

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—

河上房義*・後藤幸正**・松本順一郎***

要旨 本文は、東北地方産の磁鉄鉱・ページャイト(硼素含有)・赤鉄鉱・砂鉄など、放射線遮蔽用重コンクリートの骨材として考えられるものについて骨材試験を行ない、さらに、これらの骨材を用いた重コンクリートについて二、三の基礎的実験を行なった結果の報告であって、重コンクリートにおけるウォーカビリチー・密度・均等性に対する骨材粒度の影響が大きいこと、砂鉄を細骨材細粒部分として使用すれば好結果をえられること、重コンクリートの材料分離を少なくするのに粒径によって、比重の異なる骨材を組み合わせて用いることが有効であること、などについて述べ、また、上記骨材を用いた重コンクリートの材料分離状況およびガムマ線遮蔽性能の大略をしらべるために行なったガムマ線透過試験の結果について述べてある。

1. 緒 言

コンクリートは、人体に有害な各種の放射線を遮蔽する材料として種々の利点をもつてゐるので、従来より、原子炉その他における生体遮蔽用材料として広く用いられている。放射線遮蔽用コンクリートに必要な条件は、種々の放射線を十分安全に減衰させること、これらの放射線に対して十分安定であること、高度の均等性をもつこと、体積変化が少なくひびわれでないようなものであること、十分な強度を有することなど、なかなかきびしいものである。遮蔽を必要とする放射線の中で特に問題になるのは透過力の大きいガムマ線や中性子である。水素、硼素などをふくむものは中性子の遮蔽に対して有効である。コンクリートは、比較的安定な形で水素を相当ふくんでおり、また、硼素をふくむ物質を混和することも一般に比較的容易である。密度の大きいものは一般にガムマ線や高速中性子に対する遮蔽効果が大きいので、コンクリートを用いて遮蔽体を築造する場合、コンクリートの密度を大きくすれば、それに応じて遮蔽体の厚さを減らすことができる。それで、密度の大きいコン

クリートすなわち重コンクリートは普通のコンクリートにくらべて一般に単価が高いけれども、遮蔽体材料として重要である。

重コンクリートを製造するには、目的によって鉄骨材のような特に重いものを用いることもあるが、一般には、磁鉄鉱、重晶石などのような重い鉱石類を骨材として用いることが多い。このような比重の大きい、しかも角ばった粒形の破碎骨材を用いて、上述のようなきびしい諸条件のもとに遮蔽用重コンクリートを経済的に造るには、材料、配合、施工などについて、普通のコンクリートと違ったむずかしい問題がいろいろある。重い骨材を用いる場合は、普通骨材を用いる場合にくらべて、一般にコンクリートのウォーカビリチーが劣り、特に骨材分離やブリーディングの傾向がいちじるしい。放射線遮蔽コンクリートはその目的からいって、特に高い均等性が要求されているので、重コンクリートを造る場合には、単位骨材量を大きくしてコンクリートの密度をできるだけ大きくするようつとめる一方、ウォーカビリチーについて検討しコンクリートの均等性をできるだけ高めることも非常に大切である。

ウォーカビリチー・密度・体積変化・均等性など、重コンクリートとして重要な性質は、骨材の比重・粒度・粒形・表面組織などのような使用骨材の性質によって非常に大きい影響をうける。重骨材は一般に高価なものであり、また、磁鉄鉱・赤鉄鉱などを骨材として用いる場合は、希望粒度に近いものを容易に入手できることが多いので、重骨材の粒度が重コンクリートの性質におよぼす影響を明らかにすることは経済上からも重要である。また、重骨材の選択に当って、コンクリートのウォーカビリチーその他の性質を改善するため、あるいは経済的理由から、比重・粒形などの異なる異種骨材を組み合わせて用いることも考えられるので、異種骨材の組み合わせの影響を検討することも実用上役立つと思われる。

上述のように、重骨材はそれ自体が一般に高価であるばかりでなく、運搬費も相当に大きいので、重コンクリート施工の際は、その地方に産する重骨材を十分調査・研究して、これらを有効に用いることが経済的見地から

* 正員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
** 正員 工博 東北大学教授 工学部土木工学科
*** 正員 工博 東北大学助教授 工学部土木工学科

特に大切である。東北地方は、鉱物資源の豊富な地方であって、砂鉄・磁鉄鉱・赤鉄鉱などのような重い鉱石ばかりでなく、中性子遮蔽に有効な硼素を含有するページャイトや銅の精錬の副産物である銅からみなども産出する。磁鉄鉱・赤鉄鉱・銅からみなどについては、海外およびわが国でもかなり研究^{1)~4)}されているが、十分明らかにされていない点もあり、また、同種の鉱石でも、採取地によってその性質が相当に相違すると思われる。それで、東北地方に産する各種の遮蔽コンクリート用骨材について、骨材としての性質・これらを用いた遮蔽用コンクリートの性質などについて調査研究することはきわめて有意義であると考えられる。

以上に述べた観点から、東北大学工学部および理学部と東北電力KKとの三者が協同して、東北地方に産する重骨材およびこれらを用いた重コンクリートについてつぎのような基礎的研究⁵⁾を実施した。すなわち、まず、東北地方に産する鉱石・岩石の中から比重の大きいもの、硼素を含有するもの、結晶水を多く含有するものなど、放射線遮蔽用コンクリートの骨材として考えられるもの二十数種を採取し、これらについて骨材としての試験を行ない、また、これらの中からおもなもの数種をえらんで骨材として用い、各種の重コンクリートを製造する実験を行ない、さらにこれらの重コンクリートについて、Co⁶⁰によるガンマ線、ケバトロンによる高速中性子(14 MeV)、原子炉(JRR-1、第4実験孔)中性子、およびRa-Be中性子の放射線に対する減衰特性の試験を行なった。

