

弾性シーリング材の物性および皮膜防水層の設計について

青山 幹
西村 清一

概 要

近來建築物のプレハブ化はますます盛んになってゆく傾向にあるが、その趨勢に不可欠の材料として、高度に弾性あるいは粘弾性を有して、いわゆる建築物のジョイントの動き（変位）に追従し、止水あるいは防水の役割を十分に発揮するシーリング材や皮膜防水材の必要が大きくクローズアップされている。そのため現在すでに多種多様のシーリング材や皮膜防水材が市販されているが、それらのほとんどは施工経歴の少ないいわば新材料の域を出ないものであって、それらのカタログに示される性能等も統一されないいわゆるメーカーの独自の立場にもとづいて、行なった試験方法によるものが現状である。したがって市販品相互の優劣ははなはだあいまいになりやすく粗悪品を知らずに使用したり、また商品の本来の性質に適さぬ用法をおこなったりしての支障例も枚挙にいとまがない。これらの観点から、これら商品の性能の比較を比較的短期間の試験によって求めるとともに、材質の特長や性能の限界などに対する検討も加えてみることにした。特に弾性シーリング材に関してはこの程制定される運びとなっている「建築用2成分型ポリサルファイド系シーリング材（JIS案）」にもとづいて検討することとし、皮膜防水材については材料自体の単なる物性を求めることに止まらず下地材と一体になった、形成された防水層、に重きをおいて検討を加えるものである。

1. 弾性シーリング材の性能

弾性シーリング材としてはポリサルファイド系のもののうち最も普遍的に使われている代表的メーカー6社のものを選択して検討した。現在市販されている弾性シーリング材には、ポリサルファイド系のものの他にシリコン系、ウレタン系、ブチル系、クロロプレン系、アクリル系などがありそれぞれの材質において特長を有し、性能も大いに異なる所もあり本質的に同一の試験方法で論ずることができないのが現状である。しかるにその需要量からいえばポリサルファイド系のものが今のところ非常に多く、次いでシリコン系のものとなっている。一般に弾性シーリング材に要求される性能は次のようである。一般的物性として(1)防水性、(2)防風性(防塵性)(3)柔軟性(復元性)(4)耐水性(5)耐薬品性、(6)耐候性(耐久性)これらはいわゆる物理的、化学的性質に関するものであるがこれらの条件の他に施工上要求される条件も満足するものでなければならない。施工条件としては次のようである。(1)比較的軟らかでしかも垂れ下りのないこと、(2)可使時間が長く連続して使用できるもの、(3)接着性の良いこと。これらの要求される諸性質に関しすでに規格化されている外国の規格例をあげれば次のごときものがある。

1.1. 外国におけるシーラント規格例

a) ASA, A116-1 (July 27, 1960) 常温加硫型2液性シーラントについて規定。

規格内容 (1)スランプ(サグ)。クラスA(水平目地用) $40^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{F}$, 1 hr. 水平, 平滑。クラスB(垂直目地用) $40^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{F}$, $100^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{F}$, 1 hr. $< 1/4$ in. (2)可使時間。 $77^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{F}$, $50\pm 5\%$. > 4 hr. (3)引張り接着性。被着体(ガラス, アルミ, ステンレス, モルタル)。($77^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{F}$, $50\pm 5\%$, 7日。伸び150%, 強度 > 10 psi.) ($77^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{F}$, $50\pm 3\%$, 7日(+) $77^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{F}$ の水中4日間。伸び150%, 強度 > 10 Psi. ($77^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{F}$ $50\pm 5\%$, 7日(+) $158^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{F}$, 4日Heat。伸び100%。($77^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{F}$, $50\pm 5\%$, 7日(+) $-20^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{F}$, $77^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{F}$ 両温度循環3回。伸び100%, 強度 > 10 psi. ($77^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{F}$, $50\pm 5\%$, 7日(+))紫外線照射, 4日(+) $77^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{F}$ 水中4日。伸び100%, 強度10 psi. (4)割れ抵抗性。 $77^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{F}$, $50\pm 5\%$, 7日(+))UV *196 hr. < 3 mm. (5)復元性。 $77^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{F}$ $50\pm 5\%$, 7日(+) $120^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{F}$, 3日。伸び150% 5分, 1 hr 以内。 $> 25\%$ 。(6)汚染性, 変色。モルタル, $77^{\circ}\pm 2^{\circ}\text{F}$, $50\pm 5\%$, (1分水中/1日) 14日。汚染ナシ。(7)貯蔵安定性。 80°F . 6カ月以上。

b) FS-TT-S-00227b (October 12, 1964) 常温加硫型で液性シーラントを規定。

規格内容。(1)スランブ。タイプⅠ(水平目地用)40°±2°F, 1hr。水平, 平滑。タイプⅡ(垂直目地用)40°±2°F, 122°±2°F, 4hr。1/16in (2)可使時間, エアーガン使用, 73.4°±2°F, 50±10%, タイプⅠ, 50psi<30秒, タイプⅡ, 50psi<1分。>3hr。(3)タックフリータイム。73.4°±2°F, 50±10%, >72。(4)73.4°±2°F, 50±10%, 14日。20~50(シヨアーA)。(5)加熱老化後の硬度。73.4°±2°F, 50±10%, 7日(+)212°±3°F, 3日 Heat。<60(シヨアーA)。(6)耐久性。被着体(ガラス, アルミ, モルタル)。73.4°±2°F, 50±5%, 14日(+)次記の循環3回行なう, (158°±2°F, Heat 24hr)(73.4°±2°F, 水中7hr)(0°±2°F, Cold box 8hr)(0°±2°F, 引張, 伸び50%)(73.4°±2°F, 50±2%, 伸び50%, 3hr 保持)。(7)ハクリ持着力。被着体(ガラス, アルミ, モルタル), 73.4°±2°F, 50±10%, 7日(+)73.4°±2°F水中7日。>10psi。(8)重量損失。73.4°±2°F, 50±5%, 7日(+)212°±3°F, 7日 heat, <10%。(9)汚染性, 変色。モルタル, ウェザーメーター200hr(+)73.4°±2°F, 50±10%, (1分水中, 1日)14日, 汚染, 染色なし。(10)貯蔵安定性。<80°F, >6カ月。

