アルミニウムとアルカリ性建築材料との適合性*

Compatibility of Aluminum with Alkaline Building Products

C. J. Walton,** F. L. McGeary** and E. T. Englehart**

Corrosion, Vol. 13, No. 12, 807t~816t (1957) Dec.

緒 論

アルミニウム合金はその広範囲な性質と耐食性のよいことを含むその特性のために建築材、構造材および工学的目的に用いられる使用量が増大しつつある。以前には特別な応用にのみ用いられたアルミニウムはすぐれた建築材料となり、いろいろな他の金属および非金属建築材料とともに用いられるにちがいない。

異なる金属を含む場合には接触腐食の危険を考えねばならない。現在ではこの考えは重要視されていて、異種金属と直接に接触する場合のアルミニウム合金の耐食性は少なくとも最も適合性のよい組合せの選択が予想できる。¹⁻³⁾

非金属建築材料はぬれると化学作用、通気の差の影響および異種金属間の接触腐食を助けることによって金属に腐食を起させるであろう。それゆえに湿った、またはぬれた状態での金属と非金属建築材料の接触による腐食効果についての実際のデータを得ることは大切である。これは Alcoa 研究所での長年の研究テーマであり、そこでの発見の多くは建築および構築の分野で用いられている。

非金属建築材料の多くはポルトランドセメント、石灰、マグネシウム化合物、あるいはアスベスト等を含むのでアルカリ性である。これらの材料は大量に使用され、また多くの人がこれらの材料によって起る腐食に対するアルミニウムの耐食能力をよく知らないのので特に興味がある。アルカリ性建築材料と接触したアルミニウム合金の挙動に関する適切なデータを経括することがこの論文の目的である。

化 学

アルミニウム合金の耐食性はその表面に自然に発達した薄い、眼に見えない酸化皮膜による。McKee および Brown⁴⁾ は pH 4.5 から 8.5 の中性または中性に近い溶液に浸すとさらにアルミナの加水物ができて、新しい環境に対してこの耐食性を強めることを示した。

しかしアルカリ性溶液（および酸性溶液）は存在する酸化皮膜を溶解する傾向がある。これらの溶液はアルミニウムを侵すであろうが、その一方他の形の皮膜を発

達させる。苛性ソーダ中でできる皮膜は非常に溶け易く、腐食が速く進行する。これに対して水酸化カルシウム、水酸化マグネシウム、またはアンモニア水中でできる皮膜は溶解度が小さく、それ以上の侵食に対して非常に抵抗性ある障壁となる。このようにそのアルカリ性が水酸化カルシウムまたは水酸化マグネシウムからくるような建築材料あるいはそのあく汁は裸のアルミニウムの表面に全面侵食を起すが、その結果は以後の侵食を妨げる保護皮膜を発達させる。これらのアルカリ性材料はわずかに軽度、あるいは中程度の表面侵食を起すが、侵食の多くはそれに暴露された初期に生ずる。硬化あるいは老化過程の間に遊離のアルカリはさらにアルミニウムに対する作用の少ない炭酸塩に転化する。

新しく施行したコンクリート、しっくい、モルタル化粧しっくい (stucco) およびアスベストセメント等からの排水は非常にアルカリ性が高い。これらの排水またはあく汁のアルカリは表面を保護されていないアルミニウムを十分に侵すほど強い。この侵食は普通はほんの表面的なものであるが、表面を変色させるのに十分である⁵⁾。このような侵食は建築中、あるいはその直後に起り易い。雨は表面から有効なアルカリを急速に流し出し易いので、その後に出るあく汁はアルミニウムを侵食するほどのアルカリを含まない。アルミニウムの汚れは透明なメタクリレート樹脂皮膜を用いることによって効果的に防ぐことができる。この処理は窓、扉、装飾金具、その他の建築部品の建築中の変色および、建築後の付着したモルタル等の除去を容易にするために用いられている。

実験室における試験法

アルミニウム合金とアルカリ性建築材料との適合性を調べるためにいろいろな試験方法を用いた。材料の寸法および組立て方法を使用条件にらせて試験を行なった。普通あらかじめ作った非金属材料を二つの金属片の間にサンドウィッチ状にはさんだ。

この金属片はアルミニウム同志、またはアルミニウムと他の異種金属で、それらを互に電気的に結んだ場合、および結ばない場合について行なった。異種金属の場合は接触腐食の研究を行なった。保護皮膜をつけるとか、腐食抑制剤を用いる等の特殊処理もサンドウィッチ試験に加えた。これらのサンドウィッチ型に組立てた試験片を普