本文は、上述の協同研究の一環として、東北大学工学部土木教室において担当した部分に、その後に著者らが独自で進めた研究結果を付加したものである。この報告の内容は、(1) 採取した重骨材の中のおもなものについて行なった物理試験・化学分析の結果および骨材としての適否について検討した結果、(2) 骨材試験結果および実用性を考えて4種の重骨材(磁鉄鉱・赤鉄鉱・ページャイト・および砂鉄)をえらび・これらを組み合わせて細粗骨材として用い、骨材粒度、コンクリートの配合

などを変えて重コンクリートを製造し、これらのコンクリーのウォーカビリチー・密度・圧縮強度などの性質を調べた結果およびその考察、(3) 重コンクリートの材料分離の状況およびガンマ線遮蔽特性の大略を調べるために行なったCo⁶⁰によるガンマ線透過試験の結果およびその考察、の3項目であって、重コンクリートの練り混ぜ、運搬、打込み、締固めなど、いわゆる施工方法の問題、混和材使用の問題、重コンクリートの経済性に関する事項、原子炉の重コンクリートとして重要であると思われる熱特性に関するなどはふくんでいない。

なお、この研究を行なうにあたり、東北大学助手 中村文雄および文部技官 杉山嘉徳の両君の協力をえた。

2. 使用セメントおよび骨材

(1) セメント

この研究に用いたセメントは磐城社の普通ポルトランドセメントである、その試験成績は、表-1のとおりである。

(2) 骨材試験

放射線遮蔽用コンクリートの骨材として東北地方にて採取した試料のおもなものの種類、产地および試験成績は、表-2のとおりである。カコウ岩骨材は、重骨材と比較するため用いた普通骨材である。

岩手県釜石鉱山産の磁鉄鉱は、鉱業所内において粒径別に、大塊(40~50 mm)、中塊

表-1 磐城普通ポルトランドセメントの試験成績

試験項目		試験値
強熱減量		0.59 %
不溶残分		0.69 %
シリカ		21.51 %
アルミナ		5.58 %
酸化第二鉄		3.28 %
酸化カルシウム		64.32 %
マグネシア		1.61 %
無水硫酸		1.79 %
合計		99.37 %
比重		3.15
粉末度	比表面積 88 μ 残分	3 020 cm ² /g 1.9%
凝結	始発時間 終結時間	2時間0分 2時間55分
安定性	煮沸方法 浸水方法	良 良
フロー値		241 mm
強度	曲げ 3日 7日 28日	32.8 kg/cm ² 48.2 " " 70.4 "
圧縮	3日 7日 28日	131 " " 229 " " 406 " "

表-2 主要骨材の产地および試験成績

種類	形状	産地	比重	吸水量 (%)	化 学 分 析 結 果 (%)												運搬費を含まない概略価格 (昭和34年) (~35年) (円/t)	
					強熱 減量	Fe	FeO	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	S	SO ₃	CaO	Al ₂ O ₃	MgO	Cu	B ₂ O ₃	計	
磁鉄鉱*	塊	岩手県日鉄鉱業 釜石鉱山	4.49	0.38	—	(57.31)	52.59	26.47	8.95	—	0.90	—	—	—	—	—	88.91	4 000
ページャイト	塊	岩手県日鉄鉱業 釜石鉱山	3.65	0.28	9.51	(34.28)	20.63	29.14	13.48	—	0.87	19.00	—	3.01	—	3.37	99.01	4 500
赤鉄鉱	塊	盛岡市南門鉱業 峰ヶ沢鉱山	4.18	0.78	—	(56.49)	1.71	78.87	11.03	—	0.12	—	—	—	—	—	91.70	3 500
砂鉄	砂	青森県下北半島 奥陸湾下北鉱業	4.85	0.30	—	(62.54)	34.45	50.97	1.54	—	0.40	—	—	—	—	—	97.10	3 000 ~4 000
銅カラミ	塊	秋田県(能代付近) 大日本鉱業 発盛鉱業所	3.67	0.25	—	29.48	—	—	31.06	0.851	—	—	—	—	0.518	—	61.91	500~600
カコウ岩	塊	山形県久保田 電所	2.62	1.02	2.89	(3.68)	—	4.74	62.83	—	—	2.51	16.51	3.38	—	—	92.86	—

* 鉱業所で中塊(20~40 mm)といわれるもの。

(カッコ内の数字は計にふくまない)

(20~40 mm), 粒 (6~20 mm) よび細粒 (2~6 mm) の 4 種に分類されているため、希望の粒度に近いものを入手することができ便利である。大塊、中塊、粒の品質はほぼ同様でその比重は、4.28~4.49 で岡山県金平あるいは山宝産³⁾のものに比較して多少軽いが、骨材粒形は比較的よく、骨材強度も十分で重コンクリート用骨材として良好である。しかし、細粒は選鉱方法によるためか、比重が特に小さく (3.83) 劣っていたので、コンクリート実験には、中塊をインペラ・ブレーカーで破壊したものを細骨材として用いた。

岩手県釜石鉱山産のページャイトは硼素をふくんでるので、中性子遮蔽用の骨材として対象に選んだものであるが、採取試料には磁鉄鉱・石灰石などが混入しており化学分材結果は従来の報告⁴⁾と大差なく B_2O_3 含有量は、2.4~3.4 % であった。強熱減量は 10 % 弱で他の骨材にくらべて非常に多く、結合水をある程度ふくんでいるものと思われた。原子力研究所にコンクリート供試体を持参し中性子減衰特性の比較試験を行なった結果では、ページャイト骨材がかなり有効であることが認められた。ページャイトの比重は 3.68 で比較的小さく石質も多少もろいが、骨材の粒形やその他の性質は特に悪くないので不純物の少ない均質なものがえられるならば、特に中性子の遮蔽を対象としたコンクリートの骨材として使用することができる。