1.2. シーラントに要求される性能

シーラントに要求される性能としては前述のごとく物性面と, 施工面からとの両者の立場からのものがある。施工面から要求される事項はあくまでも材料が新鮮な時期における施工性についてであるが, 物性面から要求される範囲に関しては, 短期材令は勿論のこと, 比較的長期にわたっての物性についても検討されたものでなければならない。施工当初における諸物性は良好なものであっても, それが長年月を経た後では材質劣化がいちぢるしい様なものでは, 試験に合格しても, 実用に適さないものともいえる。かくのごとき事態を避けるためには, 通常の試験とは別に施工個所が遭遇する環境を人為的に設けて試験する必要がある。そこで種々ある規格の内には耐久性試験として規定されているものもあるので検討する必要がある個々の試験項目に対しては安全率を考慮した規格値として, 外国例を1-1に示したが, これは一般的な値であって動きの大きい個所, 対薬品性の要求される個所, 著るしい劣化が懸念される箇所などにあつては, たとえある規格値を満足していても実情に合わないこともあり, これらについては別途に考慮する必要がある。また施工上現市販シーリング材を夏用, 冬用の別に分けているメーカーもありまた垂直目地用, 水平目地用など設けているところもある。これらをその用途に応じて一般的性能試験を行なっているのが実情である。実

際上全季節において物性の変動がない(感温性が低いもの)ものが望ましいことは言うまでもない。施工個所毎における最低必要とする性能についてを求めることは実際には困難であるから(測定データの変動等からも知れる)平均値なものに, 適当な余裕を持たせて性能を検討せざるをえないものと思える。

1.3. JIS 規格案によるポリサルファイド系シーリング材のテスト

先般来 JIS 規格案として建築用 2 成分型ポリサルファイド系シーリング材について審議されていたが, これに準じて試験した結果を次に報告する。なお JIS 案には先程述べた外国規格の思想が少なからずもられている。

1.3.1. 試料 次の6種について行なった。

記号	色	主剤:硬化剤(o/wt)
A	黒	20:1
B	灰	10:1
C	黒	10:1
D	灰	20:1
E	黒	10:1
F	黒	20:1

表-1 試料表

1.3.2. 試験結果 a) 可使時間 容器中に充填した試料の硬化について, 針入度と時間の関係を求め, 針入度が120となるまでの時間を可使時間としている。結果について表-2に示す。本方法は容器に入れた試

記号	針入度 (mm)			
	練りまぜ直後	3.5hrs	4hrs	4.5hrs
A	330	245	207	203
B	330	153	134	118
C	239	71	60	51
D	330	330	309	284
E	286	185	166	145
F	279	131	109	74

表-2 可使時間表

料について静的に針を落下させ測定するが, 実用上からは, いわゆる可使程度を攪拌限界, (練り, 置き時間)として用途に応ずるためには, 試料の量的関係(一度に二液を攪拌する実際量と, 試験で練る量との関係), 測定方法(静的な試験と動的な実際攪拌)の相異, 等が影響するとも考えられるので, 試験と実際については, 考慮の余地があると思われる。勿論, 比較試験の立場から見れば以後の試験項目を問わず JIS 案によるものが最良であることは言うまでもない。

b) タックフリー

アルミ板上に型枠を置き、試料を充填し72時間静置後試料上面にポリエチレンフィルムをのせ90°の角度で引きはがし判定する。結果は表一3に示す。

記号	タックフリー
A	合格
B	合格
C	合格
D	合格
E	不合格
F	合格

表一3 タックフリー試験結果表

本方法で行なったものは72時間静置したものについてであるが、合格したもののなかには早い時間に表面硬化が進行したものもあるが、要は塵埃の附着防止、雨滴の痕跡など（美観上）の防止を目的としているので理想的には、可使時間は長く、タックフリータイムは短いものが良いといえる。しかしあまりに短いものは作業上好ましくない。

c) スランプ

みぞ形容器内に試料を充填し、これを2種の温度条件の恒温器中に鉛直に懸垂し、試料のたれ下りを測定する。3mm以下のたれ下りを合格としている。試験結果は、表一4に示す。

記号	スランプ (mm)		
	標準状態	50°C	5°C
A	0	0	0
B	0.3	0.3	0.6
C	2.1	1.6	1.0
D	0.3	0.4	0.1
E	0.2	0.5	0.3
F	0	0	0

表一4 スランプ試験結果表

この種の常温加硫型シーリング材にあつては、当初のスランプ性が懸念されるが、初期加硫時において垂れ下りがなければその後においても心配はない。

d) 汚染性

モルタル片のみぞに試料を充填し、これを所定の養生をおこなったものについて、汚染の有無を観察し、汚染が認められない場合を合格とする。試験の結果を表一5に示す。

本試験結果からみれば不合格品とされるものが2社あったが、外国規格のごとき方法(水中1分/1日を7日)によればより多くの不合格品が出る可能性がある。

記号	汚染性
A	合格
B	合格
C	合格
D	不合格
E	不合格
F	合格

表一5 汚染性試験結果表

実際には、シーリング部での冠水、乾燥の繰返しが行なわれるのでわずかの汚染でも、その発達は助長されるものと思われる。JIS案のごとく、わずかの汚染でもあるものは不合格とすることは妥当であるといえる。一般に汚染を生じるものでも、適当なプライマー（例えばエポキシエマルジョン等）を使用すれば防止できるものがあるので施工のやり方によって汚染を避けることは可能である。

e) かたさ

厚さ6mm、幅50mm、長さ120mmの試料を作成し、材令14日において硬度を測定し、後4日間で70±1°Cで養生したものについて測定する。硬度は15~50のものとして示している。試験結果を表一6に示す。

