

コンクリート中の水分形態と塗料の付着力に関する実験

——耐放射線性塗料の場合——

喜 田 大 三
住 野 正 博

Experiments on Moisture Form of Concrete and Adhesion of Paints

—Case of Radiation-Resisting Paints—

Daizo Kita
Masahiro Sumino

Abstract

It is necessary for radiation-resisting paints to adhere tightly to concrete in order to exhibit superior effects. As adhesion of paints to concrete is greatly affected by moisture content of concrete, this content is checked severely in the field. However, it may be considered that adhesion will be affected by the form of the moisture in the concrete also. Therefore, experiments were conducted with mortar to investigate the interrelations between pF-moisture content, moisture form and adhesion of paint. The following results were obtained:

- 1) Adhesion of paint becomes stronger as moisture content falls.
- 2) Adhesion strength of paint rises sharply until moisture content falls to a pF-value of 5.5 after which the strength is increased gradually until moisture content reaches pF of 7.0.
- 3) The pF-moisture content of 5.5 varies greatly depending on the mix proportions of mortar, but the form of moisture in such cases remains fixed and unchanged.

概 要

塗料とコンクリートとの付着性はコンクリート中の水分量に大きく影響されるといわれており、原子力発電所の建設現場などでは、塗装施工時の含水率を厳重に管理している。しかし、塗料の付着性はコンクリート中の水分量のみならず、コンクリート中の水のエネルギー状態変化にも影響されると考えられる。そこで、これを確認するため、耐放射線性塗料2種類とセメントの種類、配合比、pF-含水率および水分形態の条件を異にするモルタルを用いて付着力実験を行い、付着力と前記条件との相互関係を検討した。その結果、以下の知見を得た。1)付着力は含水率が低下するにしたがい増大し、含水率0で最大になる。その際、付着力は pF 5.5 の含水率まで急激に増大し、それ以後、pF 7.0 の含水率までゆるやかに増大する。2) pF 5.5 の含水率はモルタル配合比によって大幅に変化するが、この時の水分形態は一定である。3) pF 5.5 の含水率になった時に初めて、塗膜の破壊は凝集破壊あるいはそれに準ずる状態の破壊へ移行する。

1. はじめに

原子力発電所の原子炉建家、タービン建家、補機建家の床、壁、天井などのコンクリート部分には耐放射線性塗料が塗装されている。そして、この塗料の用途が原子力発電所という特殊な場所であり、塗替えがあまりできないことから判断して、また、この塗料がその耐放射線性、耐熱水性、耐汚染性を十分に発揮するためにも、塗料は下地コンクリートと十分に付着することが必要である。

ところで、塗料の付着性に影響する要因として下地コンクリート、塗料、塗装法および塗装時の環境などがあげられる。そして、現場では、施工の際にコンクリートの素地調整を充分に行うことを規定した上で、付着性に影響する因子として下地コンクリート要因のうち乾燥状態、pH を、環境要因のうち温・湿度を取りあげ、このうち特に乾燥状態については含水率で厳重に管理している。

また、この含水率については、各塗料メーカーが独自の立場からそれぞれの塗装仕様へ規定しているが、

提示された値は塗料とコンクリートとの付着性を裏付けるデータから決定されたものではなく、多分に経験的な要素から決定されたものである。このような状況において、塗料の付着性とコンクリート水分との間の関係を明らかにし、コンクリート水分に関する何らかの指針を明らかにすることが要望されている。

筆者らは、塗料付着性にはコンクリート中の水分のうち含水率で表わされる量的な水分もさることながら、水分形態で表わされる質的な水分の違いも影響するであろうと考えた。すなわち、コンクリートの打設後、水和反応を経て硬化が進む過程でコンクリート中の水分は存在形態を重力水、毛管水、膨潤水、吸湿水へと変化させ、これら形態が共存しながら最終的には化合水へ変化する。一方、乾燥過程では蒸発しやすい重力水から順次、除去され、その結果、含水率も漸次低下していくと判断される。そこで、いずれの水分形態で施工すればよいかを検討するために耐放射線性塗料を取りあげ、付着力が効果的に発揮できる水分形態を追究してみた。

