥離し、以後、荷重は増加していない。ACについては、載荷台と自重によって継手が屈曲する状況下にあったので、ほとんど荷重の増加はみられずはば一定である。PVCの荷重は、変位の増加とともに、線型的増加の傾向を示す。図4(b)の最大変位時における屈曲角度を供試管別に算定してみると次のようになる。

SP : 13.6°(実験1、2回目)

DI : 12.9°(実験1、2回目)

RC : 1.9°(実験1、2回目)

AC : 15.6°(実験1回目)、9.5°(実験2回目)

PVC : 13.6°(実験1、2回目)

4.3.2 歪および伸縮量について

図5(b)の管軸方向歪および円周方向歪は、管中央の継手の下部に生じた歪である。SPおよびPVCの最大歪の管軸方向歪対円周方向歪の比は、はば1.0 : 0.74 (SP) および1.0 : 0.46 (PVC)となる。DI、RCおよびACの最大歪は、1000 μ 以下と小さい。

図6(b)は継手下部の伸びと変位の関係および継手上部の縮みと変位の関係を示したものである。図から判るように、継手下部の伸びと継手上部の縮みは一致せず、DIを除けば前者が後者より大きい。また、同一の屈曲角度でも、管断面の局部変形 (SPおよびPVCの場合) または継手の抜け出し (DI、RCおよびACの場合) があるため、供試管によって継手下部の伸びおよび継手上部の縮みは異なる。

4.3.3 変形および破壊の性状

供試管別に変形および破壊の性状をまとめると次のようになる。

- (1) SP 継手上部に局所的な塑性変形を生じたが、クラックはみられなかった。載荷点近傍で管外径のはば4.6%の扁平化がみられた。
- (2) DI 継手で屈曲角度12.9°まで屈曲し、塑性変形およびクラックはみられなかった。
- (3) RC 継手のカラーおよび管を接着しているモルタルが剥離し、カラーの上部および横部にクラックが生じた。クラックは横部に集中した。
- (4) AC 継手のカラーの上部にY字状のクラックが生じ、カラーが完全に破断した。
- (5) PVC 弾性変形し、管体および継手にクラックはみられなかった。

4.4 管軸心変位試験の結果

4.4.1 荷重～変形について

図4(c)から判るように、管軸直角方向から荷重が作用した場合のSPの耐力は、ほぼ7 Ton(実験1回目)および6 Ton(実験2回目)である。DI、RC、ACおよびPVCの耐力は1.5 Tonを越えずSPに比べ小さく、地震時においても力による抵抗は期待できない。しかし、DI、RC、ACおよびPVCの変位は、固定端と載荷点の長さのほぼ7.9%(DI)、10%(AC)および9.6%(PVC)の変位は生じうる。

4.4.2 歪について

図5(c)の管軸方向管体歪は、固定端側の横部載荷方向側の歪であり、管軸方向継手歪は、載荷点側の横部載荷方向側の歪である。SPおよびPVCの最大の継手歪は管体歪のほぼ67%(SP)および24%(PVC)と低減されている。RCの管体歪および継手歪はほぼ200 μ 、ACはほぼ零である。

4.4.3 変形および破壊の性状

SPの場合、固定端側の管体および載荷点側の継手で局所的な塑性変形を生じた。しかし、固定端側の継手に特に異常はみられなかった。DIの場合は継手の抜け出し、RCおよびACの場合は継手カラーの破壊、PVCの場合は試験装置の機能限界まで弾性変形した。

4.5 環片圧壊試験の結果

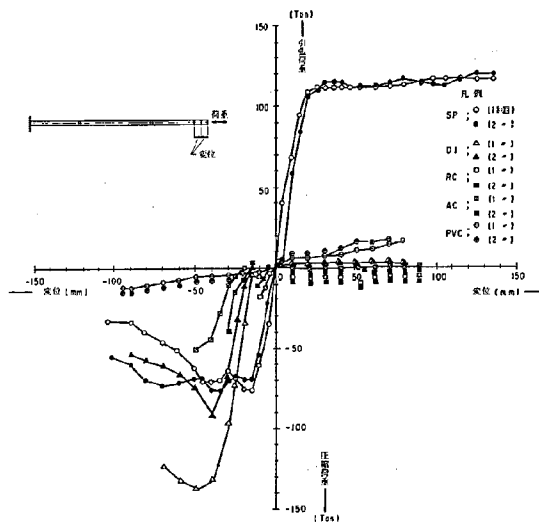
4.5.1 荷重～変形について

図4(d)は、圧壊荷重が加わった場合の荷重と変位の関係である。図中の最大変位時に、破壊が生じた供試管は、RCおよびACである。その時の荷重すなわち耐力は、RCではほぼ1.5 Ton(実験1、2回目変位はほぼ1 mmの時)、およびACではほぼ5.6 Ton(実験1回目、変位2 mmの時)、6.8 Ton(実験2回目、変位はほぼ2 mmの時)である。SPおよびDIについては、クラックが生ぜず塑性変形した。RCで外径のほぼ0.4%、ACで外径のほぼ0.8%、SP、DIおよびPVCで外径のほぼ1.2%の最大変位を生じていることが判る。