* 訳者 沢柳文夫 科学研究所

** Alcoa Research Laboratories

通は120°Fで相対湿度100%の温い湿った雰囲気中に入れた。この暴露期間は6ヵ月であった。しつくい、セメントあるいはコンクリートのような **monolithic** 型の建築材料に対しては、アルミニウム板を新しい材料中に埋込むか、または非金属材料をアルミニウム合金試験片の型に流し込んだ。これらの固めた試料をいろいろな湿った条件の中に曝した。金属（および非金属）を多湿条件の下に暴露することの影響はその腐食程度を肉眼検査、接触腐食電流の測定、重量測定、および顕微鏡検査によって調べた。腐食生成物の性質および成分を調べるためにいくつかの試験を行なった。

実験室で行なった試験の多くはアルミニウム合金3003-H14を用いた。1.25%マンガンを含むこの合金は建築分野で広く用いられ、その成績は多くのアルミニウム合金の代表的なものである。実験室試験で用いた鋼は0.04%炭素を含む研摩仕上げをした軟鋼であった。

後に述べる試験で“モルタル”という言葉はポートランドセメントと砂の1:2の混合物である。これに対して“コンクリート”と呼ぶものはさらに3の割合の砂利を含むものである。

試験結果および使用結果

多くのアルカリ性建築材料とアルミニウム合金の組合せに関する試験を Alcoa 研究所において行なった。試験を行なった材料の一覧表を第1表に掲げる。そのすべてを詳しく論ずることはあまり重要でないがアルカリ性建築材料の比較的重要なものいくつかについて説明する。

第1表 アルカリ性建築材料 (Alcoa 研究所にてアルミニウム合金との適合性を調査)

アスベストセメント耐火性断熱材	乾壁板—石膏型
アスベストセメント屋根板およびルーフィング	とろ (Grouting)
アスベスト断熱紙	しつくい (Gypsum Plaster)
珪酸カルシウム型耐火性絶縁紙	Iron-Bearing セメント
人造石	Latex セメント
可成形性耐火物セメント	しつくい (Lime Plaster)
コンクリート	石灰石
コンクリート—Bubble slag 入り	85%マグネシア耐火性絶縁材
コンクリート—Pre-cast	オキシ塩化マグネシウムセメント
コンクリート—気泡入り	大理石
コンクリート—軽量物入り	モルタル
Crushed slag	焼石膏
乾壁板—セメント型	軟ガラス
	化粧しつくい (Stucco)
	Terrazzo 床材料

(注) 上に掲げた諸材料はいろいろな試験条件でアルミニウム合金と共に用いて満足すべき結果を示すことがわかった。これらの材料はアルミニウム合金に軽度の食刻を起す以上のことはなかったが、あるものは異種金属と電気的に結合した場合にはアルミニウム合金の接触腐食を起すことがわかった。この場合によい結果を得るためには保護の方法が必要であつた。

アスベストセメント製品

多くのアスベストセメント製品がアルミニウム合金と組合せて用いてよい結果を示している。の中にはアス

ベストルーフィング、耐熱材があり、特に屋根板としてよく用いられている。アスベストセメント屋根板の場合にはアルミニウム合金の爪が耐食性のある、さびない止め金具として用いられている。これに加えてアルミニウム合金の雨押えや飾り金具がこの屋根板と共に広く用いられている。

アスベストセメント屋根板および他の製品は非常にアルカリ性が強く、研究室の試験ではその pH は11ないし12であったが、アルミニウム合金はこれらの製品からの濃いあく汁に対しても大きな耐食性をもつことを示した。たとえばアスベストセメント屋根板をよく粉碎して水にさらすと pH 約12の溶液ができた。この濃いあく汁中にアルミニウム合金 6061 の爪を100 hr 浸漬した。この爪を適時取出して重量減を測った。第1図に示

第1図 6061 アルミニウムの爪を1.891 gのアスベストセメントの水によるあく汁に浸した場合の影響

すように溶液のアルカリ度(pH)は高いままであったが、侵食率は浸漬時間と共に著しく減少した。さらにアルミニウムとこれらの材料の適合性を調べるために大気暴露試験を行なった。Rhode Island 州の Point Judith の海岸の雰囲気中での4年間の暴露試験および、Pennsylvania 州 New Kensington の工場雰囲気中での8年間の暴露試験はアスベストセメント屋根板に打った爪は非常によい状態にあり、わずかに表面侵食がみとめられるにすぎないことを示した。実際に使用した場合も同様によい結果が得られている。

アスベストセメント材料とともに用いたアルミニウム合金製爪のよい耐食性は二つの因子による。第1はこれらの材料の物理的性質である。表面の密度が高く、ガラス状になっているので普通の使用状態ではそれらから多量のアルカリ性物質が出ることがむずかしい。第2にこれらのアルカリ性材料と接触した結果アルミニウム合金上にできた皮膜がアルミニウムのそれ以後の大きな腐食を保護することである。

