

正会員 青戸 章, 内藤甲子郎, 小沢 喬 (国鉄鉄道技術研究所)

1. まえがき 列車通過に伴う騒音や振動を軽減する対策の1つとして、軌道部材を重くする方法が提案¹⁾されている。軌道部材を大きくしないで重くするには重量コンクリートを用いるのがよいが、放射線遮蔽用の重量コンクリートに対しては従来から種々の鉱石が使用された例^{2)など}があるが、軌道部材に適用した例はまたないので、重量コンクリートの軌道部材への使用の可能性について実験的に究明した。

軌道部材としての重量コンクリートに対しては、比重が大きく、強度や耐久性がすぐれているといった物理的特性のほかに、軌道回路としての絶縁性や、電鉄帰線であるレールからの漏れ電流に対するコンクリート自身の安定性、コンクリート中の補強用鋼材の防食性といった電気化学的特性も要求される。

そこで、電気化学的特性では若干不安な点はあるが、比重が4.8と比較的大きく、国内で安定した産出が期待できる黄鉄鉱と、比重が4.3でやや小さく、強度その他の点で良質な重量骨材とはいえないが、電気化学的方面では心配のない重晶石、の2種類を重量骨材として選び、細・粗骨材の使用割合を変えた5種類の重量骨材コンクリートの供試体を作つて、物理的特性および電気化学的特性を普通骨材コンクリートと比較した。

2. 黄鉄鉱と重晶石 (1)黄鉄鉱(Pyrite) 主成分はFeS₂, 硬度6~6.5, 比重4.6~5.0, 導電性あり。わが国では黒鉱や銅鉱と共に産出されるものが多い。

(2)重晶石(Barite) 主成分はBaSO₄, 硬度3~3.5, 比重4.2~4.5。微粉碎して白色顔料, ゴム・紙等の充填材, X線造影剤として用いられる。わが国では黒鉱等と共に産出されるものが多い。

3. 使用した材料, 配合および供試体 (1)材料 セメントは普通ポルトランドセメントを使用した。骨材のうち、黄鉄鉱は岡山県久米郡柵原町の同和鉱業(株)柵原鉱業所^{注1)}で、重晶石は秋田県大館市花岡町の同社花岡鉱業所^{注2)}で、いずれも塊状で採取されるものから破砕・粒度調整して製造したものである。表1に骨材の物理試験成績を示した。重量骨材は吸水率は小さいがすりへり減量が大きく、特に重晶石のすりへり減量大きい。

注1) 重量骨材に適する塊状の黄鉄鉱を産出しているのは、現在わが国では柵原鉱業所だけである。

注2) 重晶石は一般には粉状が産出されるが、花岡鉱業所ではその一部が塊状が産出されるので、これを粉碎したものを利用した。

表1 骨材の物理試験成績

	単位	細骨材			粗骨材		
		黄鉄鉱	重晶石	川砂	黄鉄鉱	重晶石	川砂利
比重	-	4.60	4.24	2.57	4.82	4.32	2.66
吸水率	%	1.00	0.62	2.03	0.34	0.24	0.95
粗粒率	-	2.31	2.96	2.99	6.98	7.19	6.81
0.08mmより通過量	%	12.1	15.5	5.9	0.8	0.5	0.1
単位容積重量	kg/m ³	3140	3120	1730	2860	2540	1650
実積率	%	68.3	73.6	65.0	59.3	58.8	62.0
すりへり減量(ロサンゼルス)	%	-	-	-	32.4	53.5	10.2

重量骨材は碎石・砕砂の一種なので、重量コンクリートに対してのみポゾリスNL-4000を使用した。

(2)配合と供試体の形状 重量細・粗骨材の使用割合を表2のA~Eの5種類に選んだ。Sは比較のための普通骨材コンクリートである。配合はPRC

の軌道スラブに使用する程度の品質を目標として、設計基準強度400kg/cm², スランプ5cmとして設計した。配合表は省略したが、水セメント比は43~45%, 空気量は1.5~2.3%である。供試体はφ10×20cmの円柱形で、圧縮強度はそのまま、圧縮強度以外の物理的特性は端面の影響を除くために上下を1cmずつ切断して18cmとしたもので、電気化学特性はこれをさらに3個に切断して高さ3.5, 10, 3.5cm