ところで、水分形態と含水率との関係はすでに土壌学において研究され pF 概念として確立されている。これは水分形態を数値で表わそうとする方法であり、各種の手法で測定されている。この研究において、土質が異なれば土中水の水分形態が同じでも含水率は異なることが明らかにされている。したがって、コンクリートの配合比、セメントの種類が異なれば、同じ水分形態でも含水率は異なるであろうと予想される。

本報では、セメントの種類、配合比の違いが含水率と水分形態との関係におよぼす影響、ならびに耐放射線性塗料の付着力発現と含水率および水分形態との関係について、現象面から検討した資料を発表する。

2. コンクリート水のエネルギー指数 pF と測定法

pF 概念の詳細については別の論文^{1),2)}があるので、ここではその概略を述べる。

さて、土の水分形態と含水率との関係を本実験に適用すれば、水をコンクリートから除去するためにはコンクリートに熱的、機械的、電気的あるいは化学的エネルギーを加える必要があり、このエネルギー表示に pF 指数を使うことが可能である。

ところで、表-1 から明らかなように、pF は吸引力の水柱高 h cm の対数値であり、吸引力の強さあるいは自由エネルギー（ポテンシャル）のレベルを簡単に表示できる単位である。例えば、pF 3 とは 1000cm の水柱と等しい圧力（約 1 気圧）を示している。

水分形態	湿潤状態	pF 値	吸引力(Suction)		湿度 (%)	測定法
			水柱(cm)	気圧		
化合水	乾	7.0	10 ⁷	10 ⁴	0	↑ 蒸気圧法 ↑ 水蒸気法 ↑ 水蒸気降下法 ↑ 吸水法 ↑ 土柱法 ↑ 加圧法 ↑ テンションメーター法
吸湿水		6.0	10 ⁶	10 ³	50	
		5.5			80	
膨潤水		5.0	10 ⁵	10 ²	93	
		4.5			98	
毛管水	4.0	10 ⁴	10			
毛管重力水	潤	3.0	10 ³	1		
		2.0	10 ²	10 ⁻¹		
		1.0	10	10 ⁻²		
重力水		0	1	10 ⁻³		

表-1 水分形態と pF 値およびその測定法

また、理論的には pF は次式で定義されている。

$$pF = \log P, P = \mu_0 - \mu \dots\dots\dots(1)$$

上式において μ は問題とするコンクリート中の水の化学ポテンシャル（コンクリート中の水の単位質量あたりの部分自由エネルギー）であり、重力場に対してなされる仕事を水頭の単位で表わしたものである。また、 μ_0 は基準状態（1 気圧、常温）にある純水の化学ポテンシャルである。したがって、P は基準状態に対する化学ポテンシャルの低下量であり、内容的には前述の水柱高と同じものである。

ところで、コンクリート中の水のエネルギー測定はコンクリートから水を取去るに要するエネルギーをいろいろ変えて、後述の pF 含水率を測定することによって行われる。その結果、表-1 に示すようにコンクリート中にはエネルギー状態が異なる、すなわち性質の違う各種形態の水分が存在し、それに応じて、その測定法も異なってくる。

また、pF 含水率とは、その測定 pF よりもエネルギーの大きい、つまり pF 7.0 (105°C 乾燥に相当) までの全水分量である。そして、その結果は乾燥重量あたりの水量 (%) として表示される。

3. 供試塗料および供試体の作製

3.1. 供試塗料

市販の耐放射線性塗料のうちエポキシ樹脂塗料 1 種類（以下、エポキシ塗料という）、フェノール変性エポキシ樹脂塗料 1 種類（以下、フェノール変性塗料という）を供試した。