岩手県蜂ヶ沢鉱山産の赤鉄鉱は、インペラ・ブレーカーで破碎した粒の形はかなり角ばっているが、鉄含有量 (45~56 %) はかなり多く、比重 (3.99~4.18) も相当大きいので重コンクリート用骨材として用いることができる。ただ薄い粘土層をかんでいるものがあるので注意する必要がある。

青森県下北半島産の砂鉄は、比重 4.8 程度のものがえられ、採取した骨材試料の中では最も重かった。粗粒率は 0.75~1.22 程度で細骨材として細かすぎるが、その粒形は丸味をおびていて細骨材の細粒部分として最適である。ただし、ときに有機物を多量にふくむものがあるので注意を要する。

秋田県発盛鉱業所の銅からみは、堅硬な塊状のもので、比重も 3.67 で相当大きく、重骨材として使用できると思われたが、コンクリート実験には用いなかった。

3. コンクリート実験および考察

2. で述べた骨材試験の結果をもとに、実用性をも考えて磁鉄鉱、ページャイト、赤鉄鉱砂鉄の 4 種を選び、これらを後で述べるように組み合わせて重コンクリートの実験を行ない、各種コンクリートのウォーカビリチー、材料分離状況、密度、強度、ガムマ線遮蔽の大略の特性、などを調べた。なお、比較のため普通骨材としてカ

コウ岩の碎石、碎砂をも用いた。磁鉄鉱を細粗骨材として用いた場合については、粒径別にふるい分けたものを、種々組み合わせて数十種の試験配合を行ない骨材粒度の影響を特にくわしく調べた。異種骨材の組み合わせの問題については、砂鉄を細骨材としてあるいは細骨材細粒部分として用い、これとこれより比重の小さい他の 3 種の骨材とを組み合わせて、コンクリートを造って検討した。

粗骨材の最大寸法は、重コンクリートの密度やウォーカビリチーに深い関係があるが、この実験では、従来の重コンクリート遮蔽体の施工例その他を考慮して 40mm とした。また、同じような考慮から水セメント比は、一応 50 % 程度として実験を行なった。

重コンクリートの配合設計をするにあたって、中性子遮蔽性能の点からいうと、コンクリート中の水量をできるだけ多くすることが望ましいが、使用水量のうちセメントと結合する水は安定であるが、結合しない水すなわち自由水は特別な処置をしなければ長い間には蒸発によって相当程度失われるものと思われること、また、材料分離を少なくして均等性を高めるためには、単位水量をできるだけ少なくて済むことが望ましいこと、密度を大きくし体積変化を少なくするためにもできるだけ単位水量を減らし単位骨材量を大きくする必要があること、などを考えて、作業に適するウォーカビリチーのえられる範囲内で単位水量を小さくするという一般コンクリートの配合設計の原則にしたがって、密度や均等性の高いコンクリートを造ることを目標とした。

なお、この実験でウォーカビリチーの判定には、スランプ試験およびブリージング試験を行なったほかに、材料分離の状態をみるために立方体 (20×20×20 cm) より直方体 (15×15×30 cm, より 15×15×60 cm) の供試体を作り、これらを切断して観察したり、ガムマ線透過試験を行ない測定間の透過線束のバラツキを調べたりした。また、密度の測定には、上記の立方体供試体 (材令 28 日) を用い、圧縮強度の測定には直径 15 cm、高さ 30 cm の円柱供試体を用いた。コンクリートの供試体型詰めには棒状バイブレーターを用いて締固めた。

(1) コンクリートの配合、密度および圧縮強度

上述の 4 種の骨材およびカコウ岩骨材を用いて各種のコンクリートを造ったときのおもな配合例、およびそれらの場合の密度、圧縮強度などを示せば表-3 のようである。図-1 は、配合 A, B, C, D, E の場合に用いた骨材の粒度を粒度曲線によって示したものである。

表-4 の配合 A より B は、磁鉄鉱を細粗骨材として用い骨材粒度および配合を変えて行なったものの中の二例である。配合 A は、土木学会無筋コンクリート標準示方書の標準粒度範囲に入り、なめらかな粒度曲線で現わ

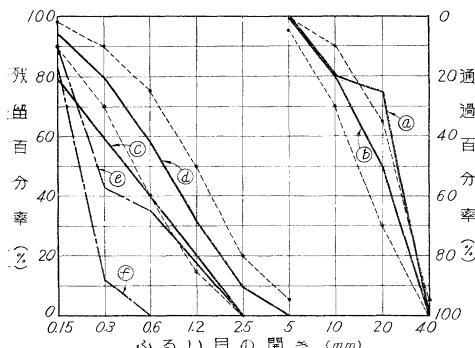
表-3 コンクリート配合例

配合記号	使用骨材および粒度		1 m³ 当りの材料の量 (kg)				水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	スランプ (cm)	コンクリートの比重 計算実測**	平均圧縮強度 (材令28日) (kg/cm²)	
	細骨材	粗骨材	セメント	水	細骨材	粗骨材						
A	磁鉄鉱①	磁鉄鉱⑤	350	175	1184	1931	50	38	3.5	3.64	3.70	315
B	磁鉄鉱②	磁鉄鉱⑥	330	165	1120	2081	50	35	3.0	3.70	3.75	—
C	砂鉄、磁鉄鉱③	磁鉄鉱⑦	290	145	1192	2215	50	35	3.0	3.84	3.88	—
D	砂鉄④	磁鉄鉱⑧	320	160	1093	2218	50	33	4.0	3.79	3.85	337
*E	砂鉄①	磁鉄鉱⑨	315	111	631	2869	35	18	—	—	3.97	356
F	ページャイト	ページャイト	380	175	1036	1554	46	40	3.0	3.15	3.19	283
G	赤鉄鉱	赤鉄鉱	388	194	945	1919	50	33	4.0	3.45	3.53	327
H	砂鉄①	ページャイト	340	170	1158	1736	50	40	4.0	3.40	3.43	241
I	砂鉄②	赤鉄鉱	340	170	1134	2016	50	36	4.0	3.66	3.71	292
J	カコウ岩	カコウ岩	350	179	729	1094	51	40	4.0	2.35	2.36	—

