

[24] 各種岩石骨材とセメントペーストとの付着性状

正会員 ○森野 奎二 (愛知工大)

山口 典良 (")

正会員 内藤 幸雄 (")

1. まえがき

コンクリート骨材とセメントペーストの付着機構、界面の性状などについては、最近の微細構造の観察装置の発達とも相まって、急速に解明されてきた。^{1) - 6)} これらは主としてセメントの挙動に重点が置かれているので、本研究では骨材の岩質との関係においてとらえてみた。

骨材は、粒径、形状、表面粗さおよび岩種が異なるうえに、同一岩種であっても、その石質を支配する造岩鉱物や二次鉱物の種類、量、寸法、形態および組織のち密さなどの、微視的な状態が非常に変化している。一方、セメントペーストを構成する C-S-H, C-A-H, C-A-S-H および $Ca(OH)_2$ などは、 W/C 、養生温度、材合で変化する。界面ではこの多様な両材料が組み合わされるので、その付着の挙動は複雑で変化に富む。このような付着の性状を限られた少数の試料から求めてみても、それは1つの傾向をとらえたに過ぎないものとなろう。普遍的な性状を把握するには、まず、付着性状に影響を及ぼす主要因は何であるかを見い出す必要がある。すでに、セメントの $Ca(OH)_2$ の挙動が付着性状の主要因であることは指摘されている¹⁾が、本研究では、骨材の石質が異なった場合にはその挙動はどのようになるかを把握しようとした。そこで、各種の骨材について、表面粗さ別に付着強度を測定し、併せて、その破断面の微細構造を観察し、付着強度と付着状態を対比させて検討した。

2. 使用骨材について

実験に使用した骨材の種類とその諸性質を表1に示した。表1の岩石名は、一般的な習慣に従って用いたが、これは、石質の概略を推定するには便利だからである。しかし、同じ岩石名であっても、その物理化学的性質は、生成年代、地域によって異なり、また風化、変質の程度によっても異なる。特に今回の付着試験に用いたような小さな試料 (1 cm²) では、局所的な影響が大きく現れるので、同一岩種の砕石場から採取した試料であっても、採取位置が異なれば、試験結果は異なるであろう。さらには、採取試料の中でも付着面に用いた試料それぞれの微細組織が異なっている。鉱物の種類、寸法、配列および二次鉱物の状態などの同じものを天然岩石から選ぶことは不可能なのでばらつきを避けることはできない。試料の寸法が大きくなると、ある程度均一化されるので、付着試験の試料は大きいほどよいことになるが、今回用いた試料は極めて小さなもので、この点では好ましくない。これは、試料の作製と界面の観察能力から止むを得ず小さくしたのである。

骨材試料の作製は、まず骨材粒子をセメントペーストで固めて、ダイヤモンドカッターでの切断作用が容易な

表 1 使用骨材の種類と諸性質

骨材名	採取地	主要造岩鉱物	外 観	比重	吸水率 (%)	試料の表面粗さ(μm) #46 #1500 磨面	
岩	流紋岩	兵庫県宝塚市	石英・長石	淡緑色の滑晶質石基中に中粒の石英、長石の結晶粒が集合、硬質、ち密	2.62	1.05	2.14 0.98 4.00
	石英はん岩	滋賀県安土町	石英・長石	赤紫色石基中に細・中粒の石英、長石のはん晶と不定形小片、硬質、ち密	2.60	0.97	16.5 0.85 3.00
	花こう岩	静岡県天竜川	石英・長石・雲母	燻白色、完晶質 粗粒結晶の集合、カリ長石にやや風化したものあり 硬質、ち密	2.65	0.57	17.4 0.88 8.00
	かんらん岩	三重県鳥羽市	かんらん岩・長石・蛇紋石	緑色～黒色の細脈状の蛇紋石部分と、白色小はん状の長石の集合部分あり、硬質、ち密	2.95	0.84	16.3 0.79 3.00
	玄武岩	香川県柏原市	長石・輝石	灰黒色石基中に輝石の小結晶が層状に配列、斜長石の小白点あり 硬質、ち密	2.68	1.23	18.6 0.75 3.00
	安山岩(Y)	山梨県大月市	長石・石英・輝石・角閃石	灰緑色石基中に細い、斜長石の白色はん点と輝石、角閃石の緑色はん点あり 硬質、ち密	2.66	1.78	18.7 0.75 5.00
	安山岩(G)	群馬県北群馬	長石・石英・輝石・角閃石	灰色石基中に中粒の輝石と角閃石の黒色はん点、白色の斜長石はん点あり、硬質、ち密	2.79	1.34	17.3 0.92 1.00
	安山岩(O)	大阪府柏原市	長石・石英・輝石・角閃石	淡灰色石基中に極く細い褐色の細脈があるのみで、はん晶はない、泥岩様、ち密	2.39	5.51	32.6 1.65 4.00
	石灰岩	滋賀県坂田郡	方解石	灰色、均質、硬質、ち密	2.68	0.72	1.94 0.95 2.00
	砂岩	愛知県春日井	石英・長石	黒色、細粒、ホルンフェルス化 黄鉄鉱が浸み込んでいる、硬質 ち密	2.70	0.81	21.2 0.84 3.00
単一鉱物	長石	愛知県豊田市	微斜長石	淡黄～乳白色、均質、硬質、ち密	2.56	0	2.02 -- --
	チャート	静岡県天竜川	石英	茶色、極めて硬質、ち密、少々白色の石英細脈を含む	2.63	0	9.2 -- --
	鉄片	市販の鉄板	鉄	黒色、均質、ち密	7.85	0	11.0 -- --
	ガラス	市販の板ガラス	ソーダ石灰ガラス	透明、均質、ち密	2.52	0	研摩せず 0.0 2以下