記号	加熱前	加熱後
A	36	41
B	34	34
C	37	37
D	31	30
E	21	31
F	42	41

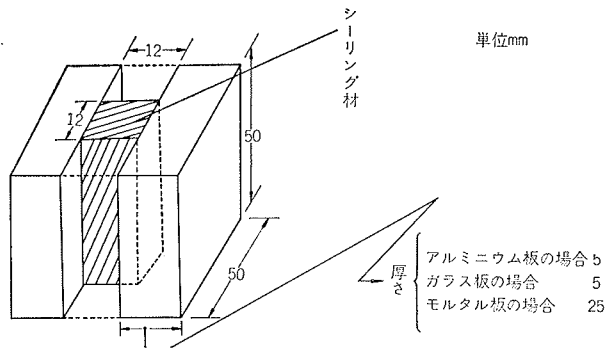
表一6 かたさ試験結果表

本結果によれば、規格値にすべて合格した。この規格値はゴム状弾性成型品の一般的な硬度範囲でもあるので、特に柔らかいもの、硬いものでなければ大概のものはこの範囲内に入るものである。

f) 引張接着強さ

アルミニウム板、ガラス板に試料を附着させ図一1のごとき試験体を作成し、初期引張接着強さ、水中浸漬後の引張接着強さ、加熱後の引張接着強さを求めた。それぞれの引張接着強さが1.0kg/cm²以上あれば合格値である。試験結果を表一7に示す。

本試験結果からアルミニウム板、ガラス板における接着性は、初期接着力、水中接着力間においてほとんど変化がなく、伸び率にも変化がない。これは被着体が不透水性のものであるから、一度接着界面において接着機構が安定すれば、界面の湿潤がなく、温度条件



図一 引張接着試験体

ものよりも硬化反応が促進されるので、接着力は増大する。その反面伸び率の低下などは認められ易く、若材令において高温を受ける施工個所においては、下地の動きなどに対する問題が残る。

g) はく離接着強さ

被着体に試料を塗布し、綿布をのせ、さらに試料を塗り広げて試験体とし、14日間養生したものを試験する。試験結果は表一八に示す。規格値は 9kg/3cm幅以上である。

破壊状況より見れば、(1)試料と被着体との界面における破壊 (2)試料部の破壊に分類され、(1)と(2)の混合

記号	試験方法	被着体の種類	モジュラス(kg/cm ²)			引張接着強度(kg/cm ²)	伸び(%)	破壊状況	
			50%	100%	150%				
A	初期	アルミ	1.8	2.2	2.5	4.0	405	M	
		ガラス	2.0	2.4	2.8	4.0	354	A	
	水中後	アルミ	1.9	2.3	2.6	4.1	445	M	
		ガラス	2.1	2.5	2.7	4.3	392	M	
	加熱後	アルミ	1.2	2.1	3.1	6.0	345	M	
		ガラス	1.2	2.1	3.0	5.0	294	C	
B	初期	アルミ	1.6	2.0	2.3	4.5	504	C	
		ガラス	1.7	2.4	2.5	4.9	500	M	
	水中後	アルミ	1.5	1.8	2.1	3.7	460	C	
		ガラス	1.5	1.8	2.2	4.0	465	M	
	加熱後	アルミ	0.9	1.3	2.1	4.0	316	M	
		ガラス	1.0	1.4	2.3	5.0	391	M	
C	初期	アルミ	1.7	1.8	2.1	4.0	534	A	
		ガラス	1.7	2.0	2.2	2.4	204	A	
	水中後	アルミ	1.6	1.7	1.8	2.7	534	A	
		ガラス	1.6	1.8	2.0	2.2	269	A	
	加熱後	アルミ	試験体が破壊したため、測定不能						
		ガラス	試験体が破壊したため、測定不能						
D	初期	アルミ	1.0	1.1	1.3	2.3	516	A	
		ガラス	0.8	1.0	1.1	2.2	555	A	
	水中後	アルミ	0.9	1.1	1.3	2.4	565	A	
		ガラス	0.9	1.0	1.2	2.2	540	A	
	加熱後	アルミ	0.7	1.1	2.0	4.0	349	M	
		ガラス	0.7	1.1	2.0	3.8	332	M	
E	水中	アルミ	0.3	0.2	0.2	0.3	最大伸の正確な測定ができない	C	
		ガラス	0.2	0.1	0.1	0.2		C	
	水中後	アルミ	0.5	0.5	0.5	0.5		C	
		ガラス	0.5	0.5	0.5	0.5		C	
	加熱後	アルミ	0.8	1.3	1.5	3.1		430	A
		ガラス	0.7	1.0	1.5	2.3		301	A
F	初期	アルミ	1.6	2.1	2.5	4.1	375	M	
		ガラス	1.9	2.4	2.9	4.0	333	A	
	水中後	アルミ	1.9	2.4	2.7	4.1	359	M	
		ガラス	1.8	2.3	2.7	3.9	316	A	
	加熱後	アルミ	1.9	2.8	4.6	6.1	224	C	
		ガラス	1.7	2.8	4.6	6.6	240	C	

破壊状況： C：凝集破壊（部材破壊）
A：接着 #（接着界面）
M：複合 #（C：A複合）

表一七 引張接着強度試験結果表

が同一であれば、シーリング材自体も不透水性であるので同一結果が得られる。モルタル、コンクリート等の湿潤性の高いものは接着界面における接着劣化が予想されるので、プライマー処理が必要である。加熱養生を行なえば当然凝集力が高まり、常温養生の

記号	アルミニウム		ガラス	
	接着強度(kg/cm ²)	破壊状況	接着強度(kg/cm ²)	破壊状況
A	19.5	C	20.7	C
B	20.5	C	20.7	C
C	11.7	A	15.4	A
D	7.8	A	6.3	A
E	6.3	C	5.3	C
F	16.5	C	18.6	C

註 破壊状況 C：凝集破壊
A：接着面破壊

表一八 はくり接着強度試験結果表

した状態での破壊は見られない。このことより、試料の強度（凝集力）と接着強度との均衡がとれていないことが知れる。実用上から見れば値の大小を無視し、現象的な面よりみれば、(1)のものよりも(2)のものが良い。これは漏水個所の原因は(2)よりも(1)が主原因であることからいえる。

h) 引張復元性

アルミニウム板を用い、図一のごとくして試験体とし、約 50°C 4日間養生後試験す

記号	10 mm 後	30 mm 後	1 hr 後	24 hr 後
A	17.24	17.55	17.65	17.84
B	17.53	17.70	17.70	17.85
C	17.05	17.33	17.48	17.54
D	16.63	17.27	17.29	17.66
E	16.90	17.46	17.55	17.78
F	17.11	17.38	17.43	17.55