* あらかじめ型わく内に 1/3 程度モルタルを入れ、この中に粗骨材をパイプレーターで埋め込む方法によったもの。

** 型わくにコンクリートを詰め頂部を定規で平滑に仕上げた後、水の上昇によって沈下した部分は砂鉄モルタルでキャッピング比重を測定したもの。

図-1 骨材粒度曲線



注:点線は土木学会の無筋コンクリート標準粒度範囲を示したものである。実線は磁鉄鉱を表し、一点鎖線は砂鉄を表している。

される粒度の細粗骨材を用いた場合の例であるが、スランプ 3~4 cm のコンクリートについて種々の骨材粒度を比較した結果では、この例のような粒度のものでは好結果がえられなかった。ウォーカビリチー、密度、均等性などを総合して良好な結果がえられたときの細粗骨材混合物の粒度は、配合Bのように 2.5~5 mm の付近の粒径をふくまないわゆるギャップのある粒度のものであった。この場合、細骨材率は 35 % 程度で、粗骨材粒度としては図-1 ④ のように単位容積重量が最大に近い粒度のものがよく、細骨材の粒度としては、図-1 ⑤ のように、2.5 mm 以上の粒形のものをふくまず 0.15 mm 以下の微粒を相当量ふくむもので、粒度曲線が 0.15 mm と 2.5 mm の間でほぼ直線になるものがよかった。図-1 ⑥ の粒度曲線を上向きに凸にするとウォーカビリチーが悪く、凹にすると単位水量をかなり大きくする必要があった。0.15 mm 以下の微粒の量が普通の標準より相当大きいのは、ブリージングを 1~2 % 以下にするためであって、細骨材中の微粒の必要量は、単位水量、単位セメント量、骨材比重、骨材粒の形状、微粒部分の粒度組成、などによってかなり異なっており、磁鉄鉱細骨材の場合には 10~20 % 程度で、配合C(後述)のように磁鉄鉱細骨材の細粒部分を砂鉄でおきかえる場合はほぼ

10 % 程度であった。

表-3 の配合例のうち配合 E を除いたものはすべて材料全部を練り混ぜる普通の方法によってコンクリートを造ったものであるが、重コンクリートは、普通コンクリートに比較して骨材が特に重いため、粗骨材沈下やブリージングなどの材料分離の傾向は非常に大きいものである。これは、数

多くの配合試験を行なった結果によく現われており、例えば、スランプ 3~4 cm のコンクリートでもブリージングが 8 % 以上になった例もあり、また、コンクリート取り扱い中に、普通コンクリートの概念からいってウォーカビリチーがよいと思われたものでも、供試体を調べた結果かなりの分離が認められた例もある。材料分離には、骨材粒度ばかりでなくコンシスティンシーも大きい影響があり、この実験では、スランプ 1 cm 程度の硬練りからスランプ 10 cm 程度の軟練りまで、各種のコンシスティンシーの重コンクリートを造ったが、配合 B のように良好な粒度の骨材を用いた場合でもスランプが 3~4 cm をこえると材料分離がいちじるしくなる傾向がみられた。 w/c は、46~53 % の範囲で変えてみたが、ウォーカビリチー、密度などにあまり大きい影響は認められなかった。

つぎに、比重、粒形の異なる骨材の組み合わせの影響を調べるために、配合 D, H, I のように、細骨材として砂鉄のみを用い、これにより比重の小さい磁鉄鉱、赤鉄鉱およびページャイトの三種を粗骨材として組み合わせてコンクリートを造って比較した結果では、細粗骨材の比重差が材料分離の傾向にかなりの影響をおよぼすことが現われた。すなわち、比重差の大きい砂鉄、ページャイトコンクリート(比重差 1.17)の場合は、材料分離が非常に少なく、比重差の小さい砂鉄、磁鉄鉱コンクリート(比重差 0.36)の場合はかなりの分離が生じた。後者の場合は、スランプ 1 cm 以下とする必要が認められた。しかし、表-3 に明らかなように、いずれの場合も砂鉄を細骨材として用いることによって、密度も高まり、単位水量、単位セメント量も減らすことができた。また、配合 C のように、磁鉄鉱コンクリートの細骨材の細粒部分を砂鉄(細骨材量の 2/3 以下)でおきかえた場合は、ウォーカビリチーがいちじるしく改善され、単位水量も大幅に減らすことができ、しかも密度、均等性の点でも非常によい結果がえられた。これらの実験結果

果からみて、小さい粒ほど比重が大きくなるように骨材を組み合わせることは、粗骨材沈下のような材料分離を減らすのにきわめて有効であると思われる。組み合わせる骨材の比重差がどの程度のとき最適であるかは一つの研究課題であり、同じ理由から比重の大きい粉末混和材を用いることも、材料分離を減らし均等性を高めるのに有効であろう。また、重い粉末混和材は、ウォーカビリチーを害さずに単位水量を増すのに役立つと思われる。以上述べたように、砂鉄を細骨材としてあるいは細骨材細粒部分として、他の3種の骨材と組み合わせて用いれば、配合 B,G,F のように同種もののみを細粒骨材として用いた場合にくらべてかなりよい結果がえられるが、このことは、砂鉄が他の3種の骨材より比重が大きく、したがってモルタルの比重が大きくなり粗骨材の沈下が減ることによりばかりでなく、砂鉄の粒形が他の重骨材と異なり丸味をおびているためウォーカビリチーが改善され、単位骨材量も大きくすることができますなどにもよると思われる。