断熱材料

多くの場所でアルミニウム合金はアルカリ性断熱材料とともに用いられる。これらの中にはボイラーのカバー、

パイプのカバー、壁板、その他比較的高温の断熱を必要とする工業的应用等が含まれる。これらの断熱材はその主成分として普通マグネシアまたは珪酸カルシウムが用いられる。またそれらはいろいろな種類の製品を作るためにアスベストおよび珪藻土のような他の充填材と組合せて用いられる。

一般にこれらの断熱材はアルミニウム合金に対して腐食性でなかった。湿気のある条件のもとではマグネシアおよび珪酸塩型は接触するアルミニウム合金にわずかに食刻を起させた。しかし電氣的に結合したアルミニウムと鋼の間にこれらの断熱材をサンドウィッチ状にはさむと湿った条件のもとではアルミニウムの接触腐食が進行した。この点からこれらの材料で断熱した鋼製装置を被覆するためにアルミニウムを用いる場合には注意深く考えねばならない。もし断熱材がぬれると、鋼が被覆材と電氣的に結合されている場合には直接断熱材によってではなく、接触腐食によってアルミニウム被覆材の腐食が起る。

それに関係のある用い方として可成形性耐火物型のセメントがアルミニウムと接して用いられる場合がある。目下発達しつつある興味ある一つの応用は発電所のボイラーの被覆、特に外気に曝される部分の被覆にアルミニウムを用いることである。熱絶縁は可成形性耐火物を用いるし、被覆は断熱材がまだぬれている間に取付けられるであろうからアルミニウム被覆材と内部のボイラーの鋼材との間に接触腐食の可能性が生ずる。研究室の試験で可成形性耐火物に腐食抑制剤を加えることによってこの腐食の危険を実質的に除き得ることがわかった。重量で1%のクロム酸ソーダを耐火物の乾燥混合物に加えることによって実質的にすべての腐食を抑制し得た。この方法はボイラーをアルミニウムで被覆したある大発電所で用いて成功した。

建築への応用としてはガラス繊維製品を断熱材として用いた。軟質ガラスから作った繊維はぬれた状態では強いアルカリ性のためにアルミニウムに対しては著しく腐食性であるが、これは軟質ガラス繊維から溶け出る苛性ソーダのためであろう。しかし珪酸塩ガラスはもともと中性で、アルミニウムとともに用いる場合に軟質ガラスに代って選ばれる。

アルカリ性床材料

アルミニウム合金は目地、鑄造裝飾物、sub-floor としていろいろな型のアルカリ性床材料と接触して用いられる。これらの材料の pH は 9 から 10 であるにもかかわらず一般にアルミニウム合金のこれらの材料による腐食に対する耐食性はすぐれている。これらの床材料のあるものはアルミニウムと他の金属の間に接触腐食を起し得るので特別な考慮を必要とする。アルミニウム合金と

もに用いられる床材料の主要な型の一つはオキシ塩化マグネシウムセメントである。このセメントは酸化マグネシウムと塩化マグネシウムから作られる。これはアルカリ性でその水による浸出液の pH は約 9.5 である。研究室試験ではそれと接触したアルミニウム合金はセメントの初期硬化期間中にわずかに表面食刻を受けた。しかしこの物質はその塩化物含有量が高いので湿気が多い条件のもとでは他種金属との間に接触腐食を起すであろう。研究室試験の結果はアルミニウムそれ自身および他金属と結合した場合の耐食性は1½%の重クロム酸カリ(乾燥重量)を加えることによりセメントに対する腐食抑制力を著しく増すことを示した。この腐食抑制効果は多くの使用実績によって実証され、現在ではアルミニウム合金が用いられるところでは普通に採用されている⁶⁾。重量物に瀝青質またはアスファルト型の保護被覆を用いることもこの種の腐食を抑えるのに役立つことがわかった。

モルタルおよびコンクリート

近年米国で用いられるコンクリートの重量は米国のすべての金属の生産と、すべてのレンガ、タイル、材木の生産の総計をはるかに超過した⁷⁾。コンクリートの広い用途を考えれば、アルミニウムおよび他の構造用金属材料がそれといろいろな組合せて用いられることは驚くに当たらない。それゆえに、アルミニウムをコンクリートとともに用いた場合の耐食性に影響する因子を明らかにすることは大切である。この報告ではこれらの因子の中、(1)コンクリートとの直接接触、(2)コンクリートの量、(3)水分の保持力、(4)接触腐食作用について研究し論ずる。

コンクリートは普通は I 型のポルトランドセメントと砂およびその他の固形物の混合物である。研究室試験で一般に用いたコンクリートは I 型ポルトランドセメント、洗った川砂、および砂利をそれぞれ 1:2:3 の比に混合したものであった。