表2 細・粗骨材の使用割合

記号	細・粗骨材の容積百分率(%)						黄鉄鉱骨材の単位量(kg/m ³)		
	細骨材			粗骨材			粗骨材	粗骨材	計
	黄鉄鉱	重晶石	川砂	黄鉄鉱	重晶石	川砂利			
A	100	0	0	100	0	0	1271	2187	3458
B	100	0	0	0	100	0	1271	0	1271
C	50	50	0	50	50	0	651	1053	1704
D	0	100	0	100	0	0	0	2044	2044
E	0	100	0	0	100	0	0	0	0
S	0	0	100	0	0	100	-	-	-

としたもので試験した。

表3 物理的特性の試験結果

		単位	A	B	C	D	E	S
圧縮強度	7日	kg/cm ²	345	337	337	380	272	296
	28日	"	425	424	426	425	370	430
比重		-	3.98	3.78	3.79	3.84	3.64	2.38
静弾性係数		10 ³ kg/cm ²	791	464	494	506	361	362
動弾性係数		"	949	555	619	644	424	451
超音波パルス速度		m/s	5570	4420	4800	5010	4050	4870
シュミットハンマーの反発硬度		-	39	34	36	38	32	39

4. 物理的特性の試験結果 物理的特性のうち主たるものを表3に示した。圧縮強度は400 kg/cm²を相らったのに対して、Eの28日強度がそれ以下となったが、重晶石の石質のまろさが影響したものと考えられる。比重はAが3.98で、以下D, C, Bの順で、最小がEの3.64, Sと比較すると1.67~1.52倍となっている。比重は、

当然のことながら、黄鉄鉱を、特に黄鉄鉱を粗骨材として使用したものが大きくなり、これはまた表2の右欄に示した黄鉄鉱・粗骨材の単位量の合計の順とも一致している。その他の物理的特性の大小は比重と全く同じ傾向を示している。EはSより劣った特性が多いので、物理的特性からは軌道部材に使用するのは推奨できない。

5. 電気化学的特性の試験結果 重晶石の主成分であるBaSO₄は、水に極めて難溶であることはよく知られている。これに対して、黄鉄鉱の主成分であるFeS₂は、Midgley³⁾によれば、不純物としてのある種の金属イオンの有無によって、反応性と非反応性のものに区分でき、Ca(OH)₂の飽和水溶液に浸した場合に、反応性のものは5分以内に褐色の硫酸第一鉄の沈殿を生ずるのに対して、非反応性のものはいつまでも安定であるという。これらの実を含めた特性を知るためには、軌道スラブの設置される条件に類似した場所で暴露試験を実施するのが望ましいが、迅速に結果を判定するという観点から、電気化学的測定方法を主体として試験することとした。

5.1 黄鉄鉱細骨材による試験 黄鉄鉱骨材の溶解は、比表面積の大きな細骨材がそのほとんどを占めると考えられるので、黄鉄鉱細骨材(粗粒率が2.3程度)10gを、Ca(OH)₂の飽和水溶液およびその1/50濃度の水溶液それぞれ100mlに添加または無添加した4種類の水溶液を作り、空気開放状態で約6日間、pHを測定した。図1では、黄鉄鉱を添加しないものもpHが低下しているが、これは空気中のCO₂による炭酸化のためである。

この黄鉄鉱は、Midgleyのいう全くの非反応性ではないが、飽和水溶液中ではかなり安定で、pHは若干低下したが、終了時における無添加との差はpHで0.4程度であった。これに対して、1/50水溶液では添加したもののpHの低下は大きく、終了時には酸性域に達してしまっただけでなく、黄鉄鉱の溶解はpHが低い程速く、溶解が進むとさらにpHを低下させるものと考えられる。