ようにした。そこから、厚さ約2mmの薄片を切り取った。その薄片から幅10mm、長さ約20mmの骨材試料を成形し、両面を46番と1500番のカーボランダムで研磨した。この研磨面の粗さは、表面粗さ計(東京精密製、SURFCOM-4A)の測定では、表1に示したように約20 μ と約1 μ であった。また、骨材を角柱に切り、それを割裂破断して表面の粗な試料も作製した。この表面粗さは、実体顕微鏡写真による測定で約100~800 μ であった。この測定結果には、骨材を構成している鉱物の粒径、へき開性および組織の違いなどが現れている。

3 実験の概要

3-1 付着強度試験 : 骨材薄片を10×10×60mmの型枠の中央に垂直に置き、その両側に水セメント比35%のセメントペーストを流し込んだ。型枠の上面に、厚さ6mmの鉄板を骨材薄片の両側に載せて、薄片の位置を確保し、また供試体の乾燥を防止した。この密封型枠を20℃の恒温室に静置し、翌日脱型し、水中養生した。

供試体は骨材薄片の両側に29mmのペースト部分を持った長さ60mm、断面10×10mmの形状のものであり、両端には引張用のボルトが埋込まれている。付着強度試験は図1に示す方法で行った。

3-2 界面の観察 : 付着強度測定後の剝離した骨材表面とペースト表面を走査電子顕微鏡(日本電子製JEOL JSM-T20)で観察し写真撮影した。観察試料の作製は、供試体から取り出した骨材およびペースト部分を、10×5mmの試料台にドータイトで接着し、Auコーティング(イオンスパッタリング装置、JEOL JFC-1100形)した。これらの作業は水との進行、炭酸化を避けるため、強度測定後直ちに行った。

4 実験結果とその考察

4-1 付着強度と骨材構成鉱物との関係 : 単純引張試験によって求めた付着強度の平均値を表2に示した。表2には、10種の骨材について、表面粗さ別に各材令での結果を記し、また、比較のために行った4種類の鉱物の結果をも併記した。表2において、まず岩種、表面粗さなどの違いを無視してみると、骨材の付着強度は、材令3日で12.7~36.2 kgf/cm^2 、7日で18.7~40.4 kgf/cm^2 、28日で17.7~53.3 kgf/cm^2 となり、強度差が大きい。次に、表面粗さ別に検討する。

骨材の表面粗さを1 μ 程度の平滑面にしたのは、物理的な現象としての表面粗さの及ぼす影響を調べる場合の平滑面側のデータを得るためであることと、同時に、平滑面であればこの物理的な現象が除去されるので、造岩鉱物の鉱物・化学的な影響が現れ易くなり、岩種間の特徴がはっきりするのではないかと考えたからである。

表面粗さ、20 μ 程度としたのは、容易に入手できる市販の研磨材の最も粗い番数が46番だったからで、平滑面と割裂による自然破面との中間の表面粗さの状態でのデータを求めるためである。