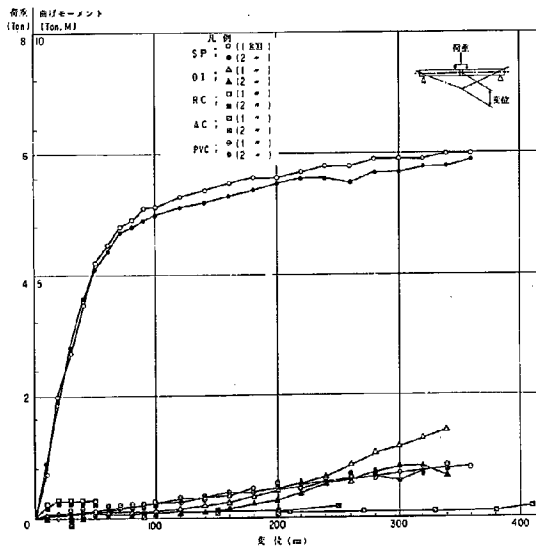
4.5.2 歪、変形および破壊の性状

図5(d)は、載荷点の円周方向歪と変位の関係である。RCおよびACの最大歪が、他に比べ、極めて小さい。

RCおよびACの場合、内面に長手方向の縦クラックが生じ縦割れした。SP、DIおよびPVCの場合、管断面が楕円状に塑性変形した。

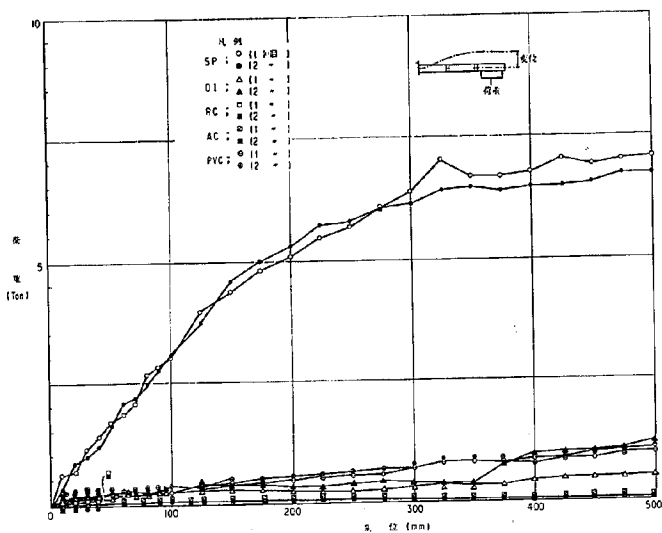


(a) 引張試験および圧縮試験

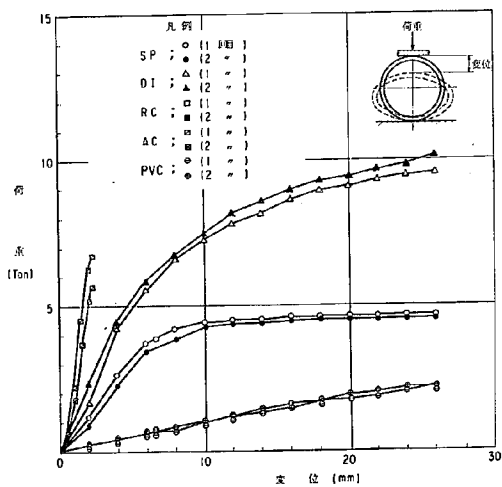


(b) 曲げ試験

図4 荷重と変位の関係

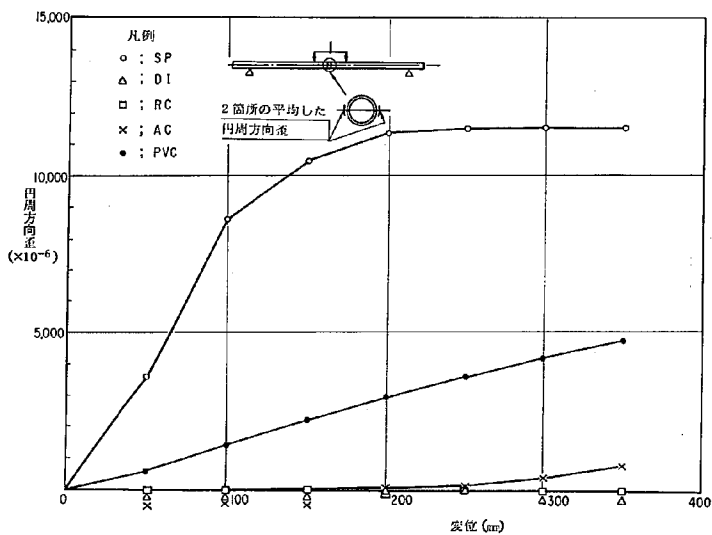
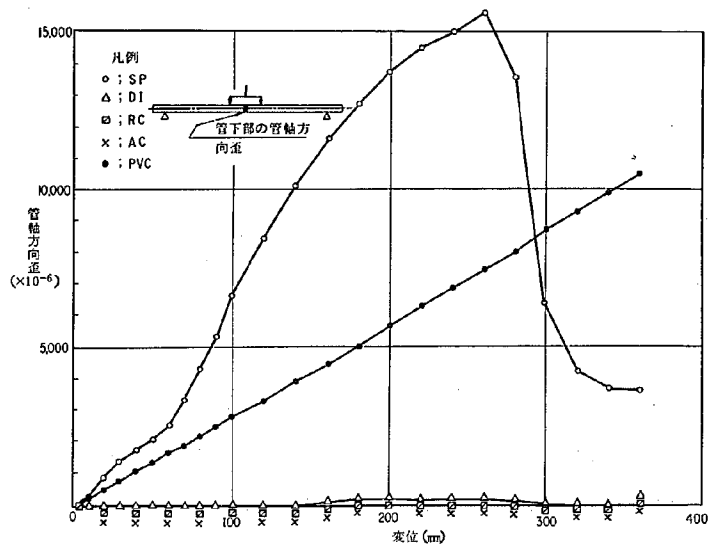