5.2 コンクリート供試体による試験 (1) 湿潤・乾燥による抵抗率変化の測定 図2のようにφ10×10cmの供試体の上下は、水を含ませたガラスウールを介して厚さ1mmの鉛板をあてて測定電極とし、その上に5kgのおもりをのせて密着させた状態で、リード線をコールラウシュブリッジに接続して抵抗を測定した。供試体を約1箇月水に浸した状態からスタートし、室内で24日間乾燥させ、再び25日間水に浸して、抵抗の経時変化を測定した。抵抗率に換算したものを図3に示した。SとEの抵抗率は非常に大きくて、湿潤状態でも約7500, 8000Ω・cmであるのに対して、Aは約250Ω・cmと低く、次いでDとCが低くなっている。これより、黄鉄鉱を粗骨材として使用すると抵抗率を大きく低下させるといえる。乾湿による抵抗率の変動はいずれも2~3倍程度である。

(2) 水中における定電位電解試験 コンクリートの耐電食性を調べるため、図4のように供試体を蒸留水中に浸し、供試体に密着した塗装鋼板をカソード、別にこの中に浸した軟鋼試験片をアノードとし、アノ

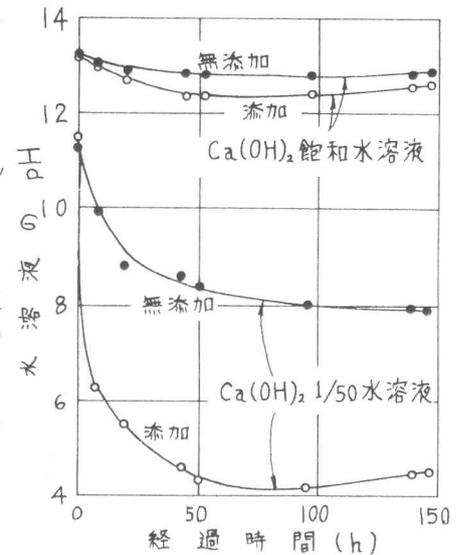


図1 黄鉄鉱細骨材添加によるCa(OH)₂水溶液のpHの変化

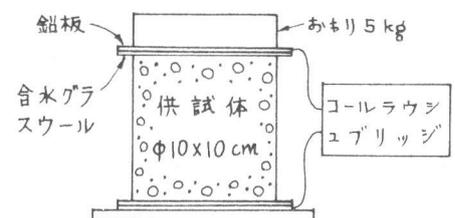


図2 供試体の抵抗率測定回路

ド電位を0V・SCEの一定に保って通電した場合の水のpH，流出電流および軟鋼試験片の腐食減量を測定した。供試体はφ10×3.5cmで，これは50×50×1mmのみがき鋼板（片面だけをエポタール塗料を2回塗りして絶縁したもの）を接着した。これを3日間乾燥してから蒸留水中に入れ，さらに3日間経過してから約3日間通電した。結果を図5に示した。蒸留水のpHは初めは6.0であったが，供試体を3日間浸しておいたので，試験開始時のpHは10.5~11であった。通電と共に全般的にpHは低下したが，低下の大きいのはA，D，Cで，S，E，Bの低下はわずかであった。軟鋼試験片の流出電流は，通電直後は小さいが，時間と共に急に増大し，4~10時間後は3~10倍に達し，その後は変動しながらほぼ一定値を保った。全期間の平均流出電流は，Aが8.3mAで最大で，次いでB~Sの順であった。軟鋼試験片の腐食減量は，平均流出電流と全く同じ傾向で，Aが648mgで最大で，次いでB~Sの順であった。したがって，コンクリート自身の耐電食性は，黄鉄鉱を細骨材として使用したものの方が悪いようである。

