

不定形シーリング材の耐久性に関する研究（第1報）

—圧縮セットについて—

松本 洋一

小野 正

丸一 俊雄

§ 1. はじめに

不定形シーリング材の役割は、第1にジョイント面に接着して水密性を保つことであり、第2にジョイントに生ずるムーブメントに追従し、第3に屋外の諸環境に曝されても前述の役割を維持することである。実際には第2、第3の役割は複雑に絡みあっているものと思われ、いわゆる耐久性の問題として検討する必要がある。しかし研究のステップとしては、まず第2の役割を検討し、次の第3の役割との絡みを明確にすることが妥当であると思われる。

建築物に使用されるシーリング材は夏季の高温環境では圧縮、冬季の低温環境では引張を受けることが容易に推察できる。K. K. Karpati 氏は高温圧縮、低温引張の繰返し試験は実際のシーリング材の挙動をもっともよく再現でき、その動的性能を判定するのに有効であると述べている。すなわち、長時間の圧縮を履歴すると拘束を解除後に復元するか、あるいは復元しない（圧縮セットが起こる）かが次に引張に転じた時に追従できるかどうかに関係し、シーリング材の耐久性を左右するものと思われる。

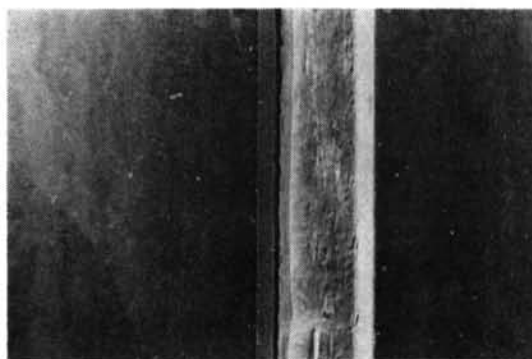
本研究はこのシーリング材の圧縮セットに着眼し、その程度および圧縮セット後の追従能力を知り、適切な使い方を提言しようとするものである。

§ 2. 圧縮セットをめぐる問題点

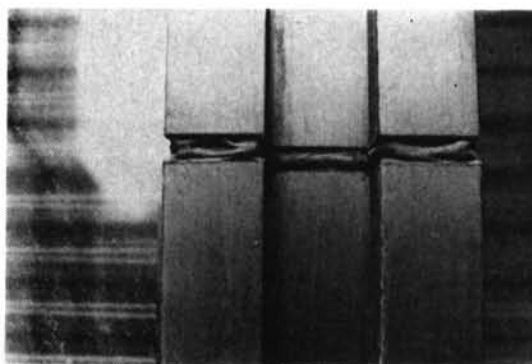
2.1 シーリング材の破断機構

ジョイントに充てんされて硬化後にゴム状を呈するシーリング材を静的な引張試験に供すれば、破断時の伸びは数百%以上を示す。しかし実際の建築物におけるジョイントムーブメントの量はその $1/10 \sim 1/100$ であるにもかかわらず、シーリング材は写真—1、2に示すごとく破断し漏水事故につながっている。これらのシーリング材の

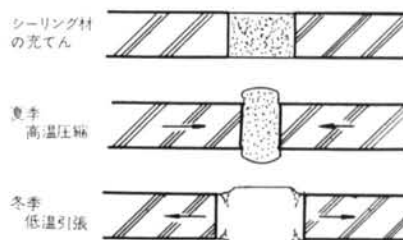
破断状況を詳細に検討してみると、中央部はふくらんでおり、圧縮から引張に転じたときに破断が起きている



写真—1 破断例（その1）



写真—2 破断例（その2）



図—1 シーリング材の破断機構

ことが推定できた。このような実態観察から、筆者らは図-1に示すシーリング材の破断機構を想定した。

すなわち、夏季において長時間にわたってシーリング材が圧縮を受けると応力緩和を起し、圧縮拘束が解除されても復元することができず、圧縮時の形状（ふくらんだ断面形状）のままにセットしてしまい、次に引張がかかった時に追従できず破断に至るものと考えた。

この破断機構を立証するために、シーリング材の圧縮セットの程度およびそれ以後の引張への追従能力を定量的に把握することが、シーリング材の耐久性を究めるアプローチの一部として必要である。

2.2 圧縮セットと施工時期

シーリング材のジョイントへの充てん（施工）時期はムーブメントの方向と大きな関係があり、概念としては年間を通して図-2に示す関係があると思われる。

夏季に施工した場合には、シーリング材は引張側だけのムーブメントを受けるが、夏季以外は圧縮側のムーブメントを履歴する。とくに冬季に施工した場合には、圧縮側だけのムーブメントとなる。したがって、シーリング材の圧縮セットは夏季を除いた施工時期の場合について問題となり、本報告の§3.で示す実験計画は、春季施工の場合に該当する。