割裂破面(割面と示した)としたのは、最も粗面での付着強度を得ること、及び自然な破面での値を得るためである。

なお、強度計算では、試料作製時に生じる凹凸の誤差は無視して、すべて1 cm^2 とした。それぞれの表面粗さにおいて、骨材岩種間に付着強度差を認めることができるが、1 μ と20 μ での強度発現の状態が異なる場合も多く、岩種名を挙げて述べることはできない。概して、割面の強度が高く又20 μ には強度差が大きく現れる傾向がある(石灰岩、安山岩(O)など)。



図1 付着強度試験方法

表2 引張付着強度試験結果

骨材の種類	表面粗さ ※(μm)	3日強度			7日強度			28日強度		
		N	強度	σ	N	強度	σ	N	強度	σ
流紋岩	1	6	20.2	8.2	6	27.2	5.7	8	23.7	12.1
	20	6	18.1	9.4	6	22.2	9.8	6	28.2	10.7
	割面	9	27.6	11.8	9	34.6	9.0	10	32.4	9.6
石英はん岩	1	6	16.1	5.2	6	25.8	12.6	7	37.8	14.0
	20	6	21.3	11.9	6	26.8	12.4	8	42.4	16.2
	割面	10	29.0	6.9	9	34.7	7.3	10	45.3	5.9
花こう岩	1	6	15.3	5.2	6	20.7	3.8	7	35.6	7.7
	20	6	20.6	3.2	6	24.9	10.5	9	30.8	6.5
	割面	10	24.6	7.9	8	28.0	7.4	10	34.4	4.0
かんらん岩	1	6	20.4	8.3	6	28.9	9.1	8	32.8	15.5
	20	6	12.7	7.3	6	20.9	5.1	6	29.0	16.9
	割面	10	22.9	7.3	10	28.9	6.2	10	42.7	9.2
玄武岩	1	6	20.9	3.1	6	30.1	8.7	7	32.9	9.1
	20	6	18.3	7.1	6	22.9	10.8	6	22.8	6.8
	割面	10	26.0	5.8	10	34.7	9.8	10	40.2	6.6
安山岩(Y)	1	6	33.7	7.8	6	35.4	15.3	7	40.4	8.8
	20	6	19.6	5.6	6	29.4	11.1	6	35.5	15.5
	割面	10	36.2	7.6	10	40.4	4.6	10	43.8	8.8
安山岩(G)	1	6	13.7	5.3	6	23.2	9.8	8	33.1	9.0
	20	6	22.4	7.3	6	32.5	15.6	6	38.6	7.5
	割面	8	25.3	3.5	9	31.0	6.9	9	36.7	9.0
安山岩(O)	1	6	14.0	2.8	6	20.7	6.1	6	26.8	12.8
	20	6	14.7	5.7	6	18.7	7.1	6	17.7	9.6
	割面	10	24.5	6.4	10	38.1	6.6	10	37.2	5.8
石灰岩	1	6	26.7	4.8	6	21.6	11.5	7	27.0	7.5
	20	9	28.7	3.0	8	37.3	9.0	8	53.3	7.6
	割面	10	25.2	5.4	10	35.7	5.2	9	39.1	6.2
砂岩	1	6	16.4	5.2	5	28.6	15.5	9	35.8	5.4
	20	6	14.1	4.6	6	20.0	5.2	6	31.6	16.0
	割面	7	32.4	12.0	7	36.0	7.4	6	46.0	7.6
石チャート 鉄板 ガラス セメントペースト	20	11	33.1	4.7	12	45.7	7.5	12	53.6	7.9
	20	10	26.2	4.9	11	44.6	9.8	12	53.4	7.5
	20	10	11.8	4.2	9	18.2	5.8	8	23.4	11.2
	<0.02	30	33.2	5.7	30	38.6	8.3	34	32.2	8.9
	—	14	35.6	5.0	14	45.3	7.8	14	48.3	10.3