3.2. 供試体

セメント 2 種類（普通ポルトランド、フライアッシュ B 種）、川砂を用いて水セメント比 50%，配合比 3 種類すなわち A 配合 (c/s=1/1)、B 配合 (=1/3)、C 配合 (=1/5) のモルタルを練り、成型、水中養生後 pF 3.0, 4.5, 5.5, 6.0, 7.0 の条件下に所要期間養生し

て pF-含水率の測定に供試した。一方、同様の方法で作製したモルタル供試体の一面に常法にしたがい 200 μ の膜厚に塗装し、付着力試験に供試した。

4. 実験方法と結果の表示法

4.1. pF-含水率の測定

各 pF 条件で養生したモルタル中に含まれる水分量を乾量基準 (105°C 乾燥) の含水率で表示する。

4.2. 各 pF における塗膜の付着力の測定

常法にしたがい塗膜のせん断付着力を測定する。その付着力は下式から求める。

$$\begin{aligned} \text{せん断付着力 (kg/cm}^2\text{)} \\ = 16T/\pi D^3 = 3.54T \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(2)$$

T : トルクせん断力 (kg-cm)

D : スペシメン直径 (1.13cm)

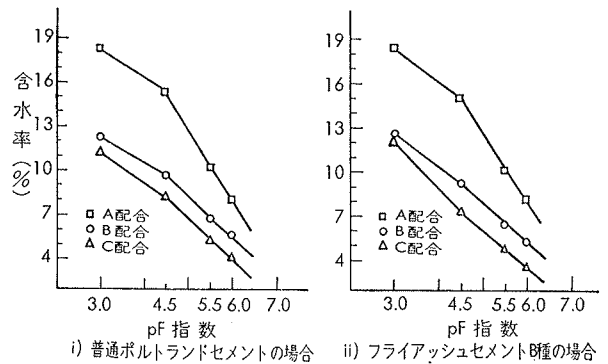
5. 実験結果と検討

5.1. 含水率測定結果について

pF と含水率との関係をセメントの種類ごとに図-1 に示す。

同図において、含水率は pF 指数が大きくなるにしたがい一様に低下することが明らかである。しかも、セメントの種類が異なる場合でも配合比が同じであれば、それぞれの pF における含水率には大きな差が認められない。一方、セメントの種類が同じ場合には、それぞれの pF における含水率は使用セメント量が多いほど高くなる傾向が認められる。これはモルタル中の粒子間隙による影響であると判断される。

これらのことより、それぞれの pF における含水率



i) 普通ポルトランドセメントの場合 ii) フライアッシュセメントの場合

注) A 配合 (c/s=1/1), B 配合 (c/s=1/3), C 配合 (c/s=1/5)

図-1 pF-含水率曲線

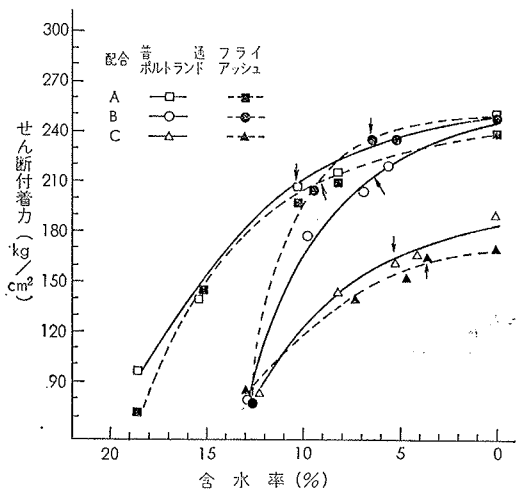
にはモルタル配合比の違いが大きく影響し、セメントの種類の違いはほとんど影響しないと判断される。