§ 3. 実験計画

3.1 使用材料および試験体の作製

実験に用いたシーリング材5種とプライマーおよび被着体を表-1に示す。試験体の作製はJIS A 5757（建築用シーリング材の用途別性能）に準拠し、プライマー塗布後の2枚の被着体と2個のスペーサー（あらかじめテフロンなどを用いて離型しやすくしておく）を図-3に示すごとく組立て12×12×50mmの空間を作り、その空間にシーリング材を気泡の入らないように注意しながら充てんした。なお、作製時の環境条件は22℃、60%R.H.であった。

3.2 要因と水準および実験の手順

シーリング材が圧縮セットを受ける過程とその程度、また圧縮セット後の追従能力を把握するために表-2に示す要因と水準で、図-4に示す手順に従い実験を行った。

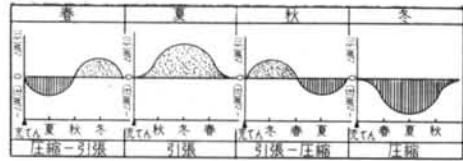


図-2 充てん時期とジョイントムーブメントの関係

記号	シーリング材	主剤:硬化剤	色	プライマー	被着体
P_a	2成分型 ポリサルファイド	20:1	グレイ	ウレタン系	アルミニウム 素地板
P_b	2成分型 ポリサルファイド	10:1	グレイ	ウレタン系	アルミニウム 素地板
S_1	1成分型 シリコーン	—	グレイ	シラン系	アルミニウム 素地板
S_2	2成分型 シリコーン	100:2.5	グレイ	シラン系	アルミニウム 素地板
U_2	2成分型 ウレタン	1:2	グレイ	ウレタン系	石綿 スレート板

表-1 使用材料

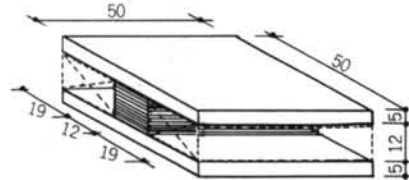


図-3 試験体の形状・寸法 (mm)

要因	水準				水準数
圧縮ひずみ (%)	0, 10, 20, 40				4
履歴温度 (℃)	20, 40, 60, 80				4
履歴時間 (hrs)	24, 168, 336, 672				4

(同一条件5個)

表-2 要因と水準

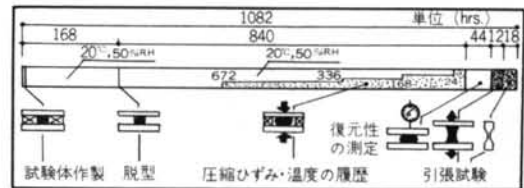


図-4 実験の手順

3.3 実験の方法

3.3.1 圧縮ひずみ・温度の履歴

所定の圧縮ひずみの拘束は、写真-3に示すごとく黄銅製のスペーサーと小型締具(万力)を用い、シーリング材に圧縮以外の力が働かないように配慮して固定した。固定した試験体は、JIS K 6301（加硫ゴム物理試験方法）の6.3「空気加熱老化試験」に基づくギヤー式老化試験機およびそれに準じた恒温槽を用いて、直ちに所定の温度および時間を履歴させた。

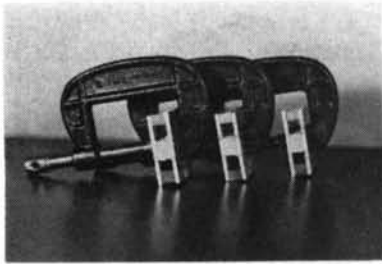


写真-3 圧縮ひずみの拘束

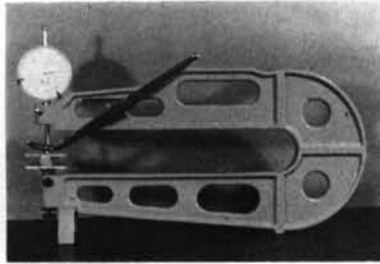


写真-4 復元性の測定

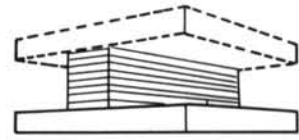


図-5 切断の方向

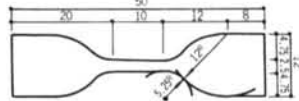


図-6 ダンベル型試験体の形状・寸法

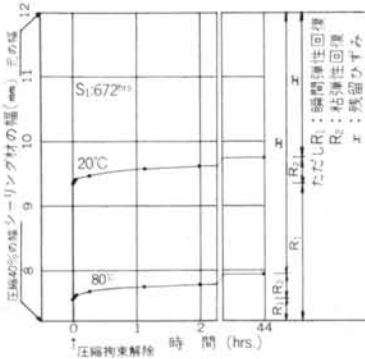


図-7 圧縮拘束解除後の回復曲線 (S₁)