※1 μ は1500番、20 μ は46番研磨。N:供試体数 σ:標準偏差

以上のような各条件における結果を、表 2 に示した平均値で考察するには、バラツキが大きい割に供試体数が少ないので、やゝ無理のように思われる。そこで、各骨材の付着強度試験結果の範囲を図 2 に示した。図 2 は各骨材別に上段グループが、表面粗さ 1μ の材令 3、7、28日、中段グループが 20μ 材令は同じ配列、下段グループは、割裂破面である。単一鉱物は、それぞれ上から 3、7、28日である。付着強度の最大値と最小値に、骨材の特徴が表れているように思われる。特に最小値の方にすでに述べた骨材のいろいろな問題が反映しているようであり、また、セメントの $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を初め、その他の挙動も現れているようである。最大値には、付着がよく、ペーストの方で破壊するものまである。

バラツキが大きい最大の原因は、本質的にバラツキを持っている骨材に対して、供試体の断面積が小さいことにあると思われるが、引張試験をしたので、一層バラツキが大きくなった。骨材、セメントペースト、界面、すべてが脆性体であるから、界面の欠陥に生じた剝離が一挙に進展して全体の破壊に至ると考えられる。そこで、界面に欠陥となる箇所が、常に入り込む恐れのある骨材では材令にかかわらず、強度の最小値がほぼ同じとなる。この傾向は、図 2 の各所でみることができる。例えば、花こう岩、かんらん岩、安山岩などは典型的な状態である。花こう岩では雲母の板状のへき開面（写真 1）、かんらん岩では、その中に含まれる蛇紋石（クリソタイル）の繊維と平行な面（写真 2）、安山岩では、組織の疎な多孔質な部分などを挙げる事ができる。その他、二次鉱物などの鉱物自体の弱い箇所も欠陥部となる。

次に、組織の複雑な岩石骨材に対して、均質で、一定組織の単一鉱物ではどの程度の値になるかを比較のために求めてみた。

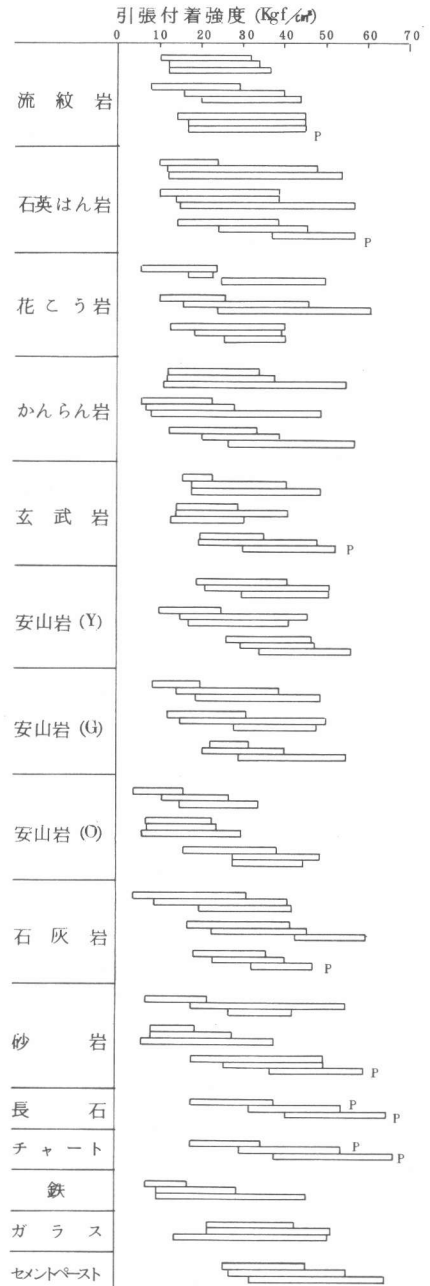
長石は、粗粒ペグマタイトより採取した微斜長石であり、チャートは、石英単独（微量成分を含むが一応無視）の均質な岩石である。結果は、図 2 にみるように予想通りの良さが表れている。

鉄およびガラスは、岩石鉱物ではないが均質な材料として用いた。このガラスはセメントのアルカリと反応するので、その反応の挙動が推察される。材令が経過すると、膨張性反応生成物ができて、付着が阻害される。こうなるとバラツキが増し、平均強度も低下し始める。アルカリ骨材反応の挙動を短期間でみるようなものである。これらとは別に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の析出の程度もバラツキの原因となる。

鉄は均質な材料として選んだが、微視的な表面組織および化学成分が不均一であったらしい。黒皮鉄の表面を 46番のカーボラダムで研磨したために、鉄の表面を構成していた、 FeO 、 Fe_3O_4 、 Fe_2O_3 、などの酸化鉄の層が、乱され、セメントとの付着性状が場所によって異なった。また、研磨してからセメントの中に埋めるまでの間の酸化の違いもあったであろう。上記と同様、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の影響は大きな比重を占める。