5.2. 付着力測定結果について

セメントの種類、配合比が異なるモルタルの含水率と塗膜のせん断付着力との関係を塗料種類ごとに図-2, 3 に示す。

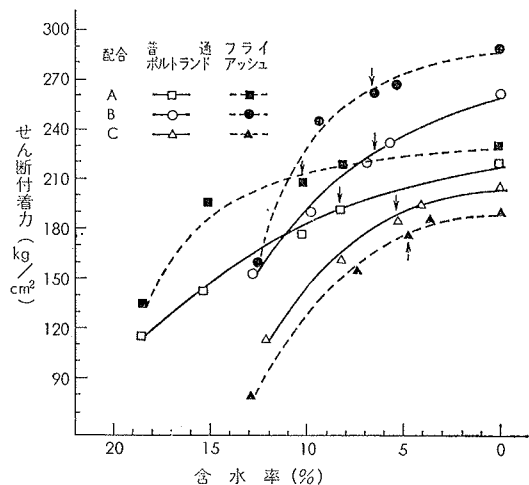
両図において、塗料付着力は含水率の低下にしたがい一様に増大し、含水率 0 で最大になることが明らかである。しかも、この傾向はセメントの種類、モルタル配合比および塗料種類の違いにも影響されていない。

ところで、両図における付着力の変化には次のような特徴ある傾向が認められる。すなわち、付着力は曲線上に示した矢印部分の含水率あたりまで急激に増大し、それ以後、含水率 0 まではゆるやかに増大している。しかも、この傾向はセメントの種類、配合比なら



注) A 配合 (c/s=1/1), B 配合 (c/s=1/3), C 配合 (c/s=1/5)

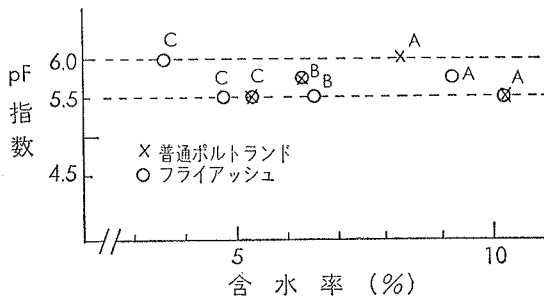
図-2 エポキシ樹脂塗料の付着力と含水率の関係曲線



注) 配合比は図-2 の場合と同じである。

図-3 フェノール変性エポキシ樹脂塗料の付着力と含水率の関係曲線

びに塗料の種類の違いにも全く影響されていないことが明らかである。また、この現象は、付着力の増加と水分量の低下との間に密接な関係があることを単に示唆するものであり、この現象からは付着力が十分に発揮できる適正な含水率に関する指針は得られない。そこで、この矢印部分における水分が存在する pF 条件を図一1から検討したところ、図一4の関係が求められた。



注) 記号の右肩に示した文字はそれぞれのモルタル配合比を示す。

図一4 付着力の変曲点における pF と含水率の関係

同図において、矢印部分の水分は pF 5.5~6.0 の条件下に存在していることが明らかである。そして、この pF における水分形態は表一1から明らかなように、それぞれ膨潤水と吸湿水の境界、初期の吸湿水である。

さて、図一2、3から明らかなように、塗料の付着力を理想的に発揮させるには含水率を0にする必要がある。そして、これは、表一1に示すように pF 7.0 のエネルギー条件すなわち 105°C で乾燥することを意味する。しかし、この条件を実現するにはエネルギー的に非常な困難を伴い、実際的でないと判断される。

また、付着力増加の状況および自然状態(1気圧、常温)において実現可能なエネルギー条件が pF 5.5 前後である³⁾ ことから判断して、曲線上の矢印部分は付着力を効果的に発揮できる位置、すなわち付着力の変曲点を示していると判断される。

ところで、この変曲点における含水率には、モルタル配合比ごとに分布する傾向が認められる。すなわち、A配合では8.3~10.3%、B配合では6.3~6.5%、C配合では3.6~5.3%の範囲にあり、同一配合内における含水率の差は0.2~2%を示している。この含水率の差は、変曲点の pF が5.5~6.0に分布しており、0.5の幅を有しているために生じたものであると判断される。