Wright, Godard, および Jenk⁸⁾ の試験は用いたセメントの商標は重要でないことを示した。このことは一つの商標のセメントを用いた腐食試験は市販のセメントの作用の代表なものであると考えてよいことを示している。次に過去数年間に行なった一連の試験で得られたデータのいくつかを示す。

Pre-cast 材料との直接接触

アルミニウム合金は公道のさく、街燈の支柱、窓、建物の外装、冠石、雨押さえ、その他 pre-cast モルタルあるいはコンクリートと接触する多くの用途に広く用いられている。このような用途は永久的なものであるもので、これらの二つの構築材料の接触によって起るかも知れない異常な条件を補償するためにアルミニウム表面に保護被覆を施すのが普通である。多くの使用結果はいろ

いろいろな条件でアルミニウム合金は非常に耐食性を示した。

モルタルあるいはコンクリートに埋込んだ

アルミニウム

多くの場合にアルミニウム合金は新しいモルタルまたはコンクリート中に埋込んで用いてよい結果を示した。ある場合にはコンクリートがまだ流動状態にあるはじめの2～3 hr に腐食が起ったが、これは一般にあまり重大でない。非常に保護的な皮膜ができて、それ以後の侵食を妨げる。この自己抑制型の腐食は研究室試験で確認され、実際の使用によって実証された。コンクリートの硬化期間中に生じた侵食の深さの測定値は一般に 1 mil よりも少なかった。6 ヶ月, 8 ヶ月, あるいは 27 年後の侵食の深さは 5 mil より大きくなかった (第2表)。

第2表 コンクリート中に埋込んだアルミニウム試験片の侵食深さの顕微鏡的検査の結果¹⁾

コンクリート中の時間	アルミニウム合金	侵食の平均深さ ²⁾ mil	侵食の最大深さ mil
1 hr	3003	0～0.1	0.4
6	3003	0.1	0.4
24	3003	0.1	0.4
9 day	3003	0.4	0.7
28	3003	0.6～0.9 ³⁾	1.3～1.5 ³⁾
60	3003	0.1～0.4 ³⁾	0.5～1.1 ³⁾
90	3003	2.9 ³⁾	4.3 ³⁾
6 mo	3003	0.2～1.8 ³⁾	0.6～4.3 ³⁾
屋内にて 8 yr		1.7	5.0
工場雰囲気中にて 8 yr ⁴⁾	6053	1.9	3.8
海岸雰囲気中にて 8 yr ⁴⁾	2017	2.4	4.4
工場雰囲気にて 27 yr (鋳造合金)	43	1.4	4.1
工場雰囲気にて 27 yr (加工した合金)	6051	1.4	2.6

注(1) この表はモルタルまたはコンクリート中に埋めた試料についての測定である。研究室試験ではモルタルに塊状物を加えても埋込んだアルミニウム合金には大きな影響はなかった。

(2) この値は個々の腐食個所の平均値で全面についての平均値ではない。

(3) これらの試料は試験期間中常にぬれた状態に保ったコンクリート中に埋めた。

(4) これらの試料は自由に大気中にさらされたコンクリート中に埋めた。他のすべての場合はコンクリートは室内条件で硬化させた。

コンクリート量の影響

コンクリート量を増加した場合に埋込んだアルミニウム合金板の腐食率に及ぼす影響を調べるために一つの試験を行なった。この試験では 1 in×6 in のアルミニウム合金試験片を 56 in³ から 384 in³ まで容積を変えたコンクリートブロックの中に埋込んだ。室内条件で 2 ヶ月硬化させた後試験片を取出し、その重量減から腐食量を算出した。第2図に示すように腐食量はコンクリート量を増

第2図 3003-H14 アルミニウム合金板を 8 週間室内条件でコンクリートに埋めた場合のコンクリート量の影響

すとともに増加する。しかしアルミニウム合金の腐食は大量のコンクリートに対してもあまり重大

でない。このようにアルミニウム合金を埋めるコンクリートの量は、このような条件ではその耐食性に対してあまり大きな意味を持たないことが明らかであろう。

残留水分の影響

コンクリート中に埋めたアルミニウムの耐食性に及ぼす他の因子は引続き存在する水分である。換言すれば引続きぬれた状態で硬化したコンクリートは乾燥状態で硬化したコンクリートとは異なった影響を埋込んだアルミニウムに与えるであろう。この可能性を調べるためにアルミニウム合金板を埋めた 3 個のコンクリート塊を作った。一つの塊は貫通したプラスチックの型に打込んで試験期間中 (3 ヶ月) 直接に水の中に浸漬した。他の二つのコンクリート塊は乾燥状態で硬化させた。その一方は室内条件で 6 ヶ月間硬化させ、他はコンクリート塊製造後 24 hr 水中に浸漬し、6 ヶ月間同じ条件で硬化させた。直後に水中に浸した試料は 3 ヶ月間この条件で硬化を続けた。硬化期間の終りに試料を取出し、浸漬の影響は重量減少および、侵食の深さを測定して評価した。第3表に示すようにアルミニウム合金はすべての条件でほとんど影響を受けず、外部の水分はコンクリート中に埋込んだアルミニウムにはほとんど作用を与えないことを示した。