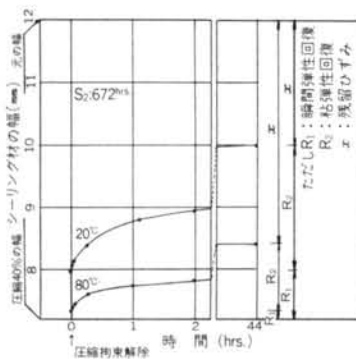


図-8 圧縮拘束解除後の回復曲線 (S₂)

3.3.2 復元性の測定

所定の圧縮ひずみ・温度・時間を履歴させた試験体をギヤ式老化試験機から取り出し、室温(22±1℃)に2時間放置した後、圧縮拘束を解除し、直ちに復元性を写真-4に示すようなダイヤルゲージ(1/100mm)を用いて経時的に44時間まで測定した。

3.3.3 引張試験(ダンベル型)

復元性を測定した試験体2個は、その後30時間以内に図-5に示すごとく厚さ1.5mmに切断し、図-6に示すダンベル型の試験体を得て、引張速度200mm/min、チャック間距離30mmの条件で引張試験を行なった。

3.3.4 引張試験(H型)

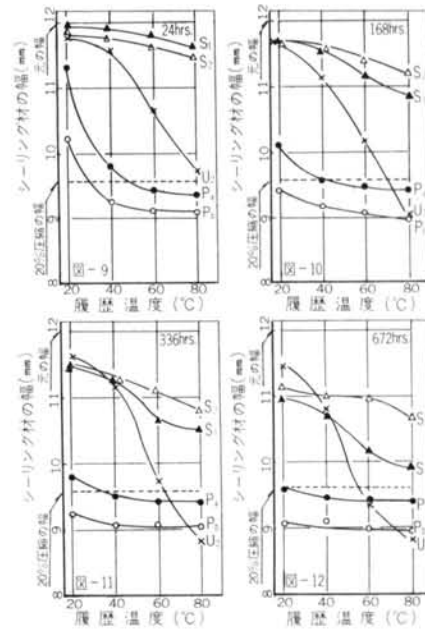


図-9~12 圧縮拘束解除後のシーリング材の幅

復元性を測定した試験体3個は、その後12時間以内にそのままの状態から島津社製オートグラフ IS 5000を用い、5mm/minの引張速度で破断に至るまで引張試験を行なった。なお、引張試験時の環境温度は22±1℃であった。

§ 4. 圧縮セットの程度

4.1 復元性

圧縮拘束を解除してから経時的に測定した復元量は、瞬間弾性回復と粘弾性回復(弾性余効)とにより構成され、それぞれの値はシーリング材の性質によって異なる。

一例としてシリコンの回復曲線を示せば図-7, 8のごとくであり, ほぼ同じ復元量を示しているが, 1成分型シリコンは瞬間弾性回復が大きいのに対し, 2成分型シリコンは粘弾性回復が大きい。

圧縮拘束を解除してから44時間後の復元性をシーリング材の幅によって示せば図-9~12のごとくであり, いずれのシーリング材も圧縮セットを起こしている。その傾向は圧縮ひずみ, 履歴温度・時間に関係し, それぞれの値が大きくなるほど圧縮セットの量(以下, 残留ひずみと呼ぶ)が増加している。

4.2 セット率

各シーリング材について, 導入した圧縮ひずみに対する残留ひずみの比率を式(1)によって求め, セット率として算出した。その結果を示せば表-3のごとくであり, ある履歴温度および履歴時間におけるセット率は, 導入した圧縮ひずみの大小にかかわらず, ほぼ同一の値であることが分かった。

$$\text{セット率(\%)} = \frac{\text{圧縮ひずみ(\%)} - \text{復元量(\%)}}{\text{圧縮ひずみ(\%)}} \times 100 \quad \dots\dots(1)$$

セット率と履歴時間・温度の関係を示せば図-13~17のごとくであり, いずれのシーリング材も, 履歴温度が上昇すればセット率は大きくなり, さらに履歴時間の増加に伴いほぼ直線的に大きくなっている。なお, P_a , P_b および U_2 はセット率が100%を越えている。これはシーリング材内部の気泡が高温環境を履歴すると, 写真-5に示す例のごとく透過してしまい, 体積が小さくなることによると考えられる²⁾。