表一九 引張復元性試験結果表

る。12mm幅を30mmに広げ、復元性をみる引張復元性は17mm以上を合格としている。試験結果は表一九に示す。

すべてが規格に合格している。復元性の悪いものは、被着体の動きに対して、水平性の保持、平滑さの

保持が困難であるから、美観上、防水上から避ける必要がある。この試験結果と実際上の物性劣化との関係を明らかにすることは実際の耐久性を知る上において必要と思われる。

1.4. 試験結果について

JIS 規格案に準じて試験した市販品の物性を、規格案および外国規格案の両見地から述べる。

1.4.1. スランプについて JIS 案によればすべて合格するが、T. B. T. P. S* における規定のスランプ 0 mm ともなると、数種に限られてくる。実際施工目地の大きさによってスランプは左右されるのでその点検討の要はある。試料それぞれが使用している可塑剤、充填剤等の成分、配合により粘度、比重が変化するが、比重が小さい方が有利である。

1.4.2. 可使時間、タックフリーについて 実用上からは、可使時間は長く、タックフリータイムは、適当に短いものが良い。使用時に練り置きが効かないものは面倒で、ロスが多くなる原因になる。タックフリータイムがあまり長いものは、塵埃の附着による汚染性が大となる。

1.4.3. 引張接着性、複元性について 各種の被着体において試料の接着性を試験するのであるが、AS A 規格では規定伸び時の接着性を求め、JIS 案では最大荷重を求めている。最大まで引張ると凝集力と接着力の差異が分る。凝集力の高いものは、接着面で破断し、反するものは試料切断となり伸びが小さい。これははくり接着性についても同様である。凝集強度の増加が著しいものは、弾力性の損失となり、複元性の低下となる。これらは可塑剤の選択を誤ったものと考えられる。複元性の乏しいものは、加硫による強度が得られていない場合もある。

1.4.4. 汚染性について モルタル目地における発色汚染は、水の影響によるモルタルの溶出アルカリと試料中に含まれる樹脂との反応によるものである。一般に用いられているフェノールホルムアルデヒド等により汚染する事が確かめられている。最近汚染を呈しない樹脂も用いられているが、プライマー処理を行なうことにより防止できることも可能でありプライマーは必ず使用する。

2. 皮膜防水材の性能

皮膜防水層において直接問題となるものに下地の亀裂がある。ことにコンクリート構造物の屋根版については、乾燥収縮亀裂、構造亀裂（不同沈下、温度膨張、剛性の不均一などに起因するもの）など何らかの原因で亀裂は発生しており、これを皆無とすることはほと

んど不可能と考えられる。したがって皮膜防水材の検討に当ってはこれら下地の亀裂とその挙動を考慮に入れなければ無意味となることはいうまでもないのであるが、亀裂発生の原因とその挙動に関する研究はまだまだ十分とは言えないのが現状である。もっとも建物の挙動自体が、その規模、形状、立地条件、用途などに応じて区々でありなれば建物に附随した個有のものと考えざるを得ないので、それらを同一の観点から論ずることはきわめて困難であると思われる。

したがって本研究においては下地コンクリートの挙動を究明することよりも、皮膜防水材自体の能力を求め、どの程度の下地の亀裂に追従しうるか、という立場から検討を加えることとした。

皮膜防水材の検討にあたり必要と考えられる条件および問題点は次のとおりである。

一般の物理化学的性能 (1)下地の亀裂によって破断しないこと (2)風圧力によって剥離しないこと (3)耐久性の程度 (a)紫外線、オゾン スモッグ中の有害成分などによる材質の化学的劣化の程度 (b)温度変化、乾湿くり返しによる防水層としての疲労の程度。

施工上の性能 (1)屋上防水における歩行荷重など、集中荷重に対する強さ、(2)防水皮膜接着工法における接合部分の接着力劣化の程度 (3)防水皮膜造成（塗装）工法における皮膜性と下地に対する接着性のバランス (4)施工作業の容易さと確実性

これらの条件は互に関連をもって防水層としての寿命を決定するものであるが今回は下地との兼ね合いにおいて、材令的变化を加味しない、皮膜防水層の施工時における設計条件についての検討および皮膜の劣化促進後における性状の検討などをおこなった。

皮膜防水材の能力の評価を、一定幅 (l) の下地の亀裂発生を許容できるものとし、そのための皮膜の物性（引張り強度 σ_s 、伸び能力 ε_s 、弾性係数 E 、レジリエンス R ）、皮膜の厚さ (d)、皮膜と下地との接着強度 (τ_s) の関係を求めるものである。

2.1. 理論的考察

2.1.1. 亀裂幅 (l cm) 防水上支障となる下地コンクリートの亀裂幅 (l) については従来いくつかの調査研究もあるが、普遍的工法を用いたアスファルト防水層の場合を例にとればおよそ $l \geq 0.01$ cm とされている。しかし現実に入りうる亀裂の最大幅についての調査は少ないようであり、ここでは次のように想定してきめた。

コンクリートの乾燥収縮率は $\varepsilon_{\infty} = 10 \times 10^{-4}$ 程度と推定されるので屋根版などの拘束スパンを $L \leq 10$ m とすると、最大亀裂幅は $l = \varepsilon_{\infty} \cdot L = 10^{-3} \times 1000 = 1$ (cm)

程度となる、したがって、乾燥収縮以外の、たとえば地震時の動的荷重によるひびわれなどを含めて $l < 3$ cm 程度と考えれば十分と思われる。

2.1.2. 皮膜の物性 材料を弾性範囲内で利用する場合、材料の応力—ひずみ関係は $\sigma = E \cdot \varepsilon$ で表示できるが、皮膜防水層の材料としては非弾性挙動を示すものも多く皮膜の物性として、レジリエンス $R = \int_0^{\varepsilon} \sigma'(\varepsilon) d\varepsilon$ 、または $\sigma = dR/d\varepsilon$ を利用する方が便利である。強度特性についても、弾性材では引張強度 (σ_s)、伸び能力 (ε_s) が用いられるが、非弾性材では限界レジリエンス $R_s = \int_0^{\varepsilon_s} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon$ を使う方が便利である。また、皮膜の接着強度 (τ_s) については、いろいろの問題があるが、ここではせん断強度を意味する。