なお、上述の配合Dのように粗骨材として磁鉄鉱、細骨材として砂鉄のみを用い、スランプ3~4cmのコンクリートを普通の方法で造った場合は、材料分離の傾向が大きかったが、この場合に、モルタルのみを別に練って、これを型わく内にあらかじめ1/3程度入れ、この中に磁鉄鉱粗骨材をバイブレーターで埋め込んで供試体を造ってみたが、材料分離が非常に少なく、また、密度も最大(3.9以上)にすることができた。この方法は、従来から一つのコンクリート製造方法として知られているものであるが、密度の大きい均等質の重コンクリートの製造方法として、場合によっては有効であろう。

配合Gは、赤鉄鉱を細粗骨材として重コンクリートの例で、この場合は比重が3.5程度で、磁鉄鉱の場合にくらべてやや軽く、単位水量、単位セメント量がかなり多く、ウォーカビリチーの点でも劣っているが、これは、赤鉄鉱骨材の粒形が他のものより特に角ばっているためと思われる。この点は、上述のように砂鉄と組み合わせて用いれば十分改善することができる。

配合Fは、ペーチャイトを細粗骨材とした例で、この場合は、比重が3.2程度で、前者よりかなり軽い。しかし、このコンクリート供試体について実施した中性子遮蔽特性試験の結果⁹⁾からみると、他のものよりかなり誘導放射能の少ない点ですぐれていることが認められている。

つぎに材令 28 日の圧縮強度試験結果をみると、磁鉄鉱や赤鉄鉱を用いた場合はほとんど 300 kg/cm^2 に達した。ページャイトの場合には、石質が多少もろいためか、他のものより強度が幾分低かったが、遮蔽体建築材料としては、十分と思われる。なお、釜石の磁鉄鉱はか

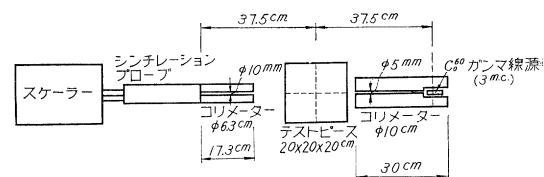
なりの磁性をもっており、磁鉄鉱骨材の表面に砂鉄や磁鉄鉱微粒がよく付着するのでセメントペーストの結合力を弱めると考え、ミキサ投入の順序を変えて調べてみたが、この影響は強度試験の結果にはほとんど現われなかった。

遮蔽体のコンクリートは、炉心部から熱が伝わるばかりでなく、放射線エネルギーを吸収し、これが熱に変わり、コンクリート体の温度がかなり上昇する。このためにコンクリート中の含有水分が減少し、中性子に対する遮蔽性能が低下することも考えられる。細粗骨材とも磁鉄鉱を用いた材令 28 日の円柱供試体 (15 cm × 30 cm) を 110°C の恒温中で一定重量になるまで乾燥した結果、1) コンクリート製造の際、用いた水分の 75~85 % は、脱水されること、2) 乾燥後のコンクリート中には、重量で 0.75~1.05% の水分が残留すること、3) 乾燥前に 3.70~3.73 であった重コンクリートの比重は、乾燥後に 3.55~3.60 に減少すること、などがわかった。なお、この実験中に、重コンクリートの材料分離の状況をみる参考として、高さ 30 cm の供試体を上下に 2 分し、それぞれの脱水率を求めたところ、上半のはうが下半より 10~20 % 多く脱水された。

(2) ガンマ線透過試験

この試験は、コンクリート供試体のガンマ線遮蔽性能および材料分離の状態の概略を知るために行なったものである。ガンマ線の線源としては、 Co^{60} 3 m.c. を用い、図-2 に示したような装置により、良幾何条件下で、すなわち、放射線束を細くして散乱放射線が検出器に入らないようにして試験を行なった。シンチレーション・ヘッドには、神戸工業製 PS-1 B 型を用い、計数器には、神戸工業製 SA-5 A 型を用いた。ディスクリミネーションは約 0.24 MeV とした。

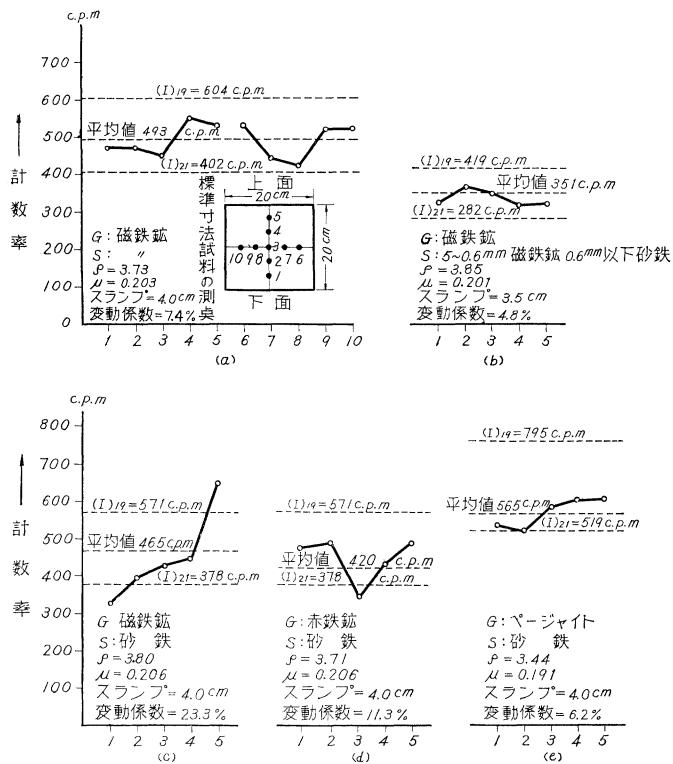
図-2 ガンマ線透過測定装置配置図



コンクリート供試体は、製作時の頂部を上にして任意の側面について、図-3(a)に示したような測点を選び、各測点が、ガンマ線束の中心にくるように供試体をおいて、各測点 10 分間ずつ透過線束を測定した。