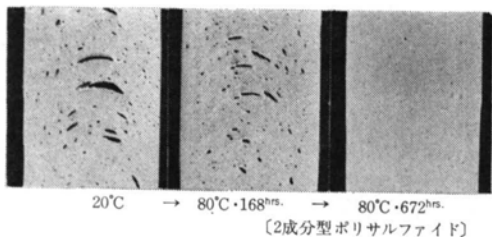


写真-5 気泡の消失過程

記号	履歴時間 (hrs)	20℃				40℃				60℃				80℃			
		10%	20%	40%	Av.	10%	20%	40%	Av.	10%	20%	40%	Av.	10%	20%	40%	Av.
P_a	24	74	74	102	83	129	115	109	118	146	120	110	125	142	121	112	125
	168	123	109	107	113	147	119	113	126	151	122	112	128	157	129	114	133
	336	130	116	110	119	147	123	112	127	157	120	111	129	154	124	114	131
	672	138	123	113	125	148	121	112	127	146	126	112	128	158	127	113	133
	P_b	24	13	29	56	33	85	91	102	93	110	106	103	106	120	109	105
168	58	76	93	76	104	103	101	103	108	106	103	106	113	109	104	109	
336	88	92	99	93	108	104	103	105	112	108	103	108	119	100	104	108	
672	103	100	102	102	108	107	102	106	116	107	103	109	113	109	104	109	
S_1	24	3	3	2	3	3	4	4	4	8	14	8	10	20	17	16	18
	168	13	13	12	13	22	19	19	20	44	37	35	39	59	49	46	51
	336	25	22	22	23	36	32	32	33	64	57	52	58	82	62	63	69
	672	46	44	47	46	62	55	57	58	91	77	76	81	105	113	85	101
	S_2	24	9	8	7	8	13	10	10	11	21	17	28	22	28	23	47
168	16	14	12	14	25	18	23	22	33	26	44	34	47	31	56	45	
336	26	21	19	22	41	31	41	38	32	38	57	42	53	50	66	56	
672	43	36	42	40	48	42	61	50	63	44	70	59	69	60	75	68	
U_2	24	8	11	8	9	32	19	19	23	67	21	49	46	122	95	92	103
	168	29	14	17	20	34	37	31	34	97	77	79	84	148	125	111	128
	336	15	16	18	16	44	34	38	39	113	95	95	101	153	132	112	132
	672	29	22	23	25	59	50	48	52	135	109	100	115	168	133	118	140

表-3 各シーリング材のセット率

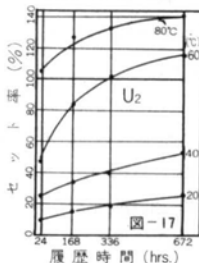
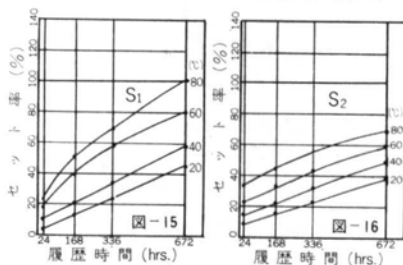
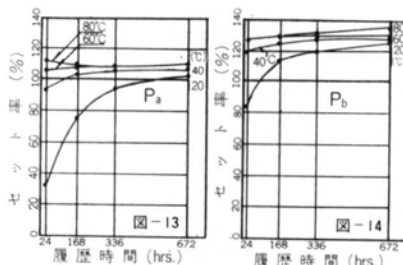


図-13~17 各シーリング材のセット率と履歴温度・時間の関係

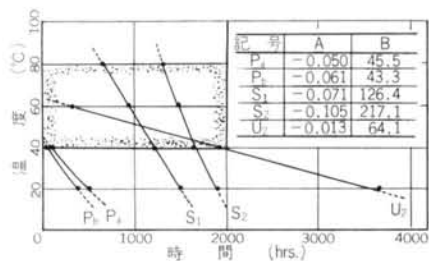


図-18 セット率100%になる条件

また、セット率100%、すなわち圧縮セットを完全に起こしてしまう条件(温度と時間)を、図-13~17に外挿法を適用して求めたところ、図-18に示す関係図を得た。いずれのシーリング材も、セット率100%になる条件は式(2)に示すごとく一次関数で表わされる。

$$T = At + B \quad \dots(2)$$

ここに、 T : 温度 (°C)

t : 時間 (hrs)

A, B : 定数

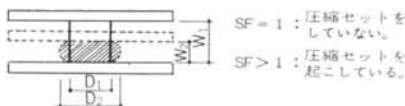
この関係式から、圧縮セットに関して望ましいシーリング材とはAの絶対値およびBの値が大きいものである。シリコンの場合にはAおよびBの値が大きいのに対して、ポリサルファイドはBの値が小さい。また、ウレタンはAの値が小さい。

4.3 圧縮セット後の形状変化

圧縮セットすることによってシーリング材の断面形状は変化し、その後の引張への追従能力に関係すると考えられるので、形状変化を定量化する必要がある。正確に圧縮セット後の形状をとらえることは難しく、ここではもっとも簡便な(測定が容易な)方法として式(3)により定量化した。