2.1.3. 下地の亀裂に対する皮膜の抵抗性 下地コンクリートに幅 l の亀裂が入った場合皮膜が全く剥離しないとすると亀裂個所での皮膜の伸びひずみは $\varepsilon = l/0 \rightarrow \infty$ となり、必らず破断するものと思われる。そこで皮膜が破断しないためには一定長さ (L) だけ剥離しなければならぬ。この場合、皮膜は十分薄く弾性係数も小さいものであるから、皮膜の厚さ方向の応力変化はなく、皮膜中の最大引張応力 (σ)、最大ひずみ $\varepsilon = l/L$ は剥離部分 (L) に一様に生じる。一方、皮膜の剥離端の微小部分 ($\Delta L/2$) について力の釣り合い条件から

$$d \cdot \sigma = d(\sigma - \Delta\sigma) + \Delta L/2 \cdot \tau_s$$

$$\therefore \Delta\sigma/\Delta L = \tau_s/2 \cdot d \dots\dots\dots(1)$$

この微分方程式を $L=0$ の時、 $\sigma = \sigma_0$ の初期条件のもとに解けば、次式が求まる

$$\sigma - \sigma_0 = \tau_s/2d \cdot L \dots\dots\dots(2)$$

τ_s : 皮膜と下地との接着強度、 σ_0 : 皮膜に導入されるプレストレス、そこでプレストレスを考慮に入れると、式が複雑化するので $\sigma_0 = 0$ とし考察すれば次のごとくなる。すなわち(2)式の剥離長さ (L) を用いて、皮膜中の最大ひずみ (ε) を求めると

$$\varepsilon = l/L = \tau_s/\sigma \cdot l/2d \dots\dots\dots(3)$$

となり、これらの関係式と材料の破断条件を用いれば下地コンクリートの亀裂によって皮膜が破断しない条件がそれぞれ次のように求められる。

(A) 弾性皮膜材の場合 (破断しない条件式)

応力—ひずみ関係 $\sigma = E\varepsilon \dots\dots\dots(4)$

式(4)と式(3)より $\sigma = \sqrt{\tau_s E \cdot l/2d} \dots\dots\dots(5)$

または、 $\varepsilon = \sqrt{\tau_s/E \cdot l/2d} \dots\dots\dots(6)$

皮膜の破断しない条件

$$\sigma \leq \sigma_s \dots\dots\dots(7), \quad \varepsilon \leq \varepsilon_s \dots\dots\dots(7')$$

式(5)を式(7)に代入すれば

$$\tau_s \leq 2d/l \cdot \sigma_s^2/E \dots\dots\dots(8), \quad \tau_s \leq 2d/l \cdot E\varepsilon_s^2 \dots\dots\dots(8')$$

弾性材の場合 $R_s = \sigma_s^2/2E = E\varepsilon_s^2/2 \dots\dots\dots(9)$ となる。

(B) 非弾性皮膜材の場合 (破断しない条件式)

皮膜の破断しない条件 $\int_0^{\varepsilon} \sigma(\varepsilon) d\varepsilon \leq R_s \dots\dots\dots(7'')$

式(3)を(7'')に代入すれば $\tau_s/2d \int_0^{\varepsilon} l/\varepsilon d\varepsilon \leq R_s$

ここで、 $l(\lambda) = \varepsilon(\lambda)C$ とおいて任意の変数

(λ) を導入し

$$\left. \begin{aligned} \lambda = 0 &\rightarrow I \\ \varepsilon(\lambda) = 0 &\rightarrow \varepsilon \\ l(\lambda) = 0 &\rightarrow l/2 \end{aligned} \right\} \text{の範囲で積分すると}$$

$$\int_0^{\varepsilon} l/\varepsilon d\varepsilon = \int_0^1 C \cdot \varepsilon(\lambda) / \varepsilon(\lambda) \cdot d\varepsilon(\lambda) / d\lambda \cdot \Delta\lambda$$

$$= \int_0^1 d l(\lambda) / d\lambda \cdot d\lambda = \int_0^{l/2} dl = l/2$$

$$\therefore \tau_s \leq 4d/l \cdot R_s \dots\dots\dots(8'')$$

であるから (8), (8'), (8'') は一致する。

設計上の許容応力 (σ_s/f ; f = 安全率) は強度 (σ_s) に比べてかなり低くとり、弾性範囲内におくのが望ましいから、その場合には式 (8), (8'), (8'') のいずれを用いても大差ない。

2.1.4. 皮膜と下地との接着強度 アスファルト系防水層に関してはすでに、小池博士の詳細な研究があり、防水層が破断するときの、限界せん断応力 (τ_B)、下地の亀裂幅 (W) は次式で導かれている。

$$\tau_B \geq F \cdot \sqrt{G/E \cdot t_A} \cdot t_R, \quad W = 2F \sqrt{t_A/E} \cdot G \cdot t_R$$

この中には、現在の防水皮膜では測定困難な要因として、接着層の厚み t_A 、接着層のせん断剛性 G などが含まれている。上の2式から、この2項を消去すると $\tau_B \geq 2F^2/E \cdot t_R \cdot W$ が得られる。さらに、防水層の単位幅あたりの強度 F (kg/cm) を通常材料強度で置き替えると、 $F = \sigma_s \cdot t_R$ となり結局 $\tau_B \geq 2t_R/W \cdot \sigma_s^2/E$ となり、先に導びいた式 (8) と完全に一致する。したがって式 (8), (8'), (8'') を等式に直し、 σ_s , ε_s , R_s などを皮膜中に生じている応力、ひずみ、レジリエンスとすれば、これはその時の剥離端接着強度 (τ_s) を示す式でもある。