(c) 管軸心変位試験



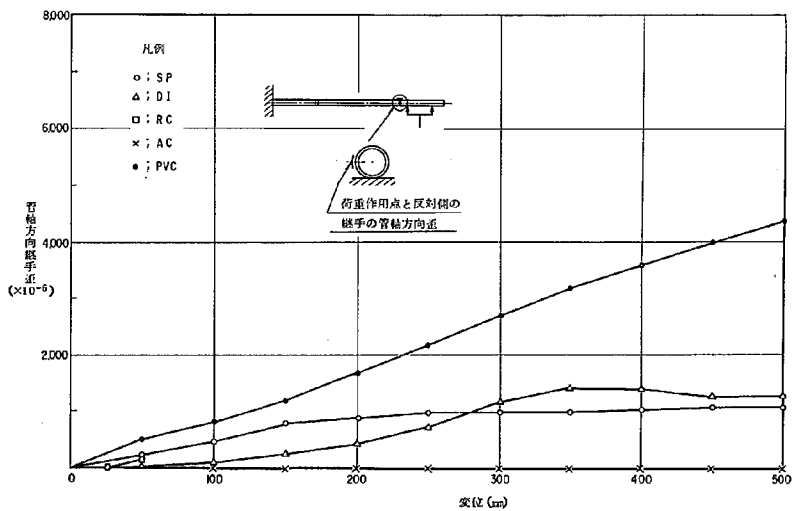
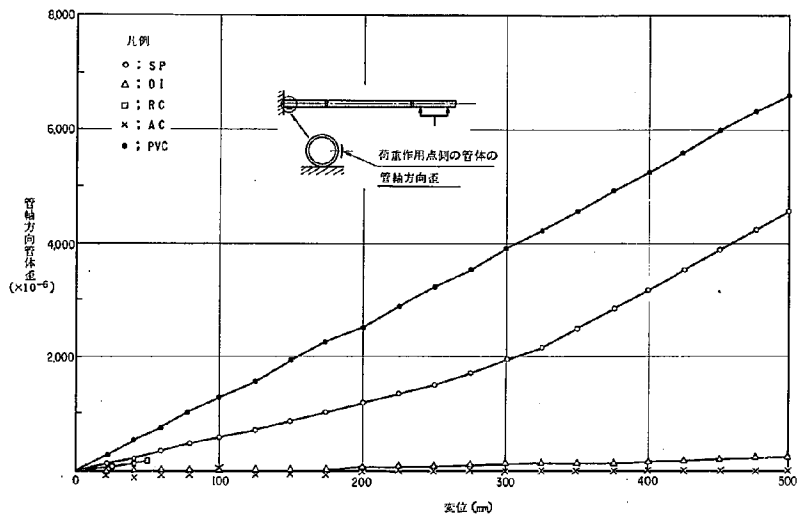
(d) 環片圧壊試験