まず、 Co^{60} 線源のない場合のバック、グランド B を測定し、つぎに、 Co^{60} 線源をおいてカウント N_0 を測定し、つぎに、コンクリート供試体をおいてカウント N' を測定すると、

図-3 透過ガムマ線束



となる。 x はコンクリートの厚さ(cm)で、 μ は線型吸収係数(cm^{-1})である。したがって、 N 、 N_0 、 B を測定すれば、 $x=20\text{ cm}$ は既知であるから、式(1)から μ が求まる。

$$N-B=I, N_0-B=I_0 \text{ とおくと、式(1)は}$$

$$I=I_0 e^{-\mu x} \quad \dots \dots \dots (2)$$

となる。

$1/\mu$ は緩和長(cm)とよばれる。半価長(cm)は式(2)において $I=\frac{1}{2}I_0$ とおくことにより、

$$(x)_{1/2} = \frac{0.693}{\mu} \quad \dots \dots \dots (3)$$

として求められる。1/10価長(cm)は、式(2)において、 $I=\frac{1}{10}I_0$ とおくことによって

$$(x)_{1/10} = \frac{2.303}{\mu} \quad \dots \dots \dots (4)$$

として求められる。

また、供試体の厚さが1cm増減して、 $x=21\text{ cm}$ および $x=19\text{ cm}$ となつた場合の線束を、式(2)を使って計算して、それぞれ $(I)_{21}$ および $(I)_{19}$ として、図-3に示した。この場合の μ は、各供試体の測点1～

10からえた μ の算術平均である。

質量吸収係数(cm^2/g)は、供試体の密度を $\rho(\text{g}/\text{cm}^3)$ とすれば

$$\mu_m = \frac{\mu}{\rho} \quad \dots \dots \dots (5)$$

なる関係から求められる。

以上のようにして、各種重コンクリートについてガムマ線照射試験を行ない、透過線束を測定し、透過化率、線型吸収係数などを求めた結果を総括して示せば、表-4のようである。

便宜上、砂鉄を砂、磁鐵鉱を磁、赤鉄鉱を赤、ページャイトをペ、カコウ岩を花とした略語を用い、骨材組み合わせを細骨材、粗骨材の順にカッコ内に書いて、それぞれのコンクリートを表わして試験結果を述べればつきのようである。特殊な製法で造った(砂、磁)を除けば、比重は、(砂・磁、磁)>(砂、磁)>(砂、赤)≈(磁、磁)>(赤、赤)>(砂、ペ)>(ペ、ペ)>(花、花)の順であった。透過比率は、(砂・磁、磁)<(砂、赤)<(磁、磁)<(砂、ペ)<(赤、赤)<(ペ、ペ)<(花、花)であり、(赤、赤)を除いて比重が支配的因素であることがわかった。線型吸収係数は、(砂・磁、磁)>(砂、磁)≈(砂、赤)>(磁、磁)>(砂、ペ)>(赤、赤)>(ペ、ペ)>(花、花)の順序であり、透過比率と同様な関係があった。質量吸収係数は、ほぼ一様であり、平均値0.055がえられた。以上の結果からみると、 Co^{60} によるとガムマ線の遮蔽能は、(砂・磁、磁)>(砂、磁)>(砂、赤)>(磁、磁)>(砂、ペ)>(赤、赤)>(ペ、ペ)>(花、花)の順と考えることができる。

コンクリートの密度 ρ と線型吸収係数 μ との間には、密接な関係が認められる。佐治⁷⁾は、両者の関係を、 $\rho < 7.8$ の場合に、次式をもって示した。

$$\mu = 0.0511 \rho + 0.0069 \quad \dots \dots \dots (6)$$

表-6 の場合も、ほぼ直線関係にあって、最小自乗法

表-4 ガムマ線透過試験結果(平均値)

使 用 骨 材	透 過 比 率 (10^{-2})	線 型 吸 收 係数 μ (cm^{-1})	緩 和 長 (cm)	半 価 長 (cm)	1/10価長 (cm)	質 量 吸 收 係数 μ_m (cm^2/g)	実 测 比 重 ρ (g/cm^3)	備 考
細 骨 材	粗 骨 材							
磁 鉄 鉱	磁 鉄 鉱	1.80	0.201	5.0	3.5	11.5	0.0540	3.71
砂 鉄・磁 鉄 鉱	磁 鉄 鉱	1.49	0.210	4.8	3.3	11.0	0.0550	3.81
砂 鉄	磁 鉄 鉱	1.63	0.205	4.9	3.4	11.2	0.0540	3.79
砂 鉄	磁 鉄 鉱	1.27	0.218	4.6	3.2	10.5	0.0560	3.90
ページャイト	ページャイト	2.84	0.177	5.6	3.9	13.0	0.0560	3.17
砂 鉄	ページャイト	2.14	0.192	5.2	3.6	12.0	0.0560	3.43
赤 鉄 鉱	赤 鉄 鉱	2.31	0.188	5.3	3.7	12.2	0.0545	3.45
砂 鉄	赤 鉄 鉱	1.65	0.205	4.9	3.4	11.3	0.0550	3.71
カコウ岩	カコウ岩	7.08	0.132	7.6	5.3	17.4	0.0559	2.36