一方、変曲点の含水率は配合比間において最大3~7%の差が認められる。これは図一1の関係から当然

の結果であると判断される。

これらのことより、付着力の変曲点の位置は含水率で比較すればモルタル配合比の影響を受け大幅に変化するが、水分形態で比較すれば、ほぼ一定であると判断される。

さて、変曲点における付着力には図一2、一3から明らかなように塗料、セメントの種類およびモルタル配合比間で、かなりの差が認められる。そこで、変曲点における付着力発現の状況を検討するため pF 5.5~6.0 の付着強度比を求めたところ表一2の関係が得られた。同表の各 pF における数値は、塗料の種類、セメントの種類およびモルタルの配合比ごとに、pF 7.0 塗膜の付着力をそれぞれ 100 (%) とした時の割合である。

塗料	pF	セメント	普通ポルトランド			フライアッシュB種		
		配合	A	B	C	A	B	C
エポキシ樹脂塗料	5.5	(83)	83	(84)	82	(94)	90	
	5.8	85	(86)	85	(85)	94	94	
	6.0	86	89	85	87	94	(98)	
フェノール変性エポキシ樹脂塗料	5.5	80	84	(90)	(90)	(90)	(93)	
	5.8	84	(87)	92	93	92	96	
	6.0	(87)	89	94	96	93	99	

注1) 表中の () は変曲点であることを示す。

注2) A配合(c/s=1/1), B配合(c/s=1/3), C配合(c/s=1/5)

表一2 pF 5.5~6.0 における付着強度比

同表において、塗料およびセメントの種類が同じであれば、配合比が異なる場合でも付着力の変曲点における付着強度比に大きな差は認められない。

一方、変曲点が pF 5.5 以上に位置する場合、pF 5.5 から変曲点の pF 条件まで変化したことによる付着強度比の増加は3~7 (%) である。また、pF 条件が5.5から6.0に変化したことによる付着強度比の増加は3種類の配合比を通じ次のようである。すなわち、ポルトランドセメントの場合、エポキシ塗料では1~6 (%)、フェノール変性塗料では4~7 (%) であり、フライアッシュセメントの場合には、それぞれ5~8 (%)、3~6 (%) である。この増加程度はセメントおよび塗料の種類とは関係なく、ほぼ同じ値を示しており、また、この値そのものもあまり大きくない。このことは、2番目に大きな付着力を示す pF 6.0 の塗膜の付着力と pF 5.5 のそれとの間に、あまり大きな差がないことを示している。

これらのことより、pF 5.5 条件の水分形態になれば塗料の種類、セメントの種類およびモルタル配合比に関係なく、塗料の付着力は効果的に発揮されると判断される。

ところで、付着力測定時の塗膜の破壊状況を各 pF

の塗膜間で比較したところ、次のようであった。すなわち、セメントおよび塗料の種類とは関係なくA配合の場合、pF 3.0~4.5の含水率では塗膜とモルタルの界面から剝離する接着破壊を示し、pF 5.5の含水率では凝集破壊に準ずる混合破壊を示した。また、pF 6.0~7.0の含水率ではモルタル内部から剝離する凝集破壊を示した。同様にBおよびC配合の場合、pF 3.0の含水率では接着破壊を示し、pF 4.5の含水率では接着破壊と凝集破壊が混在して剝離する混合破壊を示した。また、pF 5.5~7.0の含水率では凝集破壊を示した。

ところで、この破壊結果から特徴ある現象として、塗膜がpF 5.5の含水率で凝集破壊あるいはそれに近い状態で破壊することがあげられる。そして、このことは、pF 5.5の条件で塗料が十分に付着していることを示している。