第3表 コンクリート中に埋込んだ 3003 アルミニウム合金に及ぼす残留水分の影響¹⁾

条 件	侵食深さ mil		体積減少量 (計算) ⁴⁾ in³/in²/yr
	平 均	最 高	
室内条件にて 6 ヶ月	0.7	1.2	0.00052
ぬれた条件で連続 6 ヶ月 ²⁾	1.2	4.1	0.00120
同 上 3 ヶ月 ³⁾	2.9	4.3	

注(1) コンクリートは 1:2:3 の混合物を用いた。

(2) コンクリート打込み後 24 hr で型を試料からはずした。

(3) この試料のコンクリートは水中で注入し、試験期間中そのままにした。

(4) この値は重量減少によつた。

コンクリート中の電気化学的結合の影響

前述の結果によればコンクリート中に埋めたアルミニ

ウムは軽度の全面腐食を起すことを示した。しかし各種の構造材として用いる場合にはアルミニウムは同じく埋込まれた補強用あるいは構造用鋼と直接あるいは間接に結びつけられるであろう。研究室試験の結果はコンクリート中でアルミニウムは軟鋼に対して陽極的であるが鋼の比面積、硬化条件等の種々の因子の接触腐食作用に及ぼす影響についてはあまり知られていない。それゆえにこの性質を調べるためにいくつかの試験を行なった。

陰極面積の影響

陰極面積の大きさの変化の影響を調べるために 1×6 in の 3003 アルミニウム合金板を軟鋼板と電氣的に結合して 6 in^3 の 1:2 のモルタル中に埋め、軟鋼板の面積はアルミニウム板のその 1 ないし 12 倍にとった。鋼の陰極が大きいとはじめに大きな電流が流れたが 2 週間後

第3図 2ヵ月間1:2のモルタル中に埋めたアルミニウム—鋼対中の電流

第4図 モルタル中に埋めた3003アルミニウム合金—鋼対の鋼陰極面積の影響

には接触電流は大体等しくなった(第3図)。10週間の浸漬の後には板の外観は同じようであった。これは重量減少のデータでも認められ(第4図)、鋼の面積を12倍まで増してもアルミニウムの耐食性にはほとんど影響はなかった。電氣的に結合した板の侵食は結合しない対照試験板

よりも少ないことがわかった。事実鋼と結合したアルミニウム試験片は面積比1:12でも結合しない場合よりも侵食が少いことを示した(第4図)。他のいくつかの試験もこの現象を確認した。

陰極間隙の影響

3003アルミニウム合金板からの陰極距離の影響を調べるために一つの試験はは

第5図 コンクリート中に埋めた3003-H14板と軟鋼板の距離の影響

た(第5図)。このことは金属コンクリート界面における耐食性は予期されるようにコンクリートの量による耐食性よりもはるかに支配的であることを示唆している。

塩化物混合物の影響

塩化カルシウムは時として冬期モルタルおよびコンクリートの結氷温度を下げ、また初期強度を高めるために用いられる。塩化ナトリウムもまた水あるいは砂の不純物として、おそらくは知らぬ間に入ってくるであろう。

かなりの量の塩化カルシウムあるいは塩化ナトリウムを加えて、室内条件でコンクリートを硬化させてもコンクリートによるアルミニウム合金の腐食にあまり影響を与えない。しかし、これらの試験は塩化物は接触腐食を進行させることを示した。コンクリート中でアルミニウムを鋼に結んだ試験では硬化後コンクリートをかなり乾燥のままにおくと有害な影響は生じなかったが、しかしコンクリートが週期的に、または連続的にぬれている場合には腐食が進行するように見えた。塩化物が局部的陽極に拡散し、これはアルミニウムの保護皮膜を破り易いのでこの腐食が促進されるであろう。

硬化条件の影響

コンクリートを打って引続き乾燥状態においたり、ぬれたままでおいたり、断続的にぬらす等いろいろな条件で硬化させた。これらの試験は接触腐食過程に及ぼすこれらの影響に似せて行なった。

