

電磁シールドコンクリートの開発 (その2)

Performance of Concrete with an Electromagnetic Shield (Part2)

横田 依早弥 笠嶋 善憲 平井 淳一 江 寄 智 和
桜本文 敏 百瀬 晴基 山木 克則

要 約

事業所用 PHS や無線 LAN などの電波を利用するオフィスビル等の最適な電磁環境を構築する目的で、床、壁を一体で打設し電磁シールド層を形成できる電磁シールドコンクリートの開発を行っている。コンクリートに電磁シールド性能を持たせる方法として、これまで酸化鉄ダストを混入して良好な電磁シールド性能を得たが、構造部材としての耐久性に不安があり、これに代る材料として鉄鉱石あるいは砂鉄を混入したコンクリートについて電磁シールド性能、力学的特性及び耐久性を調べた。

その結果、鉄鉱石を混入したコンクリートは、酸化鉄ダストを混入したものより電磁シールド性能は多少低くなるが、施工性や圧縮強度等は普通コンクリートと同等であり、耐久性にも問題がないことが判明した。また、砂鉄を混入したコンクリートは周波数が 4GHz 以上の高い場合に鉄鉱石を混入したコンクリートよりシールド性能が良いが、粒径が小さいことからその混入量が多いとコンクリートとしての施工性が悪くなるため、混入率が 650kg/m³ 以下の場合に適していることが判明した。

目 次

- I. はじめに
- II. 鉄鉱石あるいは砂鉄を混入したモルタルの基礎特性
- III. コンクリートの電磁シールド性能
- IV. コンクリートの力学的特性及び耐久性
- V. おわりに

I. はじめに

建物内の電磁環境を制御する技術として電磁シールドコンクリートの開発を行っている。前報¹⁾では、製鉄所の副次生成物である酸化鉄ダストを混入したコンクリートについて報告した。このコンクリートは電磁シールド性能の良いたことが判明したが、耐久性試験の結果、長期間の安定性について不安があり、構造部材以外の用途に適用していくこととした。

酸化鉄ダストが電磁シールド性能を持つのはマグネタイト (Fe₃O₄) を含むためであるが、このマグネタイトを含む比較的安価な材料としては、鉄の原料である鉄鉱石や砂鉄が挙げられる。

今回はこの鉄鉱石あるいは砂鉄を混入したコンクリートとそれをパネルとして使用する場合の電磁シールド性能並びにコンクリートの力学的特性・耐久性について報告する。

II. 鉄鉱石あるいは砂鉄を混入したモルタルの基礎特性

1. 鉄鉱石、砂鉄の Fe₃O₄ 含有率及び粒径分布

鉄鉱石及び砂鉄の Fe₃O₄ の含有率を酸化鉄ダストと対比して table 1 に示す。X 線回折により求めた結果であり、標準試料として Fe₃O₄

の試薬を用い、また内部標準として CaF₂ を混合して検量線を作成して定量分析を行った。鉄鉱石としては、チリ産のロメラル鉄鉱石 (以下、ロメラルと略す) を用いた。ロメラルの Fe₃O₄ の含有率は 23.6% であり、砂鉄は 11.3% であった。いずれも酸化鉄ダストの 31.2% より少ないが電磁シールド効果は期待できる。

Table 1 Fe₃O₄ Content in iron ore, iron-sand

試料	Fe ₃ O ₄ 含有率
ロメラル鉄鉱石 (チリ産)	23.6%
砂鉄 (ニュージーランド産)	11.3%
酸化鉄ダスト	31.2%

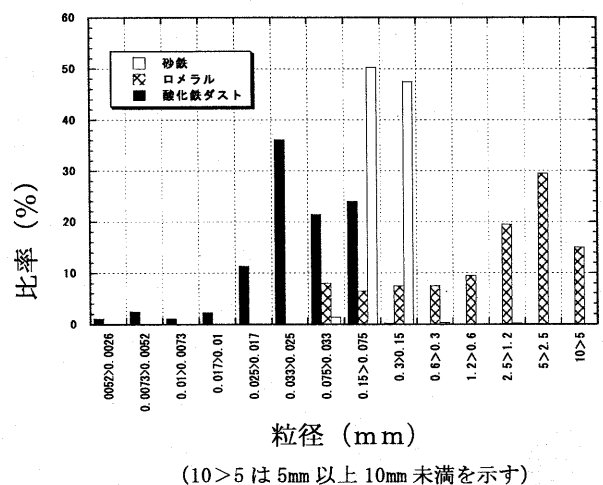


Fig.1 Drop-size Distribution of Steel Raw Materials

キーワード: 電波, 電磁シールド, 鉄鉱石, 砂鉄, マグネタイト, コンクリート, 力学的特性, 安定性, 腐食性, 無線 LAN, PHS, オフィス, ビル