また、この現象は塗料の付着力と含水率および水分形態との関係から次のように説明できる。すなわち、pF 3.0~4.5における水分は自然界において容易に除去される重力水、毛管水の形態で存在している。そして、これらの水分がモルタル内に多く存在することは、塗装時、塗料とモルタルとの接触を妨げる要因となる。その結果、塗料とモルタルとの間の異種分子間凝集エネルギーが低くなり、接着破壊あるいは混合破壊が発生するのである。一方、pF 5.5条件下の水分形態は膨潤水と吸湿水との境界に位置しており、また、この条件はすでに述べたように、自然状態(1気圧、常温)で水分を除去しうるエネルギーの限界点に位置している。それゆえ、この条件におけるモルタル内の水分量は十分に少ないと判断される。また、この水分形態よりも高エネルギー状態の水分形態すなわち吸湿水、化合水へ移行すれば、塗料とモルタルとの接触を妨げる水分はモルタル内に存在しなくなり、さらに、塗料のモルタル内への浸透も充分に行われると判断される。その結果、異種分子間凝集エネルギーも充分に高くなり、また、塗料付着力がモルタル強度よりも大きくなる。その結果、pF 5.5より高エネルギー条件になれば、凝集破壊あるいはそれに準ずる破壊が発生する。

以上のことより、塗料の付着力を充分に発揮させるには、塗膜が凝集破壊する含水率までモルタル内の水分量を低下させる必要があると判断される。そして、この条件を満足できるのはpF 5.5の含水率であり、また、この条件における水分形態は膨潤水と吸湿水の境界に位置していることが明らかである。

また、上述の関係は、単に耐放射線性塗料のみならず、エマルジョン塗料を除くコンクリート用の一液性および二液性塗料、ならびに各種ライニング材の場合にも適合できると判断される。

6. まとめ

塗料とコンクリートとの付着性はコンクリート中の水分量に大きく影響されるといわれている。しかし、塗料の付着性はコンクリート中の水分量のみならず、コンクリート中の水のエネルギー状態変化にも影響されると考えられる。そこで、これを確認するため耐放射線性塗料2種類とセメントの種類、配合比、pF-含水率および水分形態の条件を異にするモルタルを用いて付着力実験を行ない、付着力と前記条件との相互関係を検討した。その結果、以下のことが判明した。

1) 塗料の付着力は塗料およびセメントの種類、ならびにモルタル配合比に関係なく、含水率が低下するにしたがい増大し、含水率0で最大になる。その際、付着力はpF 5.5~6.0の含水率まで急激に増大し、それ以後、pF 7.0の含水率までゆるやかに増大する(図-2, -3参照)。

2) pF 5.5~6.0の含水率はモルタル配合比によって大幅に変化するが、この条件における水分形態はそれぞれ膨潤水と吸湿水との境界、初期の吸湿水であり、ほぼ一定している(図-4参照)。

3) pF 7.0の塗膜の付着力に対するpF 5.5~6.0の付着強度比を求めたところ、pFが変化したことによる増加があまり認められず、pF 5.5条件で付着力は効果的に発揮されると判断された(表-2参照)。

4) 付着力測定時の塗膜の破壊状況を各pFの塗膜間で比較したところ水分の影響が明瞭に認められ、pF 5.5の含水率および水分形態になった時、初めて塗膜は凝集破壊あるいはそれに準ずる破壊を示した。

以上のことより、コンクリート中の水分が量的にはpF 5.5の含水率、質的には膨潤水と吸湿水の境界に位置する水分形態になった時、塗料の付着力は充分に発揮されることが判明した。

参考文献

- 1) 岩田：土壤水のエネルギー概念について、土肥誌 32, (1961), 572
- 2) 竹中：土壤水のエネルギー概念 pF の工学的検討 土壤の物理性第14号, (昭和41年), 21
- 3) 山崎：土壤物理 養賢堂
- 4) 黄：接着の化学と実際 高分子刊工会