圧縮セット後の形状係数(SF)

$$SF = \frac{D_2/W_2}{D_1/W_1} = \frac{D_2W_1}{D_1W_2} \quad \dots(3)$$



SF = 1 : 圧縮セットをしていない。
SF > 1 : 圧縮セットを起こしている。

算出した圧縮セット後の形状係数を表-4に示す。この形状変化と追従能力の関係は5.3.2で後述する。

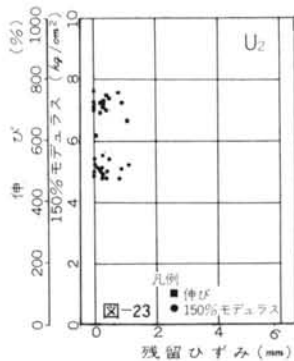
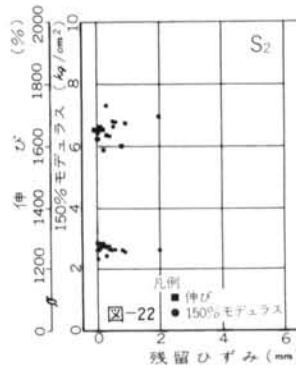
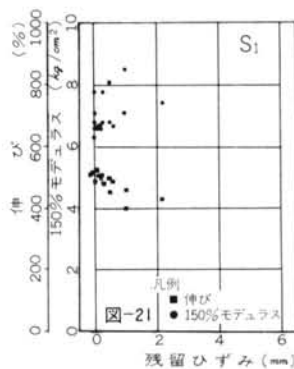
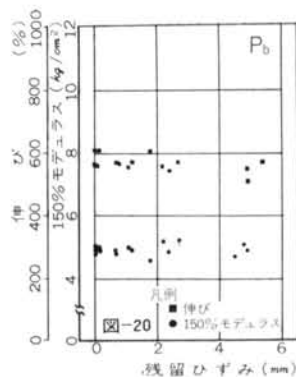
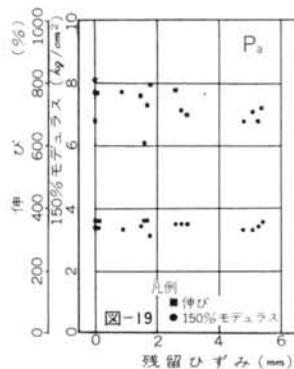


図-19~23

残留ひずみと150%モデュラスおよび伸びの関係(ダンベル型)

§ 5. 追従能力

5.1 圧縮セット後の力学的性質

5.1.1 ダンベル型試験体について

圧縮セットを起こしたシーリング材から薄片に切斷、打抜きの手順によって得たダンベル型試験体を、引張試験に供し力学的性質を調べた。その結果を、各シーリング材について残留ひずみと、150%モデュラスおよび伸びの関係で履歴温度20°Cの場合を示せば、図-19~23のごとくであり、シーリング材そのものの力学的性質への残留ひずみの影響はほとんど認められていない。

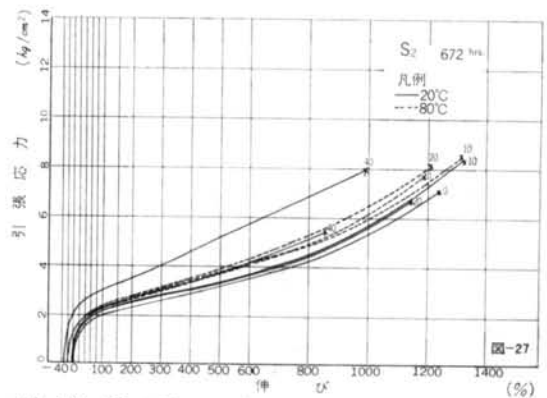
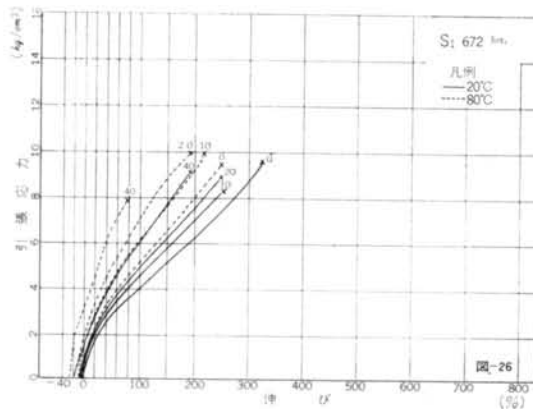
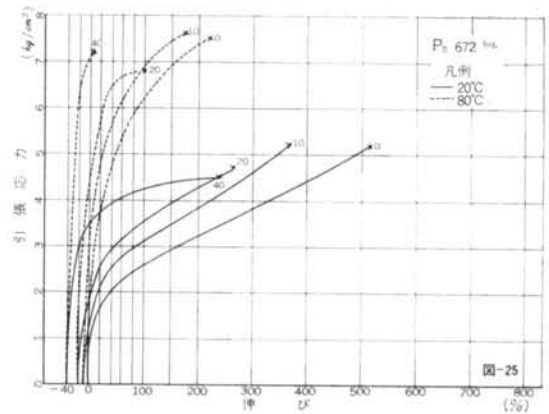
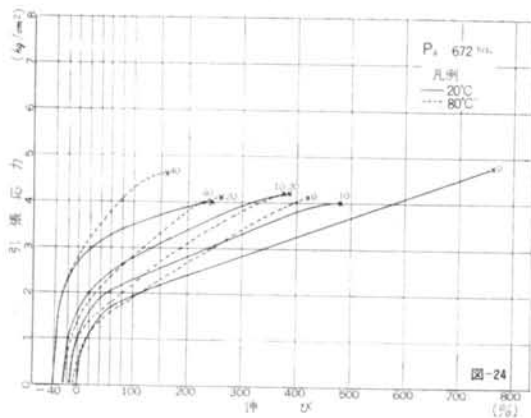
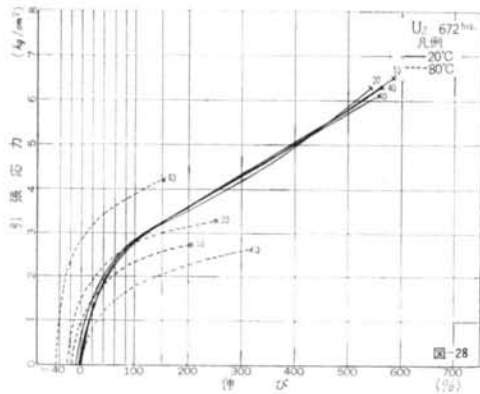