図4 荷重と変位の関係



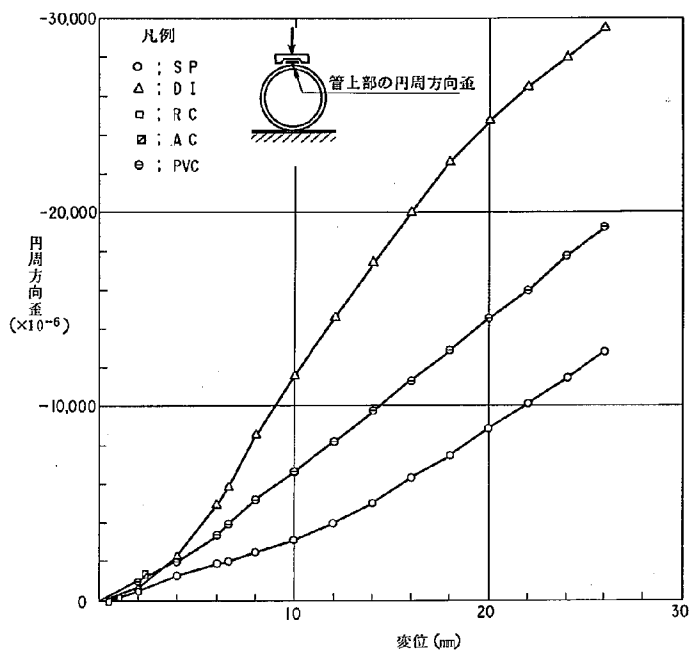
(b) 曲げ試験

図5 歪と変位の関係



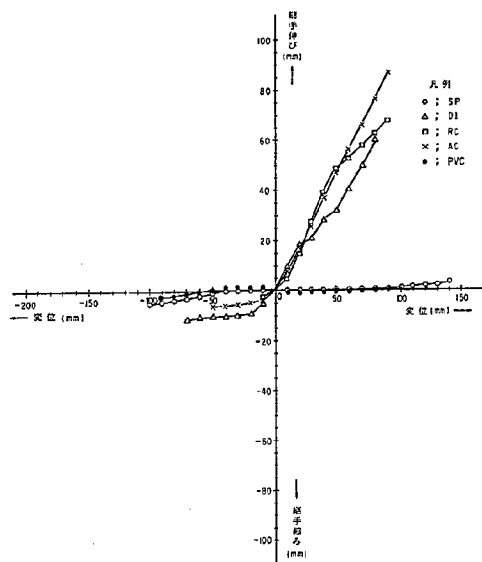
(c) 管軸心変位試験

図5 歪と変位の関係

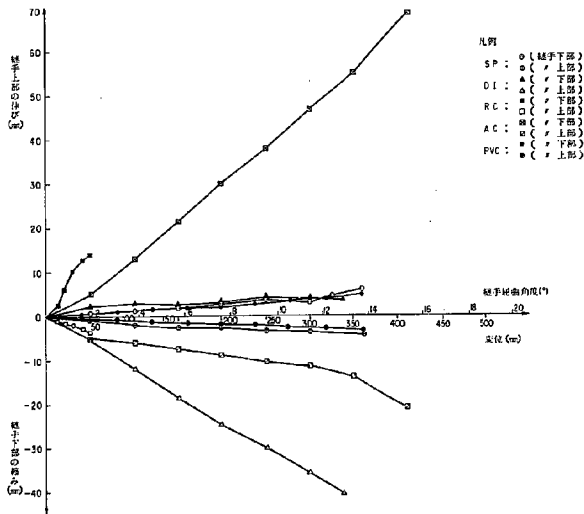


(d) 環片圧壊試験

図5 歪と変位の関係

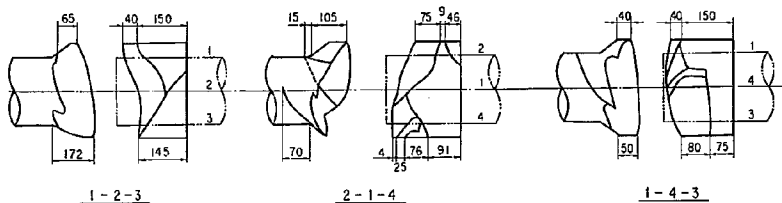
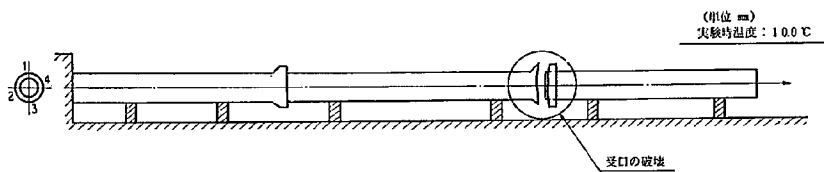


(a) 引張および圧縮試験

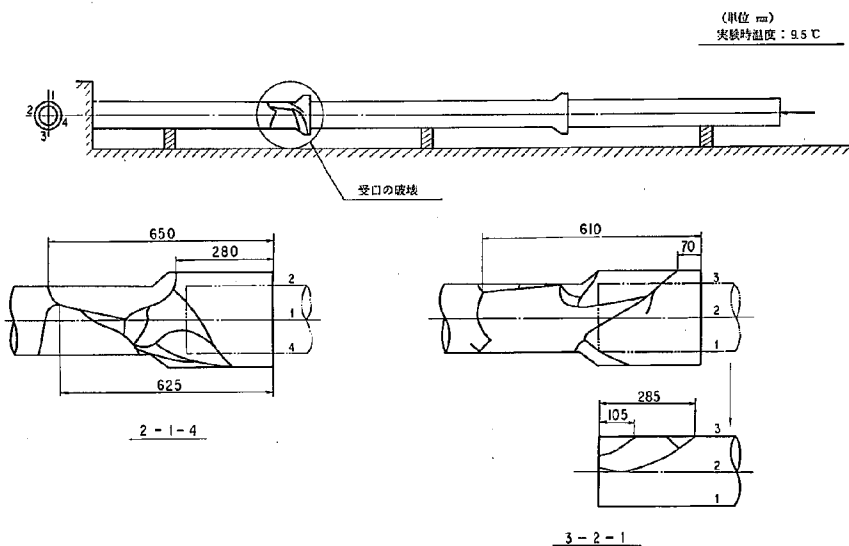


(b) 曲げ試験

図6 継手伸縮量と変位の関係



(a) 引張試験



(b) 圧縮試験

図7 PVCの破壊の性状

5 SPおよびPVCの単純な理論による推定値と実験値

SPおよびPVCの弾性領域における荷重と変位の関係、および、単純な理論による応力算定のための推定式は次のとおりとなる。

(1) 引張試験の場合

$$P = \frac{EA}{L} u \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\sigma = \frac{E}{L} u \quad \dots\dots\dots (4)$$

(2) 圧縮試験の場合

$$P = \frac{EA}{L} u \quad \dots\dots\dots (5)$$

$$\sigma = -\frac{E}{L} u \quad \dots\dots\dots (6)$$

(3) 曲げ試験の場合

$$P = \frac{96EI}{(L-\ell)(2L(L+\ell)-\ell^2)} u \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$\sigma = \pm \frac{24E\eta}{\{2L(L+\ell)-\ell^2\}} u \quad \dots\dots\dots (8)$$

(4) 管軸心変位試験の場合

$$P = \frac{12EI}{L^3} u \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$\sigma = \pm \frac{6E\eta}{L^2} u \quad \dots\dots\dots (10)$$

(5) 環片圧壊試験の場合*

$$P = 107.53 \frac{EI}{d^3} u \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$\sigma = 58.11 \frac{EI}{Ad'^3} \left(1 + \frac{1}{k} \frac{\eta}{\frac{d'}{2} + \eta}\right) u \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$k = -\frac{1}{A} \int \frac{\eta}{\frac{d'}{2} + \eta} dA = -1 + \frac{d'}{2t} \ln \left(\frac{d'+t}{d'-t} \right)$$