3003 アルミニウム合金と軟鋼板 ($2 \times 6 \times .064$ in) の結合したものの回りに 1:2 モルタルの 6 in^3 の立方体を作った。対照試料として結合しないアルミニウム合金と鋼を含む試料も作った。1組は蒸留水で作り、他の1組は蒸留水に3%の塩化ナトリウム溶液を用いて作った。浸漬期間は6ヵ月であった。これらの塊を(1)室内条件、(2)常にぬれた状態、(3)定期的にぬらした状態で硬化させた。ぬれたままの塊は水中で硬化させ、定期的にぬらした試料は1ヵ月に1度24hr水中において残りの29日は室内条件のもとで放置した。

試験期間中アルミニウムと鋼の間の接触腐食電流を週

第6図 コンクリート塊中に埋めた 3003-H14—鋼対中の電流

第7図 コンクリート塊中に埋めた 3003-H14—鋼対中の電流

第4表 モルタル中に埋めた 3003 合金の接触腐食に及ぼす硬化条件の影響

モルタル ¹⁾	異種金属対 ²⁾	侵 食 深 さ mil		計算減量 in ³ /in ² /yr
		平 均	最 高	
室内条件にて硬化				
1:2	な し	0.7	1.2	0.00052
1:2	Al—鋼	0.2	0.6	0.00036
1:2+NaCl	Al—鋼	2.9	11.6 ⁵⁾	0.00083
ぬれたままの状態にて硬化 ³⁾				
1:2	な し	1.2	4.1	0.00120
1:2	Al—鋼	1.8	4.3	0.00097
1:2+NaCl	Al—鋼	4.3	10.2 ⁵⁾	0.00163
週期的にぬらして硬化 ⁴⁾				
1:2	な し	0.9	2.1	0.00070
1:2	Al—鋼	0.7	1.1	0.00064
1:2+NaCl	Al—鋼	4.3	21.7 ⁵⁾	0.00243

(注)(1) ポートランドセメント 1 と砂 2, NaCl を加えた場合は 3.5% 水溶液を使用。

(2) 0.064×2×6 in の 3003 アルミニウムおよび鋼試験片を用いた。

(3) この試験塊はモルタルを流し込んだ後 24 hr 水中に浸した。

(4) この塊は 30 日間隔で 24 hr 水中に浸した。

(5) 部分侵食。他のすべての試験片は全面侵食を受けた。

期的に測定した (第 6, 7 図)。試験の結果は試験片を肉眼、顕微鏡検査および重量減少量を測定して判定した。

これらのデータは第 4 表で与えられる。

この評価から次の結論が得られる。

1) 塩化物を含まないコンクリート中ではアルミニウム試験片は硬化条件にかかわらずわずかに浅い表面侵食を示した (第 4 表)。鋼と結合した場合にはアルミニウムの侵食は結合しない場合よりも少し少ない傾向があった。 2) コンクリート中にかなりの量の塩化物を含む場合は侵食量はいくらか多く、概して局部的なものであった。しかしアルミニウムの全面腐食は比較的浅かった (第 4 表)。

モルタルおよびコンクリート中の腐食の機構

水酸化カルシウム、生石灰、練ったセメント、あるいはコンクリートにアルミニウムをさらすと、その強いアルカリ液によって自然の酸化皮膜が溶解する。暴露された最初の 2~3 hr の間にアルミニウム合金の上に、アルミン酸カルシウム水和物の保護皮膜が生じて以後の侵食を抑える。3003 アルミニウム合金を水酸化カルシウム中に浸漬した場合には皮膜は主として $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 8 \sim 12\text{H}_2\text{O}$ であることが X 線回折によって発見された。ポートランドセメントのスラリーの場合にはそれは $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{CaO} \cdot 3\text{SO}_3 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$ であった。この皮膜は遂には腐食をほとんど完全に止めさせるまで発達する。これらのアル

第8図 モルタル中に埋めた 3003-H14 アルミニウム合金—鋼対の分極特性測定装置。閉鎖タンクおよび電極孔は各試験片の表面電位の測定ができるように蒸留水を満たした。電位の測定は孔の各々に挿入した飽和甘汞電極を用いた。同時に接触電流を調節して分極特性を研究した。

ミン酸カルシウム皮膜は腐食の過程に著しく影響を及ぼすのでコンクリート中のアルミニウムおよび鋼の分極特性に対するその影響を調べることが必要であると考えられる。分極特性を調べるためにアルミニウム鋼対を 6in³

のモルタル中に埋めた。連続的に水が侵入するように穴のあいたプラスチックの型を用い、また鋼およびアルミニウム両表面に達するようにガラス電極を備えつけた(第8図)。電極チップは閉じた方形(sealed square)でその各々はすみに小さな孔をもっていた。これは金属のごく表面近くの妨害電位を測定するためのものである。すべての測定は飽和甘汞基準電極に対して行なった。分極を知るには自然に流れる接触電流を用いた。この電流は power resistor によって大いに減少した。分極特性は約1ヵ月にわたって調べた。