図-24~28 圧縮セット後のS-S曲線
(図中の数字は圧縮ひずみ)



5.1.2 H型試験体について

圧縮セットを起こしたシーリング材をそのまま引張試験に供し、S-S曲線を得た。各シーリング材について圧縮ひずみ0, 10, 20, 40%, 履歴温度20, 80°C, 履歴時間672hrsの場合を図-24~28に示す。いずれのシーリング材も、履歴時間・温度が同一ならば残留ひずみに関係なく破断時の引張応力はほぼ同一の値を示すのに対し、伸びは残留ひずみが大きくなるにしたがい低下する傾向にある。

5.2 追従能力

実際の建築物におけるジョイントムーブメントは、§2.で述べたように年間変動だけを考えれば夏季に施工したものの以外はいずれも圧縮セットが問題となる。本報告は春季に施工した場合に相当し、追

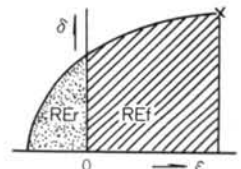


図-29 追従能力
従能力の特性値として求めた Resilient Energy (以下REと呼ぶ)は図-29に示すように RE_r と RE_f に分けて考えた。したがってREは式(4)で示される。すなわち、圧縮セットを起こしたシーリング材の追従能力は RE_f であり、その値が大きくなるとほど圧縮セット後の引張に対してより追従できるものといえる。

$$RE = RE_r + RE_f \quad \dots\dots(4)$$

ここに、 RE_r : 元の幅に復するのに要するRE (kg・cm/cm³)

RE_f : 元の幅に復してから破断に至るまでのRE (kg・cm/cm³)

履歴温度 (°C)	圧縮ひずみ (%)	P_a				P_b				S_1				S_2				U_2			
		hrs	hrs	hrs	hrs	hrs	hrs	hrs	hrs	hrs	hrs	hrs	hrs	hrs	hrs	hrs	hrs	hrs	hrs	hrs	hrs
		24	168	336	672	24	168	336	672	24	168	336	672	24	168	336	672	24	168	336	672
20	0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	10	1.17	1.36	1.37	1.42	1.11	1.23	1.37	1.42	0.95	1.00	1.03	1.05	1.01	1.03	1.03	1.09	1.05	1.05	1.04	1.06
	20	1.47	1.76	1.77	1.87	1.23	1.47	1.60	1.76	0.97	1.00	1.07	1.15	1.02	1.05	1.06	1.15	1.05	1.05	1.07	1.09
	40	2.77	3.05	3.16	3.25	1.79	2.71	2.09	2.96	0.96	1.07	1.25	1.46	1.07	1.11	1.16	1.45	1.02	1.12	1.14	1.16
40	0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	10	1.38	1.42	1.40	1.40	1.29	1.38	1.36	1.35	0.95	1.00	1.00	1.06	1.00	1.05	1.11	1.06	1.07	1.08	1.08	1.09
	20	1.80	1.80	1.82	1.82	1.64	1.73	1.71	1.71	0.98	1.03	1.08	1.21	1.04	1.06	1.10	1.21	1.08	1.11	1.16	1.22
	40	3.13	3.42	3.22	3.21	2.91	2.90	3.00	3.04	0.99	1.10	1.25	1.64	1.09	1.25	1.43	1.73	1.16	1.25	1.33	1.45
60	0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	10	1.43	1.37	1.39	1.37	1.34	1.35	1.31	1.29	0.97	1.03	1.05	1.12	1.04	1.08	1.12	1.13	1.18	1.21	1.25	1.29
	20	1.82	1.80	1.76	1.76	1.76	1.76	1.78	1.78	0.99	1.12	1.16	1.29	1.07	1.13	1.18	1.21	1.24	1.31	1.43	1.52
	40	3.21	3.15	3.10	3.13	3.00	3.01	3.01	3.00	1.03	1.33	1.51	1.93	1.23	1.45	1.60	1.92	1.51	1.92	2.23	2.51
80	0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
	10	1.36	1.41	1.40	1.32	1.35	1.30	1.24	1.19	1.01	1.06	1.08	1.14	1.06	1.08	1.13	1.15	1.29	1.34	1.33	1.37
	20	1.80	1.83	1.78	1.75	1.81	1.73	1.61	1.57	1.01	1.16	1.23	1.38	1.06	1.15	1.23	1.29	1.50	1.69	1.72	1.72
	40	3.21	3.20	3.17	2.98	3.07	3.01	2.83	2.80	1.03	1.48	1.74	2.06	1.44	1.60	1.72	2.00	2.25	2.84	2.88	3.11