* 表-3 配合Eと同じ方法で製造したもの

により、直線式をあてはめると、次式がえられた。

なお、遮蔽効果の概略を求めるために工学部土木教室で実施したガンマ線透過試験の結果は、同じ供試体について行なった東北大学理学部のさらに精密なガンマ線減衰特性試験結果⁵⁾とほぼ一致している。

また、一辺 20 cm の立方供試体について行なったガンマ線透過試験の数例を、透過線束を縦軸に、各測点番号を横軸にとって図示すれば、図-3 のようである。図-3 の (c), (d), (e) は、細骨材として砂鉄のみを用い、粗骨材として、それぞれ磁鉄鉱、赤鉄鉱、ページャイトを用いた場合の例であるが、図には、透過線束のバラツキの状況がよく現われている。このようなガンマ線透過試験によって、重コンクリート供試体の材料分離の状況を推定した結果は供試体切断面の観察結果とほぼ一致しており、有泉⁸⁾、平野⁷⁾などによても報告されているが、ガンマ線透過試験は重コンクリートの均等性、材料分離状況などを判定する無破壊試験方法として非常に有効であった。

4. 結論

東北地方産の各種重骨材試料について、物理試験、化学分析を行ない、この結果をもとに実用性をも考えて、岩手県金石鉱山産の磁鉄鉱およびページャイト、岩手県蜂ヶ沢鉱山産の赤鉄鉱、および青森県下北半島海岸産の砂鉄の4種を選び、これらを細粗骨材として用い、粗骨材最大寸法を40 mmとして各種の配合で重コンクリートを造る実験をし、さらに、これら重コンクリートの供試体について Co^{60} を用いガンマ線透過試験を行なったが、この実験の範囲内で明らかにされた事がらはつぎのとおりである。

(1) 上記4種の重骨材個々についてのおもな検討結果は、下記のようである。

砂鉄は、粗粒率は1.0前後で細かすぎるが、比重は採取したものの中で最大(4.8前後)で、粒形は丸味をねぎりておびており、しかも、値段も比較的安く、他の3種の骨材と組み合わせて細骨材あるいは細骨材細粒部分として用いれば非常に好適である。

磁鉄鉱は、比重が平均 4.44 程度で、強度や粒形の点でもよく、取り扱いも容易で安定であって、最も良好なものと思われる。これを、細粗骨材として用いれば、比重 3.7 程度、砂鉄と組み合わせて用いれば、比重 3.8 以上のコンクリートを造ることができる。

赤鉄鉱は、比重が4.18程度で前者よりやや軽い。強度は十分であるが、骨材粒形はやや角ばっており、また、うすい粘土層をかぶっているものがある。赤鉄鉱を細粒骨材として用いれば、比重3.5程度のコンクリートを

造ることができるが、ウォーカビリーチーが劣り、材料分離の傾向が大きいので、これを単独に用いることはあまり好ましくない。しかし、砂鉄と組み合わせて用いれば十分使用することができ、比重も3.7程度のコンクリートを造ることができる。

ページャイトは、比重が 3.68 程度でやや軽く、石質も多少もろいが、硼素を含有しているので、中性子遮蔽用骨材として有効である。これを、細粗骨材として用いれば、比重 3.2 程度、砂鉄と組み合わせれば、比重 3.4 程度のコンクリートを造ることができる。

(2) 重コンクリートをセメント、水および骨材を練り混ぜる方法によって造る場合、骨材粒度は重コンクリートの密度、ウォーカビリチーなどにかなり大きい影響があり、密度の大きい均等性の高い重コンクリートを造るには、適当な粒度の骨材を用いることが特に大切である。釜石産磁鉄鉱の細粗骨材を用い、最大寸法 40 mm、水セメント比 50 % 程度、スランプ 3~4 cm として、粒度の影響を調べた結果、細粗骨材混合物の粒度は、2.5~5 mm 付近の粒径のない、いわゆるギャップのあるものがよく、粗骨材の粒度としては、単位容積重量が最大に近いようなものが適当で、また、細骨材の粒度としては、ブリージングにたいする考慮から 0.15mm 以上の微粒を相当量 (この場合 10~20 %) ふくんでいるものが望ましい。

重コンクリートの材料分離の傾向は、非常に大きく、粒度のよい骨材を用いた場合でも、スランプ3~4cmをこえると材料分離がいちじるしくなる傾向がある。

砂鉄を、細骨材としてあるいは細骨材細粒部分としてこれより比重の小さい他の骨材と組み合わせて用いれば、ウォーカビリチーがいちじるしく改善され、しかも、密度、均等性をかなり高めることができる。これは、砂鉄の比重が他のものより大きいことによるばかりでなく、砂鉄の粒形が丸味をおびていることによるものと思われる。磁鐵鉱骨材を用いる場合に、磁鐵鉱細骨材の細粒部分を砂鉄（細骨材量の 60～65 %）でおきかえることによって、非常によい結果がえられる。これらの実験結果からみて、小さい粒ほど比重が大きくなるように比重の異なる骨材を組み合わせることは、重コンクリートの材料分離を減らし、均等性を高めるのに大いに有効であると思われる。同じ理由から、重い粉末混和材の使用も大いに有効であろう。