皮膜の通常の接着試験では、皮膜と接着剤層との界面剥離、接着剤層の凝集破壊、接着剤層と下地コンクリート (或いはモルタル) との界面剥離のいずれかによって接着強度 (τ_s) が定まるが、適当な試験条件さえ満足してやれば、式 (8), (8'), (8'') の等式を利用して、逆に皮膜のせん断接着強度 (τ_s) を算定できる。さらに、通常の Peering Test で、皮膜の単位幅当たりの接着力 (T kg/cm) を測定すれば、 $\tau_s/T \approx \Delta L$ (cm) から、接着破壊域の寸法 (ΔL) を推定することもでき

る。

2.1.5. 保護層等皮膜上の等分布荷重と皮膜接着時のプレストレスの影響 水平な皮膜の上に保護コンクリートなど等分布荷重 (g) がある場合、皮膜と荷重の接触面の間に摩擦力 $\tau (=q \cdot f; f$ は摩擦係数) が、皮膜下面のせん断応力 (τ_s) と同じ方向に働らく。したがって、式 (8), (8'), (8'') の τ_s を $(\tau_s + \tau)$ とおけば、たとえば式 (8'') は $\tau_s \leq \Delta d / l \cdot R_s - q \cdot f \dots\dots\dots (9)$ のようになる。そこで等分布荷重の例として厚さ 10 cm のモルタル舗装を想定してみると $q = 2.0 \text{ g/cm}^3 \times 10 \text{ cm} = 0.02 \text{ kg/cm}^2$ となり $g \cdot f < 0.02 \text{ kg/cm}^2$ となりほとんど無視できる大きさである。

一方、皮膜をたるみなく貼付するために、式(2)のプレストレス (σ_0) が導入されると、容易にわかるように式 (8'') はつぎのようになる。

$$\tau_s \leq 4d / l \cdot (R_s - \sigma_0 \varepsilon_s) \dots\dots\dots (10)$$

ゴムシート防水では、 $R_s > 100 \text{ kg/cm}^2$, $\varepsilon_s \approx 5$ 程度であるから、 $\sigma_0 = 2 \text{ kg/cm}^2$ としても、限界接着強度 (τ_s) に与える影響は10%以下であるが、伸びに関する限り劣化促進のいちじるしい影響が知られているので実際上は無視することはできないと思われる。

しかるにここでは条件の簡略化のため一応 ($\sigma_0 = 0$) の状態で試験をおこなうこととした。

2.1.6. クリープ 皮膜のクリープは、プレストレスの導入、下地の亀裂による応力などにより生ずるが今回の実験では材令の影響は割愛することとした。

2.2. 実験とその考察

2.2.1. 各種市販皮膜 (防水シート) の接着工法についての検討 市販の皮膜をあらかじめ作成したモルタル板面に接着し、皮膜防水層を形成させたのち、モルタル板をその面内で引張り、防水層を破壊させて各種条件を調べ、その破壊試験結果を皮膜の力学的性質、および接着強度と比較検討し、皮膜防水層の下地

試験体記号	シート主成分	接着剤主成分	プライマー主成分
A-1	ポリクロロプレ:	ポリクロロプレ	ポリクロロプレ
B-2	ポリクロロプレ	ポリクロロプレ	ポリクロロプレ
B-1	ブチルゴム ..	ブチルゴム	ブチルゴム
B-2	ブチルゴム	ブチルゴム	ブチルゴム
B-3	ブチルゴム	ブチルゴム	ブチルゴム
B-4	ブチルゴム	ブチルゴム	ブチルゴム
C	塩化ビニル	アクリロニトリル	アクリロニトリル
D	ポリイソブチレン	ポリクロロプレ	ポリクロロプレ
E	ポリエチレン	ポリクロロプレ	ウレタン系

表-10 試料表

亀裂に対する挙動条件をもとめるものである。 1) 試料 (a) 皮膜および接着剤の種類は表-10による。 (b) 下地モルタル板について 配合・1:2

(セメント:砂, 重量比) 標準砂使用, W/C=65%, 板寸法:100×50×13 (mm), 養生条件および材令:成型後20±3(°C) 水中養生20日間 20°C, R.H. 65% 7日間, 材令28日のもので含水率は高周波水分計にて6%であった。

2) 試験方法 (a) 試験機の概要 図-2による。 (b) 試験項目その他, 試験項目, 供試体の作製,

	試験項目	供試体の作成	試験方法
皮膜の力学的性質	a) 応力-歪曲線 (E) (例 図-2)	JIS K6301による (タンベル1号片)	JIS K6301による (引張速度 500mm/min)
	b) 引張強度 (σ_s) 伸び能力 (ε_s) 限界レジリエンス (R_s)	同上	JIS K6301による (3個の平均値)
皮膜防水層の引張破壊抵抗	a) 接着強度 (τ_1, τ_2)	図-3による	図-3, Pの方向に 50mm/min で引張
	b) 皮膜の剪断抵抗性 (例 図-4)	図-3による	同上