表-4 圧縮セット後の形状係数

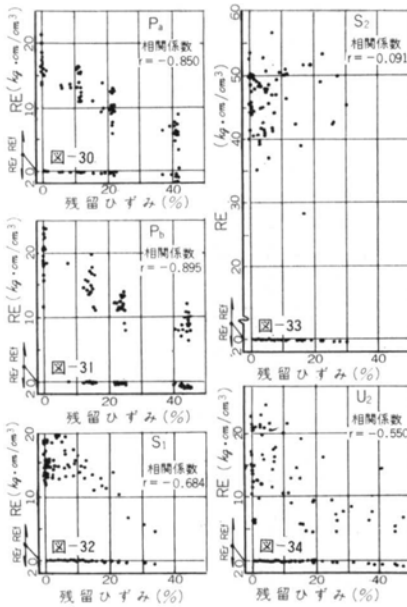


図-30~34 残留ひずみと $RE_f \cdot RE_r$ (その1)

以上の考え方に基づいて、前項で示した $S-S$ 曲線から RE , RE_r , RE_f を算出して示せば表-5のごとくである。

5.3 追従能力の検討

5.3.1 RE と残留ひずみ

拘束した圧縮ひずみに前章で示したセット率を乗じた値である残留ひずみと、 RE_f および RE_r との間には図

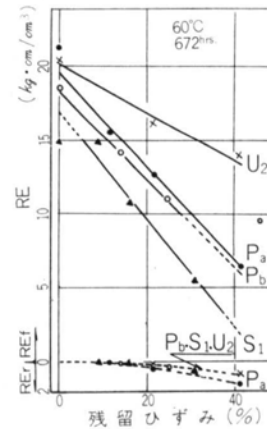


図-35 残留ひずみと $RE_f \cdot RE_r$ (その2)

—30~34に示すごとくの関係がある。残留ひずみが大きくなると RE_f は低下し、 RE_r は増加する。しかし、2成分型シリコンにおいては、残留ひずみが小さいことなどからこの傾向は明確でない。

図-30~32および図-34において履歴時間・温度を一定とすれば、図-35に示すごとくの関係図を得ることができる。この関係は式(5)で表わすことができる。

$$RE_f = RE_0 \times k \quad (\text{kg} \cdot \text{cm}/\text{cm}^3) \quad \dots\dots(5)$$

$$k = \frac{X_s - x}{X_s}$$

$$ER_0 = f(T, t)$$

ここに、 RE_0 : RE_f を求めたシーリング材と同じ温度・時間を履歴した無拘束

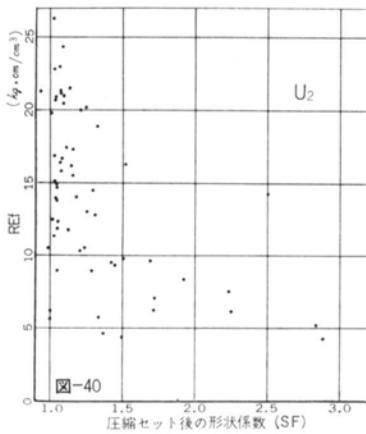
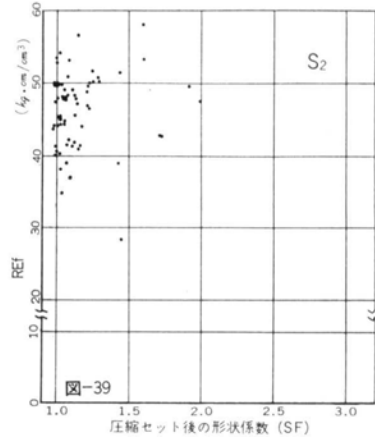
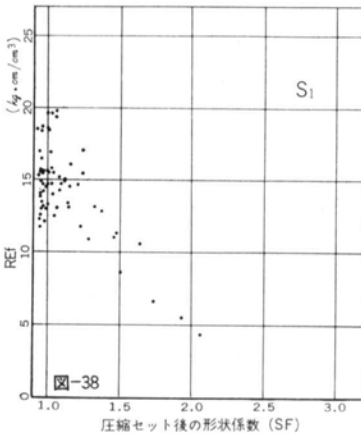
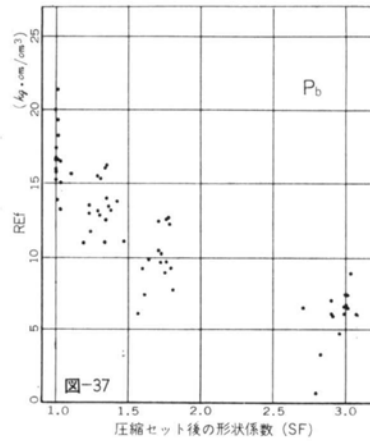
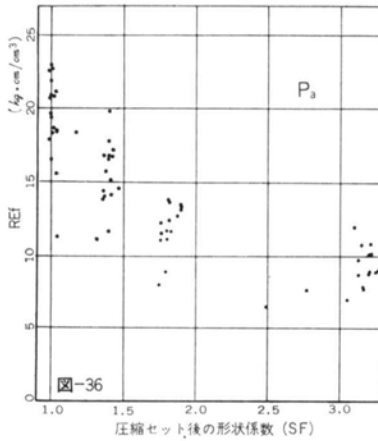