(3) 水中における分極特性試験 図4と同様な装置で，供試体に接着した片面塗装鋼板の定電位分極特性試験を行なった。供試体を蒸留水中に浸して3日間静置してから，塗装鋼板の電位を一定に保って90秒後の電流を測定する方法をくり返して，図6のような分極曲線を得た。この場合，分極曲線には供試体と水の電圧降下を含んでおり，また，塗装鋼板と供試体との中間的な分極特性になっているものとも考えられるが，陽陰分極共にSとEの分極が大きくて防食的であることを示しているのに対して，A，D，Cの分極が小さく，黄鉄鉱を粗骨材として使用したものの方が防食性が悪いことを示している。

5.3 粉砕コンクリート供試体水溶液による試験
コンクリート供試体のままでは直接測

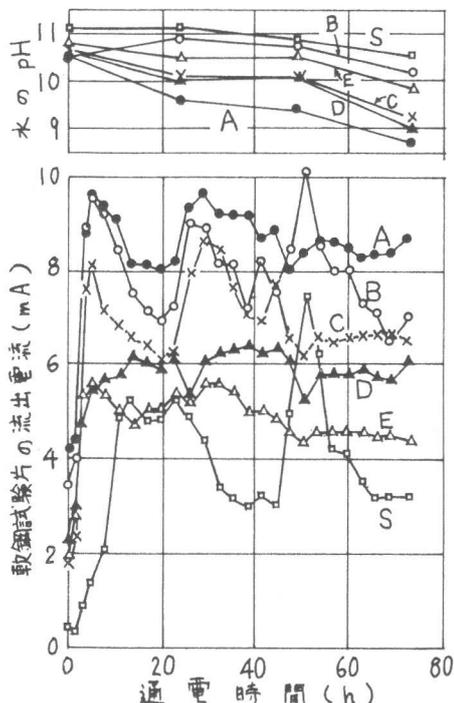


図5 供試体の定電位電解試験

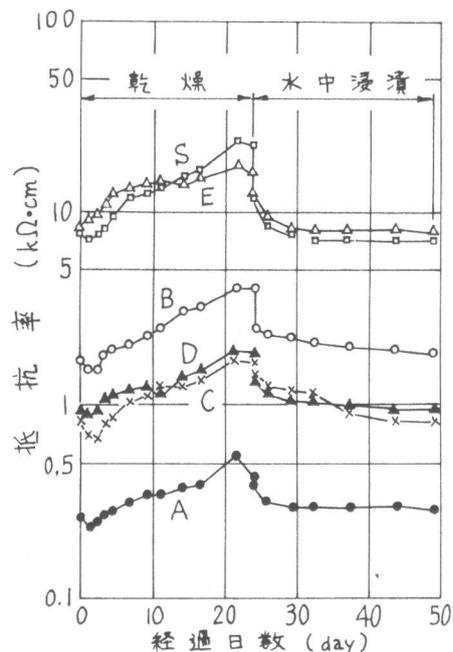


図3 乾燥，湿潤による供試体の抵抗率変化

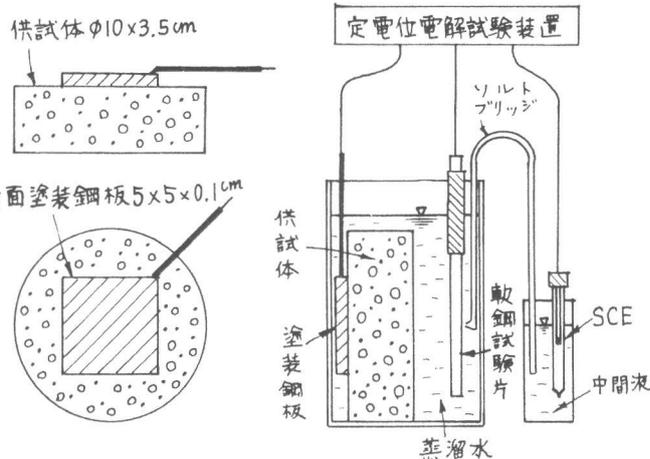


図4 供試体の定電位電解試験

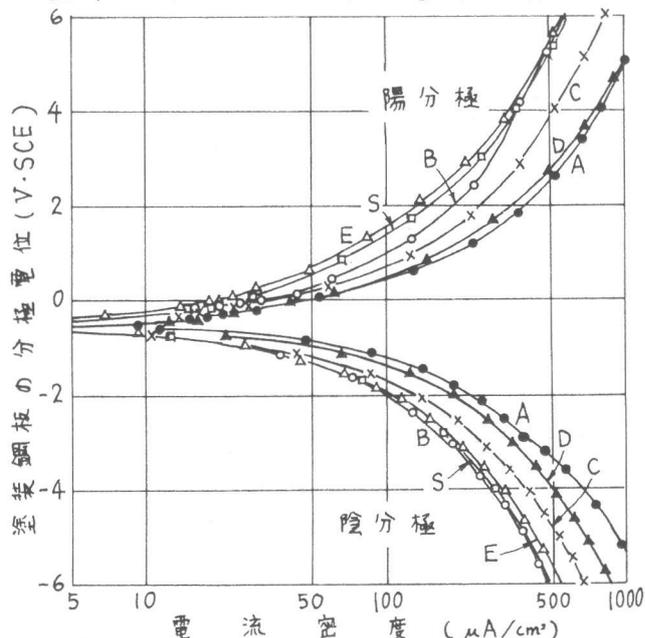


図6 供試体に張付けた塗装鋼板の定電位分極特性曲線

定することが困難な項目について、供試体を5mm以下の全通程度に粉碎したもので試験した。この方法では、粗骨材も粉碎されてしまうため、表2の右欄に示した黄鉄鉱骨材の総使用量が影響してくるものと考えられる。