表-11 試験項目表

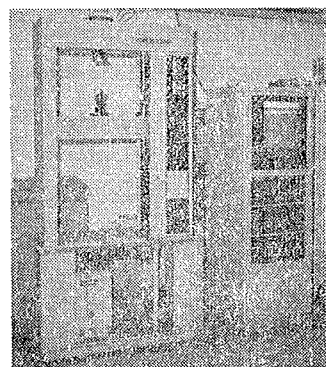


図-2 オートグラフ

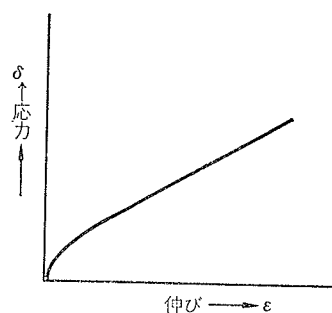


図-3 応力歪曲線

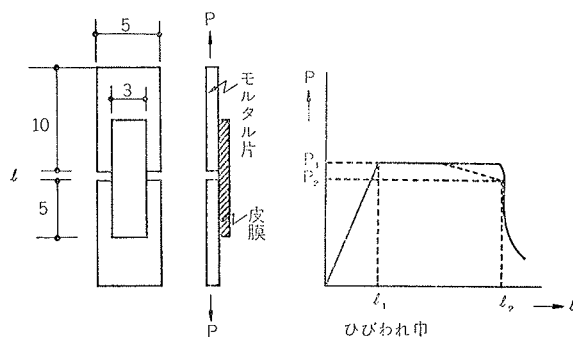


図-4 皮膜防水層供試体

図-5 荷重変位曲線

試験体記号	A-1	A-2	B-1	B-2	B-3	B-4	C	D	E
皮膜厚さ α (cm)	0.09	0.1	0.1	0.1	0.12	0.1	0.05	0.1	0.14
皮膜引張強度 σ_s (kg/cm ²)	119	113	48	91	74	75	129	21	81.5
皮膜伸び能力 ϵ_s (%)	6.7	4.3	6.0	8.0	9.4	8.1	3.6	7.3	4.8
限界レジリエンス R_s (kg/cm ²)	398	243	144	364	348	300	232	76.6	196
皮膜弾性率 E (kg/cm ²)	30	45	11	14	10	11	80	4	70

表-12 物性試験結果表

および試験方法については表-11のとおりである。

3) 試験結果 表-11のうち皮膜自体の物性試験の結果は表-12の通りである。

4) 試験結果の解析 表-12に示す試料B-4について解析すれば次のとおりである。

a) 物性: $d=0.1\text{cm}$, $\sigma_s=75\text{ (kg/cm}^2\text{)}$ $\epsilon_s=8.1$
 $E=11\text{ (kg/cm}^2\text{)}$

b) 引張試験結果: 試験体3個のすべてが剥離した。
 $P_1=4.83\text{ (kg)}$, $l_1=3\text{ (cm)}$, $P_2=5.2\text{ (kg)}$
 $l_2=23.7\text{ (cm)}$

$$R_s = \sigma_s \cdot \epsilon_s / 2 = 75 \times 8.1 / 2 = 300 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$\tau_{s1} = 4R_s \cdot d / l_1 = 4 \times 300 \times 0.1 / 3 = 40 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$\tau_{s2} = 4R_s \cdot d / l_2 = 4 \times 300 \times 0.1 / 23.7 = 5.05 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$\sigma_1 = P / 3d = 4.83 / 3 \times 0.1 = 16.1 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$R_1 = \sigma_1^2 / 2E = 16.1^2 / 2 \times 11 = 12.7 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$\sigma_1 = 4R_1 \cdot d / l_1 = 4 \times 12.7 \times 0.1 / 3 = 2.3 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$\tau_2 = 4R_1 \cdot d / l_2 = 4 \times 12.7 \times 0.1 / 23.7 = 0.25 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$f_s = \sigma_s / \sigma_1 = 75 / 16.1 = 4.5, f_r = \tau_{s1} / \tau_1 = 40 / 2.3 = 17.4$$

同じく試料Dについての場合

a) 物性: $d=0.1\text{ (cm)}$, $\sigma_s=21\text{ (kg/cm}^2\text{)}$, $\epsilon_s=7.3$
 $E=4\text{ (kg/cm}^2\text{)}$

b) 引張試験結果: 試験体3個のすべてが切断した。
 $P=5.3\text{ (kg)}$, $l_1=0.4\text{ (cm)}$, $P_2=5.0\text{ (kg)}$
 $l_2=2.5\text{ (cm)}$

$$R_s = \sigma_s \cdot \epsilon_s / 2 = 21 \times 7.3 / 2 = 76.6 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$\tau_{s1} = 4R_s \cdot d / l_1 = 4 \times 76.6 \times 0.1 / 0.4 = 76.6 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$\tau_{s2} = 4R_s \cdot d / l_2 = 4 \times 76.6 \times 0.1 / 2.5 = 12.2 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$\sigma_1 = P / 3d = 5.3 / 3 \times 0.1 = 17.7 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$R_1 = \sigma_1^2 / 2E = 17.7^2 / 2 \times 4 = 39 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$\tau_1 = 4R_1 \cdot d / l_1 = 4 \times 39 \times 0.1 / 0.4 = 39 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$\tau_2 = 4R_1 \cdot d / l_2 = 4 \times 39 \times 0.1 / 2.5 = 6.25 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$$

$$f_s = \sigma_s / \sigma_1 = 21 / 17.7 = 1.18, f_r = \tau_{s1} / \tau_1 = 76.6 / 39 = 1.96$$

以上が試験体3個のいずれもが剥離したものと、切断したものについての計算例であるが、同様の計算方法によって得た各皮膜防水層の試験体についての試験結果を表-13に示す。表-13中における f_s は皮膜の物性から見た破断に対する安全率、 f_r は接着層のせん断接着強度からみた安全率である。また備考欄にお

試験体	引張破壊試験結果				理論限界値			実応力の計算値			安全率		備考
	P_1	l_1	P_2	l_2	τ_{s1}	τ_{s2}	σ_1	R_1	τ_1	τ_2	f_s	f_r	
	kg	cm	kg	cm	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	-	-	
A-1	5.5	1.4	5.0	4.8	102	29.2	23	88.3	22.7	6.5	5.2	4.6	2 ₁
A-2	3.9	0.1	3.4	0.9	892	10.8	13	1.9	7.6	0.1	8.7	118	3 ₀
B-1	3.1	0.5	3.0	2.7	115	21.3	10.3	4.8	3.8	0.7	4.7	30.2	3 ₀
B-2	3.5	0.4	3.7	5.0	364	29.1	11.7	6.0	6.0	0.5	7.7	4.9	3 ₀
B-3	3.0	3.3	3.0	10.9	50.6	18.4	8.3	3.5	0.5	0.2	8.9	9.9	3 ₀
B-4	4.8	3.0	5.2	23.7	40.0	5.0	16.1	12.7	2.3	0.2	4.5	17.4	3 ₀
C	10.5	1.3	10.7	6.5	35.7	7.1	70	30.6	4.7	0.9	1.8	7.6	2 ₁
D	5.3	0.4	5.0	2.5	76.6	12.2	17.7	39	39	6.3	1.2	2.0	0 ₃
E	32.3	0.5	30.5	9.3	36.2	18.1	77	42	39.2	2.1	1.1	9.2	1 ₂