図-36~40 圧縮セット後の形状係数と RE_f の関係

5.3.2 RE と形状変化

前章で算出した圧縮セット後の形状係数 (SF) と、追従能力 (RE_f) の間には図-36~40に示すごとの関係がある。これは圧縮セットを起こし、中央部がふくらむ形状に変化した場合には RE_f は低下していることを示す。この形状係数と RE_f の関係は、前項で検討した RE_f と残留ひずみの関係と一致している。

§ 5. 結論

圧縮セットを呈したシーリング材は、その単体の力学的性質において残留ひずみの影響をほとんど受けていないが、JIS A 5757 に準拠したある形状をもつ試験体 (H型) においては、残留ひずみの影響が顕著に認められ、式(5)を提案した。したがって、圧縮セットを受けることによって追従能力が低下する現象に関与する因子としては、5.3.2によって形状変化が追従能力に影響を与

- (圧縮を受けていない) シーリング材の $RE(\text{kg}\cdot\text{cm}/\text{cm}^3)$
 X_s : RE_f が 0 になるときの残留ひずみ (%)
 x : 残留ひずみ (%)
 T : 温度 ($^{\circ}\text{C}$), t : 時間 (hrs)

える重要な因子であることが判った。

圧縮セットを起こしたシーリング材がジョイントムーブメントに追従するためには、次の最低条件を満たすことが必要である。

$$et > ed + x$$

ここに、 et ：圧縮セットを起こしたシーリング材を引張った場合の破断時の伸び (%)

ed ：許容伸縮率 (%)

x ：残留ひずみ (%)

さらに、ジョイントムーブメントが繰返されることによって生じる疲労を考えた場合、以下に挙げる i)~iii) を満たすことが必要となる。

- i) 追従能力である RE_f が大きいこと。
- ii) 残留ひずみ (x) が小さいこと。
- iii) i), ii) の値が温度を履歴することによって、また時間 (材令) の経過によって低下しないこと。

したがって、ジョイントデザインを行なう際にシーリング材の RE_f および X_s の値と、それらが受ける温度と時間の影響の程度から、次に示すような配慮が必要である。

- i) RE_f および X_s が大きい場合には、 x が大きくな

るような ed を採用できる。

- ii) RE_f および X_s が小さい場合には、 x が小さくなるような ed にしなければならない。
- iii) i), ii) において温度および時間の影響を受け、それぞれの値が低下する場合には、さらに ed を小さくしなければならない。

なお、本研究は筆者らの既報^{3),4),5)} に新たな検討を与えて報告するものである。

§ 6. おわりに

本研究は、§1. で述べたシーリング材の3つの役割のうち、第2のものについて圧縮セットに焦点を絞って検討を与え、ジョイントデザインとの関連において適切なシーリング材の使い方を提言した。シーリング材の耐久性は、第2および第3の役割の絡みを究めなければ解明することはできず、今後はシーリング材そのものの経時的変化、すなわち耐候性について検討し、さらにムーブメントとの関連を究め、水密性のすぐれた、かつ、それが耐久であるジョイントデザインへ寄与すべく設計指針の確立に努めたい。

<参考文献>

- 1) K. K. Karpati: "A Rational Approach to Building Sealant Testing" Adhesives Age, November 1973
- 2) 松本・小野・丸一: "不定形シーリング材の耐久性に関する研究 (連行気泡とその評価)" 日本建築学会関東支部研究報告集 昭和51年
- 3) 松本・丸一: "不定形シーリング材の耐久性に関する研究 (圧縮セットについて)" 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸) 昭和49年
- 4) 松本・丸一: "不定形シーリング材の耐久性に関する研究 (圧縮セットについて その2)" 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) 昭和50年
- 5) 松本・丸一: "不定形シーリング材の耐久性に関する研究 (圧縮セットについて その3)" 日本建築学会大会学術講演梗概集(関東) 昭和50年