ここに

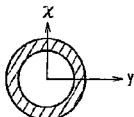
P : 荷重 (Ton)

σ : 応力 (Ton/m²)

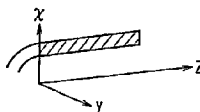
E : 縦弾性係数 (Ton/m²)

A : 断面積 (m²)

(1)~(4)の場合



(5)の場合



u : 変位 (2ページ(2)参照) (m)

L : 供試管全長 ((1)および(2)の場合)、供試管を支えている支持点の間隔 ((3)の場合) または固定端から荷重載荷点までのスパン長 ((4)の場合) (m)

I : y 軸に関する断面二次モーメント ((1)~(4)の場合) または z 軸に関する断面二次モーメント ((5)の場合)

ℓ : 載荷点の間隔 (m)

η : y 軸または z 軸から応力を求める層までの距離 (m)

d' : 供試管の $x-y$ 断面の平均直径 (m)

t : 供試管の厚さ (m)

k : 曲がりばりの断面係数

図8は上式による推定値と実験値とを比較したものである。引張試験と曲げ試験はほぼ一致している。圧縮試験の場合、荷重の実験値が推定値のはば5.0% (SP) および3.5% (PVC) と小さいが、これは微小変位で、すでに管が湾曲していることを示すものである。同様に、環片圧壊試験の実験値も推定値より小さい。

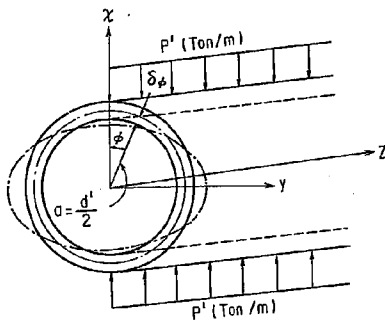
ここで、縦軸に α = 実験値 (荷重) / 推定値 (荷重) をとり、横軸に変位をとって図に示すと図9のようになる。継手を有するため、 α は試験の種類および変位によってバラツクが、SPおよびPVCの管軸心変位試験を除き2.0より小さい。一方、応力の比較をすると表6のようになる。

* (iii) および (ii) 式の誘導

一般に、図のような単位長さの環片

表6 推定応力と測定歪により求めた応力

実 験	管 種	応 力 (Kg/mm ²)		強制変位量 (mm)
		推 定 値	実 測 値	
引 張 試 験	SP	4.2	3.5	2.0
	PVC	2.7	1.0	1.0
圧 縮 試 験	SP	-2.8	-1.9	1.0
	PVC	-2.3	-2.2	1.0
曲 げ 試 験	SP	3.3	4.7	5.0
	PVC	0.8	1.3	1.0
管軸心変位試験	SP	3.0	4.5	1.0
	PVC	0.65	4.6	1.0
環片圧壊試験	SP	7.2	2.2	6
	PVC	2.09	1.38	1.2



に、一組みの等分布荷重 P' (Ton/m) が作用する場合、管断面は図のように変形する。 x 軸から ϕ の角の管中心線の変位を δ_ϕ とし、 δ_ϕ を次のような余弦級数で仮定すると、

$$\delta_\phi = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos 2n\phi \quad (13)$$

環片に貯えられる歪エネルギーは、曲げ剛さを $E I_z$ とし、曲げ変形のみを考慮して次のように与えられる。

$$U = \frac{E I_z}{2 a^3} \int_0^{2\pi} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} a_n (4n^2 - 1) \cos 2n\phi \right\}^2 d\phi = \frac{\pi E I_z}{2 a^3} \sum_{n=1}^{\infty} (4n^2 - 1)^2 a_n^2 \quad (14)$$

一方、 P' のなす仕事 W は次式のように与えられるので、

$$W = 2 P' \sum_{n=1}^{\infty} a_n \quad (15)$$

最小ポテンシャルエネルギーの定理から、 $\frac{\partial (U - W)}{\partial a_n} = 0$ とおいて、(14) 式の係数 a_n を求めると次式のようになる。

$$a_n = \frac{2 a^3}{\pi E I_z (4n^2 - 1)^2} P' \quad (16)$$

(16) 式を (13) 式に代入し、 δ_ϕ は次式のように求まる

$$\delta_\phi = \frac{2 a^3 P'}{\pi E I_z} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos 2n\phi}{(4n^2 - 1)^2} \quad (17)$$

したがって $\phi = 0$ のときは

$$\delta_{\phi=0} = \frac{d'^3 P'}{4 \pi E I_z} \cdot \frac{\pi^2 - 8}{16} \approx 0.00930 \frac{d'^3 P'}{E I_z} \quad (18)$$

となり、 $\delta_{\phi=0} = \frac{u}{2}$ および $P = \frac{P'}{2}$ であることに注意して、(11) 式が導かれる。

一方、曲げモーメント M_ϕ は、曲げ剛さ $E I_z$ と曲率変化 λ との積であるから次式のようになる。

$$M\phi = -E I_z \cdot \lambda = -E I_z \frac{1}{a^2} \left(\frac{d^2 \delta\phi}{d\phi^2} + \delta\phi \right) = \frac{2 a P}{\pi} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2 n}{4 n^2 - 1} \right)^2 \right. \\ \left. \cos 2 n \phi + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos 2 n \phi}{(4 n^2 - 1)^2} \right\} \dots\dots\dots (19)$$