表-13 試験結果表

る上側の数値は皮膜の試験体の数、下側の数値は皮膜が切断した試験体の数である。 P_1 , P_2 , l_1 , l_2 については図-5参照

5) 考察

皮膜メーカーの指定する接着剤のなかにはシートの引張強度に比較して接着強度が著るしく高く、わずかの亀裂幅で皮膜が切断してしまうものも見られた。また接着剤の強度が皮膜の強度に比較して著るしく低く亀裂幅に関係なく剥離するものもある。防水層の破断に対しては後者のものが望ましいといえるが、実際上防水層を保持形成するに必要とされる下地との接着力の程度は今後の研究にまたねばならない。皮膜の物性と接着剤の能力の兼ね合いにおいて今回の実験値を検討すれば次のごとく考案される。

- a) f_s が2より小さいものは皮膜が切断し易い。
- b) f_s が2より大きいものは剥離する傾向にある。
- c) f_s と f_r がいずれも大きい場合は皮膜はほとんど剥離すると考えてよい。
- d) f_s , f_r については各種要因による材質劣化を考慮する必要がある。

2.2.2. 各種市販皮膜の劣化促進による影響について

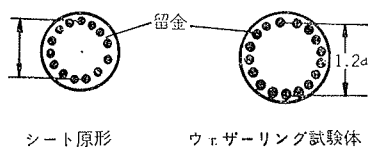
2.2.1. においては初期材令における皮膜防水層と下地亀裂との関係について検討したが、皮膜の劣化に伴なう防水層の耐久性の問題は最も重要である。そこで皮膜材質に劣化を与えて σ_s , ϵ_s (伸び能力) の変化に伴なう、下地の亀裂に対する安全性の変化を求めてみることにした。

1) 試料および接着剤は表-10と同様である。

2) 試験方法 a) 常態試験: JIS K6301に準じておこない、皮膜をダンペル号片に打抜き、引張速度 500mm/min で試験して、伸び (ϵ_s), 引張強度 (σ_s) を求めた。 b) ウエザリング: サンシャインカーボン型試験機を用い、皮膜を300時間劣化促進させたのち JIS K6301 に準じて試験をおこない σ_s', ϵ_s'

1 cycle	120 分
Spray	12分
Spray水圧	1.2kg/cm ²
ブラックパネル	50℃

表—14 運転条件



図—6 軸引張り試験体

り、局所的な応力集中の起らぬよう注意して施工しなければならないことが本実験からも重要であることがわかる。なお皮膜の劣化と共に接着剤の劣化も考慮に入れて皮膜防水層の安全性を検討することは必要であるが、接着剤の性能については今後の課題とした。

本実験をおこなうに当たっては、小野田セメント株式会社中央研究所 波木守氏、建設省建築研究所 大浜嘉彦氏の懇切な指導とご協力を得ました。ここに厚く感謝の意を表します。

試験	実 験 値						計 算 値						
	d	σ_s	σ_s'	σ_s''	ε_s	ε_s'	ζ_1	R_s	R_s'	R_s''	ζ_1'	ζ_1''	限界亀裂幅減少比
	kg/cm	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²			cm	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	kg/cm ²	ζ_1/ζ_1'	ζ_1/ζ_1''
A-1	0.09	119	112.4		6.7	6.6	1.4	23	398	370		0.93	
A-2	0.1	113	130.0	158.0	4.3	3.0	2.3	0.1	13	243	195	182	0.80 0.75
B-1	0.1	48	48.0		6.1	5.1		0.5	10.3	144	125		0.87
B-2	0.1	91	139.0	151.0	8.0	4.8	4.4	0.4	11.7	364	333	332	0.92 0.92
B-3	0.12	74	47.2	51.0	9.4	8.0	5.5	3.3	8.3	348	189	140	0.54 0.40
B-4	0.1	75	50.0	44.8	8.1	8.5	7.6	3.0	16.1	300	212	170	0.71 0.57
C	0.05	129	107.6	151.0	3.6	2.3	1.8	1.3	70.0	232	124	136	0.53 0.59
D	0.1	21	24.2	39.0	7.3	7.0	4.1	0.4	17.7	76.6	84.6	79.9	1.10 1.04
E	0.14	81.5	129.0		4.8	0.9		0.5	77.0	196	58.1		0.35

表—15 試験結果表

を求めた。ウエザーマーターの運転条件は表—14に示す。c) 2軸引張によるウエザリング：皮膜を図—6に示すように面に引張力を与えたのちウエザーマーターにかけ、300時間劣化促進をおこなったのちJIS K6301に準じて試験をおこない σ_s'' , ε_s'' を求めた。

3) 試験結果 表—15に示す。

4) 試験結果の解析 前にも述べたごとく

$$R_s = \sigma_s \cdot \varepsilon_s / 2, \tau = 4R_s \cdot d / l = 4d\sigma_s / 2 \cdot E \cdot l = 4d \\ = 4dE\varepsilon_s^2 / 2l$$

なる関係から次のごとく計算し、亀裂幅の減少比を求め(表—15)に示した。

$$l_1 = 4dE_0 \cdot \varepsilon_{s0}^2 / 2\tau_{s0} = 4d \cdot R_s / \tau_1,$$

$$l_1' = 4dE' \varepsilon_s'^2 / 2\tau_1 = 4d \cdot R_s' / \tau_1,$$

$$l_1' / l_1 = E' / E_0 \cdot (\varepsilon_s' / \varepsilon_{s0})^2 = R_s' / R_s$$

5) 考察 ウエザリングだけの単純劣化促進では、皮膜の破断しない条件としての亀裂幅の限界値の減少比は皮膜材別にポリクロロブレン0.86, ブチルゴム0.76, ポリ塩化ビニル0.53, ポリイソブチレン1.10, ポリエチレン0.35となった。減少比は皮膜の伸び変化の2乗に比例するが2軸引張り状態での劣化促進では、伸びの減少が著るしいものもあり、この場合限界亀裂幅も著るしく減少する。実際の施工にあ