第9図 ぬれたままのモルタル中に埋めたアルミニウム—鋼板対の分極

約 -1.5 Vで、これは 576 hr の間に陰極方向に約 -1.3 V まで次第に減少した。

鋼ははじめ約 -0.400 V の開回路電位をもったが、急速に約 -0.950 V まで増大した。その開回路電位はアルミニウムと同じく 576 hr の間に次第に約 -0.800 V まで変化した。第9図の曲線の端が矩形状をしているのはモルタル中の(板の間の約 2.5 in の間の)電圧降下を定性的尺度で示すものである。7hr 後に測った最初の分極曲線からわかるように初期の腐食過程は主として陰極支配のもとにある。

第10図 ぬれたままの 1:2 モルタル中に埋めた 3003 アルミニウムと軟鋼の間の接触電流

このことはアルミニウムの表面に非常に有効な保護皮膜ができたことを示す。これはきわめて小さな外部電流を与えた場合に第9図に示すようにアルミニウムの陽極分極が急速に起ったという事実によってさらに明らかにされた。これはアルミニウムの接触腐食が特に 6 hr 後に低い値に減少す

ることを示す第10図の総括的結果によって実証される。

これらの結果は(塩化物を含まない)コンクリート中でのアルミニウムの腐食が鋼の陰極面積を 12:1 まで増しても著しく増加しないわけを説明する。事実、鋼とアルミニウムの面積の比をさらに大きくしてもアルミニウムの腐食の増加は主としてコンクリートの注入および硬化する間のみであるのでその耐食性にはあまり問題はないらしい。それ以後は鋼の面積の増加はあまり影響ないであろう。コンクリート中の塩化物はこの関係を変化させるので別の研究が必要である。

迷走電流の影響

コンクリート中でアルミニウムの激しい腐食が起るいくつかの例が直接あるいは文献⁹⁾によってわかった。この腐食に対する主な原因は十分に解明されなかった。前述のデータおよび経験を考える場合、このような腐食がコンクリートの直接の影響であったと考えることは好ましくない。さらにここで述べるデータはこのような広範囲の腐食はアルミニウムと鋼の間の接触電流によって生じたものではあり得ないことを示している。これは特にコンクリートが塩化物を含まない場合に正しいであろう。コンクリート中に塩化物があると特に間欠的または連続的にぬれた状態ではアルミニウムと鋼の間の接触腐食を大きくする傾向がある。しかし、このような腐食は数年以下の暴露で見られる激しい腐食を説明しないことを研究室試験は示している。実際に使用したいくつかの場合に遭遇した大きな腐食は異種金属間の自然接触腐食よりもむしろ、漏洩電流腐食によってよく説明されることが Alcoa 研究所およびその他の試験で明らかにされた。コンクリートの施設の中でのアルミニウムあるいは鋼の腐食の場合には一つの可能な原因として漏洩電流を考慮することがよいであろう。

保護塗料も時には有効である

アルミニウム合金はアルカリ性建築材料を含む多くの応用により耐食性を示すが、ある場合には保護塗料を用いることによってさびを防ぎ、割れ目腐食をなくし、接触腐食を少なくし、また金属面のガス発生が減少して凝着を増す等の利益がある。

アルミニウム合金をアルカリ建築材料と共に用いる場合には普通2種類の有機物塗料が用いられる。それは透明なメタクリラッカーと粘度の高い滯青質またはアスファルト型のペイントである。ラッカー塗料は一般に外観が重要な因子であるような場所に用いられる。

ラッカーはさびを防ぎ、糊状腐食を少なくするのみならず、アルミニウムの外観をきれいに保つ。またこれらの塗料は付着したモルタル、しっくいその他の建築材料をアルミニウム面から取るのを容易にする利点がある。

異常な“糊状の”条件または接触腐食を起しやすいよ

うなひどい腐食条件の下でアルミニウム合金を保護するのに高粘度の瀝青質塗料は効果的である。これらの塗料は比較的安価で、これを使用する十分な価値がある。さらに使用法が簡単で、ただ金属面に油、またはグリースが付着していないことのみが必要である。これに対してラッカー型の塗料はよい結果を得るためには金属面が化学的に清浄であることを要する。特許の磷酸型洗浄液および化学的転換 (chemical conversion) 塗料が普通この目的でアルミニウム合金に用いられる。

上に述べた塗料の他、一時的な保護テープ、グリース、はがし易い塗料等もアルカリ建築材料の作用からアルミニウムを保護するために用いられる。これらの保護法は一般的な目的にはすすめられないがその特有な性質のために特殊な目的にのみ用いられる。