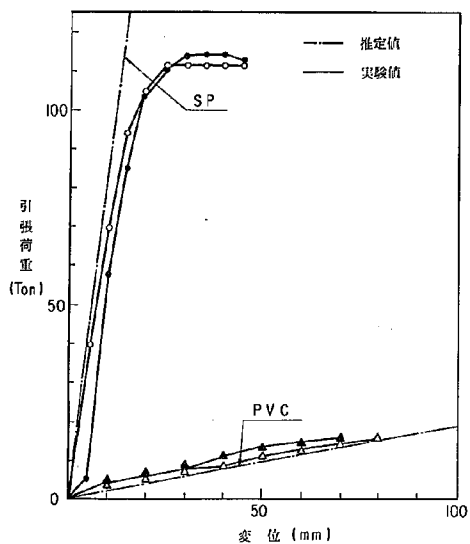
この $M\phi$ を用い、曲がりばりとして稜片の繊維応力 σ を求めると、次式のようになる。

$$\sigma = \frac{M\phi}{A_z a} \left(1 + \frac{1}{k} \frac{\eta}{a + \eta} \right) = \frac{2 P}{\pi A_z} \left\{ \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{2 n}{4 n^2 - 1} \right)^2 \cos 2 n \phi + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos 2 n \phi}{(4 n^2 - 1)^2} \right\} \left(1 + \frac{1}{k} \frac{\eta}{a + \eta} \right) \dots\dots\dots (20)$$

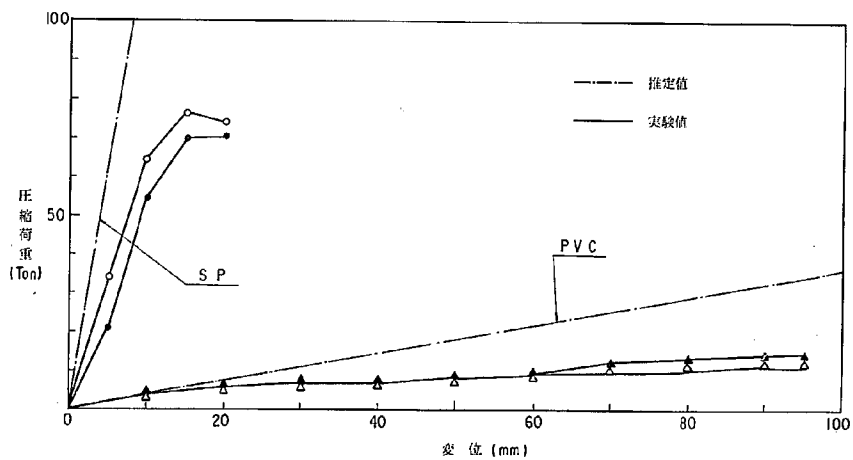
ここに

$$k = -\frac{1}{A_z} \int \frac{\eta}{a + \eta} d A_z = -1 + \frac{d'}{2 t} \ell n \left(\frac{d' + t}{d' - t} \right)$$

(20) 式に(11)式、 $n = 1, 2, \dots\dots 200$ 、 $\phi = 0$ および $a = \frac{d'}{2}$ を代入すれば(12)式が導かれる。