一方、各々の粒径分布を Fig.1 に示す。ロメラルは、0.075~10mm であるのに対し、砂鉄は 0.033~0.3mm であり、粒径が小さく分布の幅も狭い。酸化鉄ダストは、0.15mm 以下で数ミクロンまで分布しており、ロメラルや砂鉄より粒径が小さい。

2. モルタルの電磁シールド性能

ロメラルあるいは砂鉄を質量比 25% (全質量に対するロメラルあるいは砂鉄の質量の割合) を混入した厚さ 50mm のモルタルの電磁シールド性能を同軸管法により測定した。ロメラルは 5mm アンダーを使用しており粒径範囲は 0.033~5mm, 砂鉄は 0.033~0.3mm である。

その結果、Fig.2 に示すように電磁シールド性能は、ロメラルと砂鉄が同程度であり、普通モルタルに比べと周波数が高くなるほどシールド性能が良くなっている。このシールド性能を詳しく比較すると、2GHz 前後でロメラルが良く 4GHz 以上では砂鉄が良い傾向があった。砂鉄は Fe_3O_4 の含有率がロメラルの 1/2 であるが、砂鉄の粒径が小さいことから周波数の高い領域でシールド性能が良くなったことが考えられる。

3. 粒径の影響

そこで、粒径と周波数の関係を調べた。ロメラルの粒径 0.033~

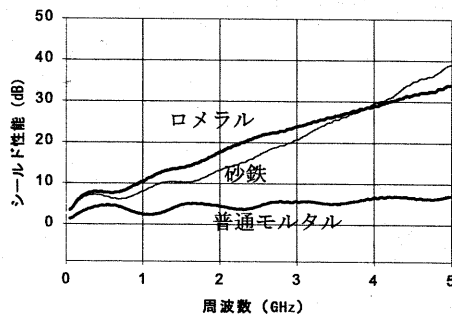


Fig.2 Shield Performance of Ironstone in Concrete

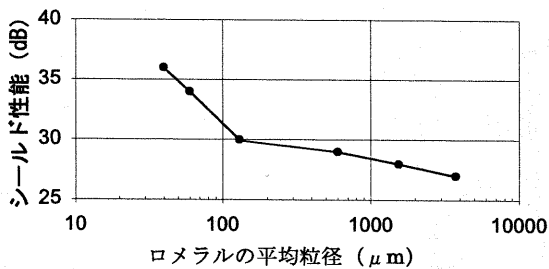


Fig.3 Relationship of Diameter and Shield Performance

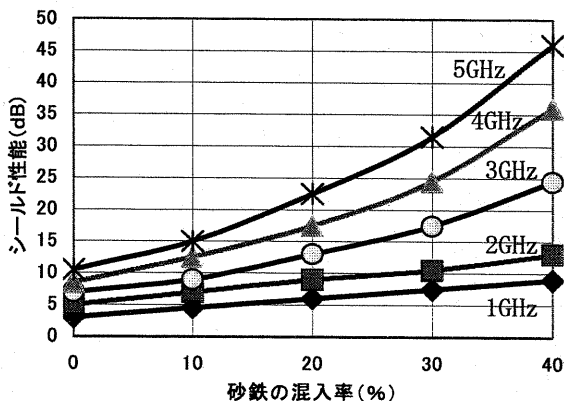


Fig.4 Relationship of Content and Shield Performance

5mm をさらに細かく分級したものを 20% 混入したモルタルを作製し、粒径とシールド性能の関係を調べた。試験体の厚さは 75mm であり、周波数 4GHz について同軸管法により測定した。

その結果、Fig.3 に示すように粒径が小さいほどシールド性能が良く、特に 100 μm (0.1mm) 以下で急激に良くなっていた。これは、粒径が小さいほど試験体中のロメラル粒子の一様性が良くなり、誘電率が増すためと考えられる。