(3) 粗骨材として磁鉄鉱、細骨材として砂鉄のみを用いる場合について、あらかじめ型わくの中にモルタルを $1/3$ 程度敷き、この中にバイブレーターを用いて、粗骨材を押し込む方法でコンクリートを造ると、普通の方法によるものにくらべて、密度が大きく、均等性の高いコンクリートを造ることができる。この方法は、場合に

よっては、特に重い骨材を用いて、分離の少ない密度の大きいコンクリートを造るのにかなり有効と思われる。

(4) 重コンクリートのガンマ線に対する遮蔽特性の大略を調べるために、一辺 20 cm の立方体のコンクリート供試体を造り、 Co^{60} によるガンマ線透過試験を行なったが、ガンマ線遮蔽能は、細骨材として砂鉄および磁鉄鉱、粗骨材として磁鉄鉱を用いたコンクリートが最良であり、以下(骨材組み合わせを細骨材、粗骨材の順に書きあらわすと)、砂鉄・赤鉄鉱コンクリート、磁鉄鉱・磁鉄鉱コンクリート、砂鉄、ページャイトコンクリート、赤鉄鉱・赤鉄鉱コンクリート、ページャイト・ページャイトコンクリート、カコウ岩・カコウ岩コンクリートの順序であった。各コンクリートの比重 ρ と線型吸収係数 μ の間には

$$\mu = 0.0521 \rho + 0.0098$$

という直線関係がえられた。

なお、このガンマ線透過試験を利用して供試体における材料分離の状態を調べてみたが、供試体切断による観察結果とほぼ一致しており、ガンマ線透過試験は重コンクリートの材料分離の状況を調べる無破壊試験方法とし

てかなり有効であった。

参考文献

- 1) Henrie, J.O.: "Magnetite Iron Ore Concrete for Nuclear Shielding", Journal of ACI, Proceedings, Vol. 51, 1955.
- 2) Raphael, M.J.: "The Structural Properties of Magnetite Concrete", Proceedings of A.S.C.E., Vol. 84, 1958.
- 3) 佐治健治郎: 「放射線遮蔽用コンクリート骨材」、セメント・コンクリート、No. 129, 11月号, 1957
- 4) 佐治・山崎・山田: 「原子炉遮蔽用高密度ボルトランド・セメント・コンクリート」、セメント技術年報 1956
- 5) 東北大・東北電力・放射線遮蔽材料協同研究会: 「放射線遮蔽用コンクリートについての研究」、1962
- 6) 笠井・古田: 「国産ボロン入り磁鉄鉱を用いた重コンクリートの原子炉放射線に対する遮蔽効果」、第3回原子力シンポジウム
- 7) 平野・佐治・山崎・川田・宮下: 「しゃへい用コンクリートのガンマ線しゃへい、後方散乱、プレバクト工法による高密度コンクリート」、ならびにコストに関する研究」、セメント技術年報, 1957.
- 8) 有泉・近藤・森: 「ガンマ線透過方法によるコンクリートの材料分離現象の測定」(第一報), 土木研究所報告 103 号, 1960.

(1963. 2.26・受付)

書評

鉄道土木施工法

和仁達美稔共著 山海堂刊

国鉄の線路建造物の財産価格は 8000 億円と聞いている。この膨大な建造物の維持管理は国鉄の施設局土木課で所管されている。著者両氏はこの土木課に籍を置き、長年この方面の仕事と取り組み、豊富な経験を有する真摯な学究の徒であるが、今回これらの経験をもととして「鉄道土木施工法」なる著書を公にされた。

この著書は土木工学における国鉄内外の研究や、その導かれた理論を国鉄内の現場に応用し、すでに得られた成果や実績をもととして集大成されたものであって、生きた学問の数々が引用されていて最も実用的なものと信じている。近年わが国土木建造物も老朽の域に達し、加うるに交通の立体化などにともなって、アンダーピンニング等の工事もふえて来、また河川改修等による在来橋梁の径間拡張、落石やのり崩壊、地すべり等に対するのり面の維持等多種にわたる工事が多くなってきており、国鉄ではこれらに対しいずれも列車という重荷重を運転しながらの特殊な条件下で、安全にしかも迅速に工事を行なわなければならない使命をもっている。アンダーピンニングに対しては大阪駅付近の地盤沈下に対する対策を引例して詳細に記述されている。

橋台橋脚の取り替えのための荷重仮受工としては、サンドル、ステージング、ベントがあり、受け方としては、添げた、特殊フィンク、かんざしげた、けたの連結、けたの移動等の各種工法、またまた取り替えのためには、

短い列車間合を利用する横取、縦取、回転式、山本式、ソ 200 等操重車やクレーンを用いる工法等、今後も応用範囲の広い工法が多く記述されている。トンネルについては、やはり列車運転中に車両と覆工との間の空間を利用して、在来トンネル覆工および地山を仮受けするセントルの用い方と、トンネル改築工法についての各種工法、またろう水防止についての各種工法等が詳述されているが、上記はいずれも歩掛、工費等も可能な限り述べられているので、実務者の施工の手引きとなるとともに、計画者の概算見積等にも参考となるところが大きい。

本書は独り鉄道のみならず、同様な使命をもつ道路等の維持管理にたずさわるものおよびこれらを施工する請負業者にもひ利益するところ大なるものがあると信じ、推せんする次第である。ただ本書は鉄道工事の全般にわたっているため広範に過ぎ、ねらいの重点がうすれているようであり、また実務者の資料とするには、少し歩掛、実績について施工例をあげて詳細な記述がほしかった。

著者: 和仁 正員 国鉄施設局土木課長
赤沢 正員 国鉄施設局土木課
体裁: A5 判 669 ページ 定価 1350 円
1962.11.15 刊

KK山海堂: 東京都新宿区細工町 15 振替 東京 194982 番
電話 (331) 9058
【日本交通技術KK 深谷俊明・記】