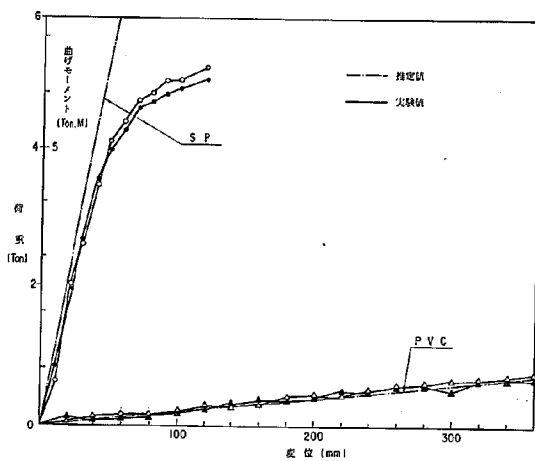


(a) 引張試験

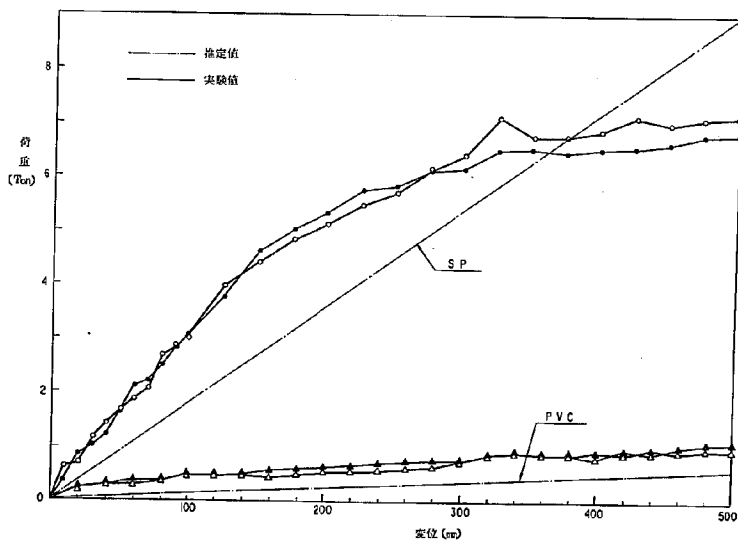


(b) 圧縮試験

図8 SPおよびPVCの推定値と実験値

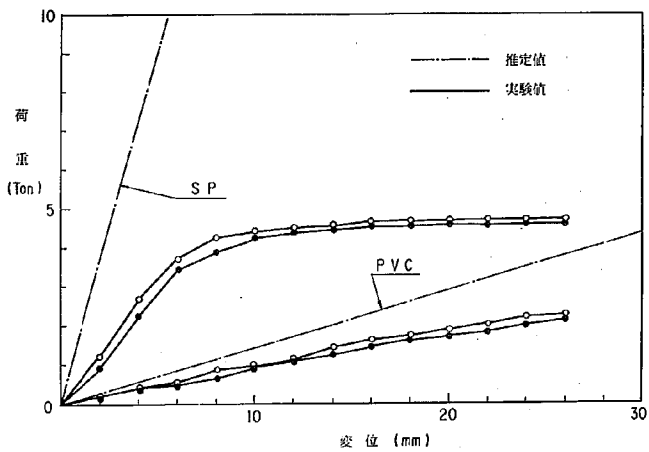


(c) 曲げ試験



(d) 管軸心変位試験

図8 SPおよびPVCの推定値と実験値



(c) 環片圧壊試験

図8 SPおよびPVCの推定値と実験値

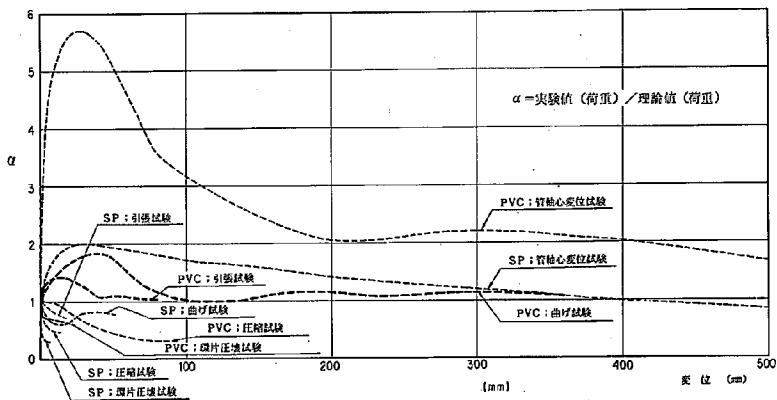


図9 SPおよびPVCの α と変位の関係

6 ま と め

a 今回実験した供試管の荷重と変

位の関係は、図10のように簡略化してまとめられる。图中×印の点は、弾性限界または変位限界にあたる点である。×印の点の荷重すなわち降伏耐力と、その点の変位を伸縮量または屈曲角度に換算した値すなわち変形性能を示すと表7のようになる。

b 強制変位の目標値 u_1 、 u_2 および u_3 時の供試管の性状については表8のようにまとめられる。

c SP（溶接継手）およびPVC（接着継手）の引張試験および曲げ試験の荷重と変位の関係はほぼ(3)式および(7)式と一致する。

圧縮試験および環片圧壊試験で示したように継手の有無、管強度および形状・寸法のバラツキのため実験値が推定値より低い値を示している例もある。

d 地震時に、地中埋設管に地盤変

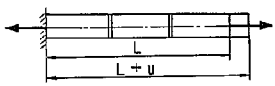
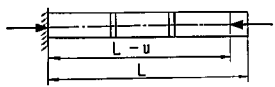
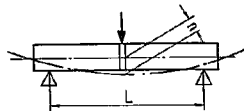
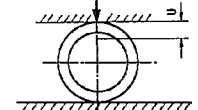
位と同等の変位を生じる変形性能があればより安全性が高められるが、ここで評価した耐力と変形性能はその際の一つの目安となりうる。

表7 降伏耐力と変形性能

実 験	供試管	降 伏 耐 力 (Ton)	変 形 性 能	
			伸縮量(%)	屈曲角度(°)
引 張 試 験	SP	110	0.18%	
	DI	1.2	0.8 "	
	RC	0.4	0.02 "	
	AC	0.1	0.9 "	
	PVC	16.7	0.7 "	
圧 縮 試 験	SP	73	0.15 "	
	DI	114	0.4 "	
	RC	13	0.1 "	
	AC	45	0.4 "	
	PVC	1.2	0.95 "	
曲 げ 試 験	SP	4	1.7°	
	DI	1.0	13.0° 以上	
	RC	0.3	0.3°	
	AC	0.16	13.0° 以上	
	PVC	0.8	13.0° 以上	
管軸心変位試験	SP	4.6	4.2°	
	DI	0.85	5.7° 以上	
	RC	0.1	0.4°	
	AC	0.05	7.1° 以上	
	PVC	1.0	5.5° 以上	
環片圧壊試験	SP	3.5	3.0 %	
	DI	5.9	3.0 "	
	RC	1.5	0.5 "	
	AC	5.9	1.0 "	
	PVC	2.2	13.0 "	

$$\begin{aligned} \text{引張試験および圧縮試験} &: \frac{u}{L} \times 100(\%) \\ \text{環片圧壊試験} &: \frac{u}{d} \times 100(\%) \end{aligned}$$