(1) 水溶液のpHなどの測定 粉碎供試体100gを蒸留水500mlに浸して十分攪拌し、その水溶液のpHとその中に浸した軟鋼試験片の自然電極電位を約63日間測定した。図7に結果を示した。水溶液のpHは最初の10日間は変動は大きいですが、その後はほぼ一定値に近付き、Sが若干高いほかは大きな差は見られなかった。軟鋼試験片の自然電極電位も最初の10日間はB, A, Cの変動が大きかったが、その後は徐々に卑に移行した。最終的にはC, D, E, Sは-200mV·SCE程度となり、BとAはこれより約100, 40mV卑となった。63日間の軟鋼試験片の自然腐食速度はAが最大で4.8mddで、以下D, C, B, S, Eの順となった。これらを総合すると、黄鉄鉱骨材の使用量の多いもの程、その中の鋼材の腐食速度が速くなるものと考えられる。

(2) 水溶液中の軟鋼試験片の分極特性試験 粉碎供試体100gを蒸留水1lに浸して十分攪拌し、軟鋼試験片を測定電極として配置して自然腐食状態において10日後から、対極として白金電極を配置して、5.2(3)と同様な方法で軟鋼試験片の定電位分極特性試験を行なった。結果を図8に示した。全般的に陽分極の方が分極が大きく、また、Aが陽・陰分極共に小さくなっているが、他にはあまりはっきりした傾向はつかめなかった。一般に、黄鉄鉱骨材の使用量の多いもの程防食性は悪いようである。

6. まとめ (1) コンクリートの比重を大きくするには、重量骨材を粗骨材として使用するのがよく、特に黄鉄鉱を粗骨材として使用すると効果がある。

(2) 重晶石のみを用いた重量骨材コンクリートは、比重は3.6程度が得られ、普通骨材コンクリートと同程度の電気化学特性が得られるが、物理的特性で劣る点が多いので、軌道部材に使用するのは推奨できない。