4-2 付着強度と遊離水酸化カルシウムとの関係： 界面の欠陥となる箇所、セメントペースト側に起因するものは、気泡と $\text{Ca}(\text{OH})_2$ で、まれにエトリンガイトであろう。

特に顕著なのは、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ で、大量に界面に析出した（写真 3）、



図の見方：上から 1μ 、3、7、28日、 20μ 、3、7、28日、割面-3、7、28日
P：ペーストの破壊

図 2 各骨材の付着強度の最大値と最小値の特徴

あるいは、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の (0001) 面のへき開面が、骨材面に平行に析出した場合などには、一層剝離しやすくなるものと思われる。この $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の挙動に関しては、今回の供試体が小さいので、養生水中へ溶出しやすく、その溶出の差が強度差となつたのではないかと考えられたので、養生水を毎日とり替えて新しくしたものと、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の飽和溶液としたものとで比較してみた。結果は、表 3 に示したように、まったく差が認められないので、溶出によるものではないことが明瞭となった。

引張付着強度が特に弱い供試体の断面には、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と思われる白色の析出物が大へん多い場合がある。それを集めて X 線回析すると $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と CaCO_3 の回折線が明瞭に認められる。 CaCO_3 は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ が炭酸化したに過ぎない。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の析出している面積が全体の約 50% を超えると、著しく強度低下する傾向がある。骨材の側に強度低下を起こすような鉱物が認められないときには $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の挙動と考へてもよい位である。勿論、気泡が界面にある場合は強度低下するが、この気泡の中には、常に $\text{Ca}(\text{OH})_2$ があり、六角板状結晶が析出していることも多い。概して、気泡とかクラックなどの空間には、ほとんど $\text{Ca}(\text{OH})_2$ だけが観察される。空間が小さくなりキャピラリー空隙になると、C-S-H および C-A-H などの網状、および半円小板状の結晶が $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と共にみられる。今回の実験にはなかったが、骨材の周囲にエトリンガイトが異常に沢山生成して、骨材とセメントペーストとの付着が著しく阻害されていたことがあった。

岩崎¹⁾ が指摘したように、骨材とセメントペーストとの界面には、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の薄膜を介して、厚い $\text{Ca}(\text{OH})_2$ あるいは、C-S-H などのセメント水和物が付着するが多かった(写真 4、5、6)しかし、長石の場合は $\text{Ca}(\text{OH})_2$ を介さずに直接 C-S-H が付着する場合もある⁷⁾ ようである(写真 7)。

5. まとめ

① 骨材とセメントペーストの引張付着強度は、界面の欠陥箇所の影響を受け易い。この欠陥となるものは、骨材では、鉱物のへき開面、二次鉱物、多孔質な部分および膨張性物質の生成などである。

② 骨材の組織が密で、骨材を構成する鉱物に有害な作用がないと、付着強度はペーストの強度と同等になる(長石)。さらに、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ と反応すると付着力がペースト強度を上まわる場合がある(チャートにこの徴あり)。

③ 概して表面粗さが粗の方が強度は高いが、①、②との関係などで単純ではない。

④ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の付着への影響は大きい。

参考文献

- 1) 4) 岩崎訓明、富山泰全、セ技年報、1974、P193~197、1975、P181~184、1976、P354~358、1977、P83~86
- 5) ~6) 鈴木純也、水上国男、セ技年報、1975、P139~142、1976、P851~854、
- 7) 森野奎二、骨材資源、1978、第 8、P70~84、1979、第 40、P169~177

表 3 養生水質と付着強度

養生条件	材種	強度 (kgf/cm ²)	標準偏差 (kgf/cm ²)
水道水	8	2.87	4.2
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 液		2.94	5.4
安山岩	7	3.68	7.7
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 液		3.58	6.3
G			
水道水	28	4.40	6.0
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 液		4.80	4.1
鉄板	8	11.3	4.2
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 液		10.8	4.4
水道水	7	1.82	5.8
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 液		1.56	5.5
水道水	28	2.34	1.12
$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 液		2.32	8.8

各供試体数 10 本

水道水は毎日替える

$\text{Ca}(\text{OH})_2$ 液は飽和溶液