表 8 強制変位の目標値 D_1 , D_2 および D_3 時の供試管の性状

実 験	強制変位の目標値	供 試 管					実 験 方 法	備 考
		S P (格接継手)	D I (メカニカル 形式)	R C (スリップオン 形式)	A C (スリップオン 形式)	PVC (接着継手)		
引 張 試 験	$u_1 = 0.01 L / 3$	▲	●	×	●	●		●印は弾性変形かまたは 特に機能を損なうよう な変形がみられない場 合。 ▲印は局部的な塑性変形 かまたはたわみ変形を 生じたが機能を損な うまでには至らないと 認められる場合。
	$u_2 = 0.01 L / 2$	▲	●	×	●	●		
	$u_3 = 0.01 L$	▲	▲	×	▲	×		
圧 縮 試 験	$u_1 = 0.01 L / 3$	▲	●	×	×	●		●印は弾性変形かまたは 特に機能を損なうよう な変形がみられない場 合。 ▲印は局部的な塑性変形 かまたはたわみ変形を 生じたが機能を損な うまでには至らないと 認められる場合。
	$u_2 = 0.01 L / 2$	▲	▲	×	×	●		
	$u_3 = 0.01 L$	▲	▲	×	×	×		
曲 げ 試 験	$u_1 = L / d$	●	●	×	●	●		×印はクラック、破壊 および継手の完全な抜 け出しにより機能を 損なったと認められる 場合。
	$u_2 = 2 L / d$	●	●	×	●	●		
	$u_3 = 3 L / d$	▲	●	×	●	●		
管軸心変位試験	$u_1 = L / d$	●	●	×	●	●		×印はクラック、破壊 および継手の完全な抜 け出しにより機能を 損なったと認められる 場合。
	$u_2 = 2 L / d$	●	●	×	●	●		
	$u_3 = 3 L / d$	●	●	×	●	●		
環片圧壊試験	$u_1 = 0.1 d / 3$	●	●	×	×	●		×印はクラック、破壊 および継手の完全な抜 け出しにより機能を 損なったと認められる 場合。
	$u_2 = 0.1 d / 2$	▲	▲	×	×	●		
	$u_3 = 0.1 d$	▲	▲	×	×	●		

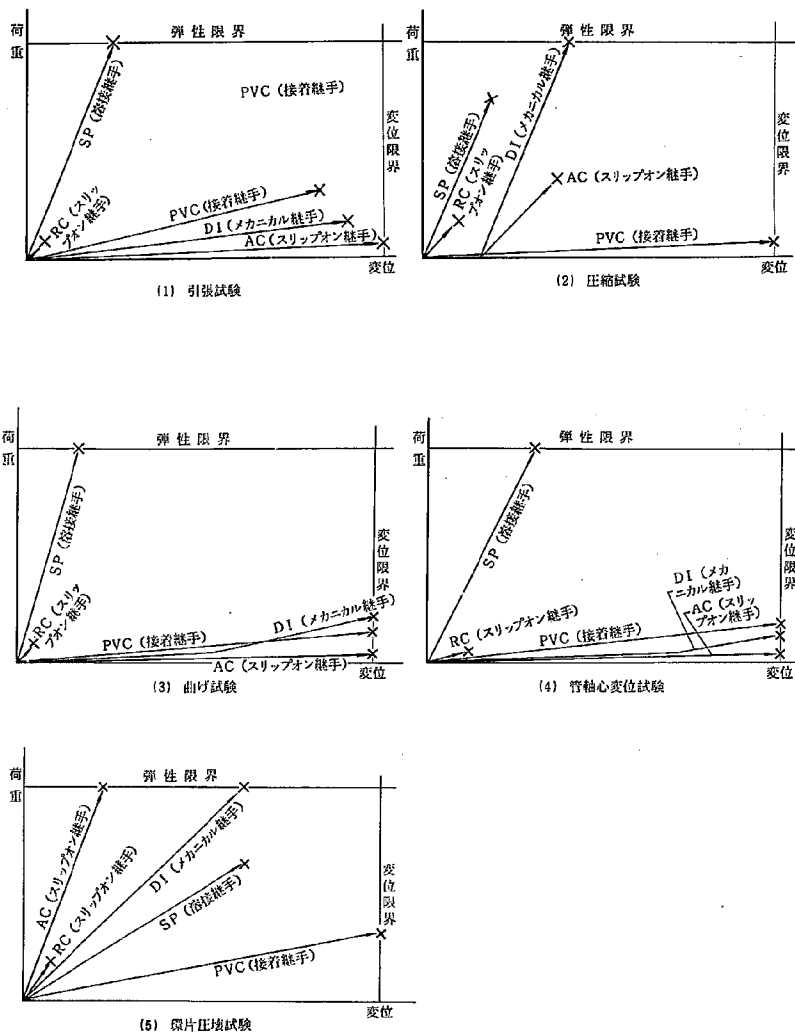


図 10 簡略化された荷重と変位の関係

7 謝 辞

実験の実施およびデータ整理には久保田鉄工株式会社が担当し、久保田鉄工株式会社パイプ技術研究所鉄管研究部北条貞宗課長および岩本利行主事には貴重な助言を得た。ここに、記して謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 関係 J I S 規格等
- 2) 建設省土木研究所資料第 1 0 3 7 号、昭和 4 9 年度総合プロジェクト（耐震）埋設管の耐震設計法（詳報）
- 3) 土岐他；埋設鉄管の地震時挙動についてのシミュレーション、土木学会、第 3 1 回講演集、工-242
- 4) 栗林他；地中埋設管の振動性状に関する実験的研究、土質工学会、埋設管に関するシンポジウム発表論文集、S. 50.10
- 5) 宮内他；パイプラインの終局耐力に関する実験的研究、第 1 1 回土質工学研究発表会、H-5、269
- 6) 中原一郎著、材料力学（下巻）、養賢堂版
- 7) 機学会、機械工学便覧
- 8) 財団法人国土開発技術研究センター、地下埋設管路耐震継手の技術基準（案）、昭和 5 2 年 3 月