総 括

多くの研究室試験および広範囲な使用経験の結果はアルミニウム合金はいろいろなアルカリ性建築材料とともに用いるのに適していることを示した。他の多くの雰囲気と同様に、これらのアルカリ性材料とともに用いられる場合、アルミニウム合金の腐食は表面のみで、自己抑制的性質がある。分極の性質で示されるように、この結果は金属面上に高度の保護皮膜ができたためである。

アルミニウム合金とアルカリ性建築材料を含む施設の異常な環境の場合には時に特別な考慮を必要とする場合がある。塩化物、異種金属、漏洩電流、通気の差、およびこれらの因子が組合わさった場合には保護手段を用いる必要があろう。

文 献

- 1) R.B. Mears & R.H. Brown: Resistance of Aluminum—Base Alloys to Marine Atmospheres. *Soc. of Naval Arch. and Marine Eng. Trans.*, **52**, 91~113 (1944).
- 2) R.B. Mears & R.H. Brown: Designing to Prevent Corrosion. *Corrosion*, **3**, 97~120 (1947) Mar.
- 3) C.J. Walton, D.O. Sprowls & J.A. Nock, Jr: Resistance of Aluminum Alloys to Weathering. *Corrosion*, **9**, 345~358 (1953) Oct.
- 4) A.B. McKee & R.H. Brown: Resistance of Aluminum to Corrosion in Solutions Containing Various Anions and Cations. *Corrosion*, **3**, 595~612 (1947) Dec.
- 5) A.B. McKee: Cleaning Aluminum. *Modern Sanitation*, 42~44, 15~17 (1955) Jan.
- 6) American Standards Association: ASA NO. A 88.8~1952.
- 7) Portland Cement Association: Cement and Concrete Reference Book 1954.
- 8) T. E. Wright, H. P. Godard & I. H. Jenks: Resistance of Aluminum to Some Alkaline Building Materials. *The Engineering J.*, **37**, 1250~56 (1954) Oct.
- 9) T. E. Wright: An Unusual Case of Corrosion of Aluminum Conduit in Concrete: *The Engineering J.*, **38**, 1357~1362 (1955).

討 論

Robert W. Martel (Linde Air Products Co. Tonawanda, N. Y.) の質問

180 日後の乾いたコンクリート中の鋼—アルミニウム対を流れる約 100 μA の電流はいかなる電解機構によるのか?

C. J. Walton, F. L. McGeary および E. T. Englehart の答

“乾燥”コンクリートとは注入後連続的または週期的にぬらさなかつたコンクリートをさし、室内条件で硬化し、貯蔵したものである。コンクリートの硬化過程では徐々に水を排泄し、これは少なくとも 1 年続く。このように“乾燥”コンクリートは明らかにいくらかの水分を含み、これが接触電流の電解質として作用する。しかし接触腐食の腐食率は非常に小さい。計算によると厚さ $\frac{1}{8}$ in の試験片の寿命の予想値はこの程度の電流では 1000 年以上であろう。

Hugh P. Godard (Aluminum Laboratories, Ltd. of Canada, Kingstone, Ont.) の意見

コンクリートと接触したアルミニウムの主な腐食の危険は埋込みでなく、アルミニウム管をコンクリートの壁に固着させた場合のような線状接触である。

C. J. Walton, F. L. McGeary および E. T. Englehart の答

アルミニウム合金はコンクリート中に入れた場合一貫してよい結果を示したが pre-cast のコンクリートに対しては多少異なる。これらの条件のもとでは通気差または酸素濃度の差による電池効果が生じるらしい。さらにぬれること、乾くことあるいは外面の化学的汚染の存在等の他の因子が環境の腐食性に大きな変化を起させる。

ある場合にはこのような因子からの腐食が起る可能性を防ぐために保護塗料を用いることが勧められるが他の場合には保護塗料の使用は必要でない。アルミニウム合金を実際に用い、アルミニウムとそれに接するコンクリートの間に保護塗料を用いないで満足すべき結果が得られた実施例が沢山ある。腐食率を表わす方法に関して重量減データを mil/yr で表わされる侵食率に換えることは簡単になるという利点がある。

しかし腐食が一様に分布しない限り mil/yr の計算値は実際の値を与えないのでこれはまた欠点でもある。

Alcoa Research Laboratories では重量減を腐食で失った金属の体積に換算するために ($\text{in}^3/\text{in}^2/\text{yr}$) なる単位を用いている。これは密度の異なるいろいろな合金あるいは金属をその腐食の分布にかかわらず、起った全腐食に基づいて比較する方法を与える。上に述べた単位は直ちに mil/yr に換算することができ、これらは同一の数値を有するので腐食が一様であるならば侵食率を表わすために用いることができる。

重量減による腐食率を表わすべき一つの単位を統一することが非常に望ましいであろう。