(3) 黄鉄鉱を使用すると、比重は4.0程度が得られ、他の物理的特性も普通コンクリートと同程度またはそれ以上が得られるが、電気化学的特性は非常に異なるので、軌道部材に使用する際には注意を要する。すなわち、黄鉄鉱を粗骨材として使用すると抵抗率が非常に小さくなり、補強用鋼材の防食性が低下するので、レール締結装置で絶縁をとる必要がある。また、黄鉄鉱を細骨材として使用すると十分なアルカリ性が保たれている間はよいが、何らかの原因でpHが低下すると黄鉄鉱の溶解が増大して中性化をさらに促進し、耐電食性も低下して、コンクリートの劣化を促進するおそれがある。帰電設備、排水の強化等、設置環境に十分留意する必要がある。

1) 佐藤有孝: 軌道高周波振動の理論解析, 鉄道技術研究報告, No.1013, 1976年8月

2) 河上厚義, ほか: 放射線遮蔽用コンクリート—東北地方産骨材を使用した場合の一研究—, 土木学会誌, Vol.48, No.11, 1963年11月

3) H.G. Midgley: The Staining of Concrete by Pyrite, Magazine of Concrete Research, Vol.10, No.29, Aug. 1958

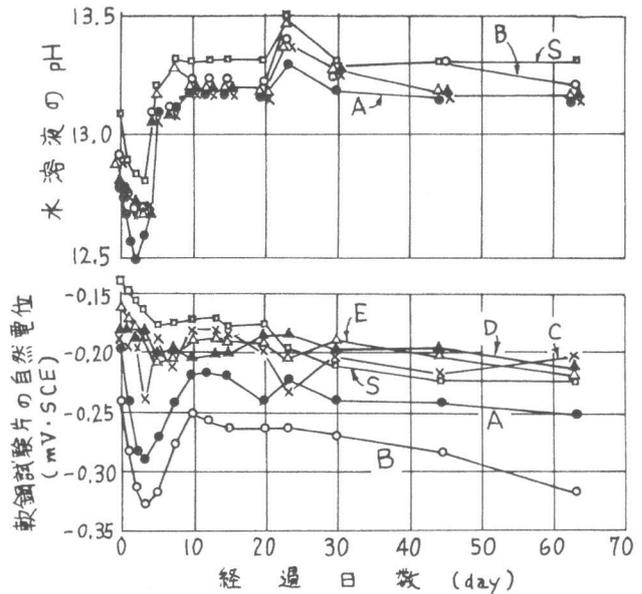


図7 粉碎供試体水溶液のpHなどの経時変化

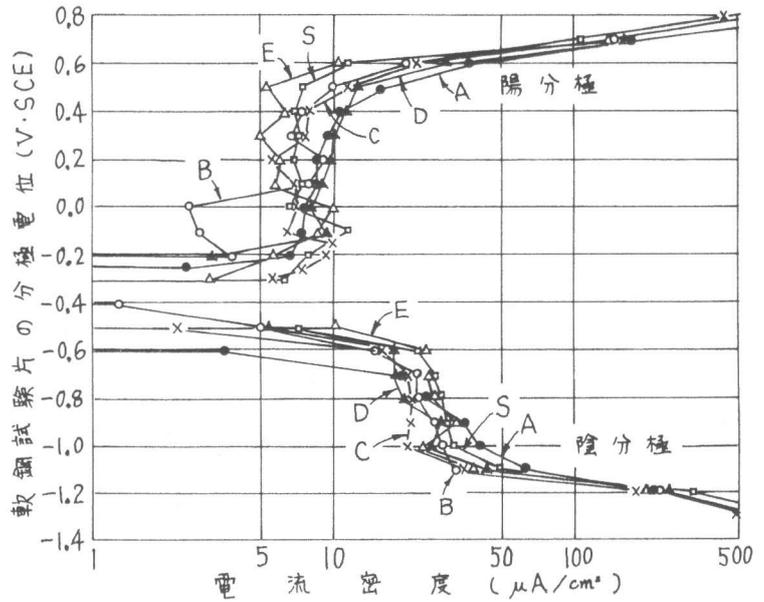


図8 粉碎供試体水溶液中の軟鋼試験片の定電位分極特性曲線