4. 混入率の影響

次に砂鉄を使用して、その混入率 (質量比) とシールド性能の関係を調べた。ロメラルに比べ砂鉄の粒径は 0.033~0.3mm と幅が狭いが、粒径分布の影響を小さくするために、ふるいにより 0.106~0.15mm を選びモルタル試験体 (厚さ 50mm) を作製した。

その結果、Fig.4 に示すように混入率に比例してシールド性能が良くなっているが、特に 3~5GHz と周波数が高くなるにつれて混入率の増大に対するシールド性能の上昇が大きかった。

Ⅲ. コンクリートの電磁シールド性能

1. 試験体

このコンクリートがシールドの対象としているのは、PHS (1.9GHz)、IMT-2000 (1.9GHz, 2.1GHz)、無線 LAN (2.4GHz, 5.2GHz) などのテレコミュニケーション関連で使用されている電波であり、周波数は 2GHz 付近及びさらに高い帯域である。また、一般に要求されるシールド性能は、20~40dB である。

このコンクリートのシールド性能を把握するために、当面の狙いである周波数 2GHz 付近で性能の良いロメラルを用い、コンクリートパネルを作製した。パネルの大きさは、600mm×600mm×50mm である。

コンクリートの調合は水セメント比を 50% とし、Table 2 に示すようにロメラルの混入率をパラメータとした。ロメラルの粒径は 5mm 以下とし、ロメラルを混入した量だけ細骨材 (川砂) 量を減らし、全容積が同じとなるようにした。なお、川砂の比重が 2.6 であるのに対し、ロメラルは 4.6 である。混和剤には高性能 AE 減水剤 (SP-8S)、AE 調整剤 (775s) を使用した。

Table 2 Mixing Proportion

ロメラルの 混入率 (%)	(kg/m ³)				
	水	セメント	細骨材		粗骨材
			川砂	鉄鉱石	
16.2	185	370	623	400	889
25.2	185	370	481	650	889
33.5	185	370	339	900	889
45.3	185	370	113	1300	889

2. 電磁シールド性能

コンクリートパネルのシールド性能を挿入損失法で測定した。その結果、Fig.5 に示すようにシールド性能は周波数が高いほど、またロメラルの混入率が高いほど良かった。2GHz におけるシールド性能は 10~60dB であり、ロメラルの混入率の調整により要求仕様に応じたシールド性能が設計できる。

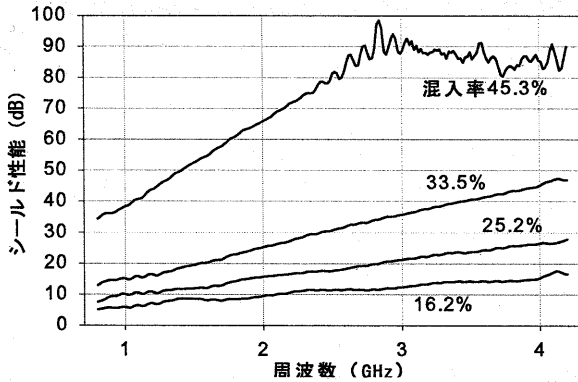


Fig. 5 Shield Performance of Romeral in Concrete

3. 接続部の影響

このようなコンクリートパネルを使用して例えばカーテンウォールのように並べてシールド壁を形成する場合、その接続部の隙間からの電波の漏洩が問題となる。そこでロメラルを 25% (650kg/m³) 混入した、Fig. 6 に示すようなパネル 1600mm×350mm×130mm を 2 枚作製し、隙間のシールド特性を調べた。

パネルとアンテナの距離を 1.5m として測定した結果、Fig. 7 に示すように垂直偏波の場合、隙間が大きくなるほどシールド性能が低下し、周波数が高くなるほど性能が低下する傾向にあった。なお、水平偏波はほとんどシールド性能は低下しなかった。

次にこの隙間 20mm に導電性材タイプ 1 及びタイプ 2 を詰め込んだ場合、Fig. 8 に示すようにシールド性能が改善され、導電性ガスケットのような材料により容易に隙間の漏れを防止できることが判明した。

IV. コンクリートの力学的特性及び耐久性

1. 力学的特性

ロメラルや砂鉄を混入したコンクリートは、その混入率が多いほどシールド性能がよくなるが、この場合の力学的特性及び耐久性を明らかにしておく必要がある。

実験条件を Table 3 に示す。粗骨材は普通骨材あるいは軽量骨材（メサライト）とし、これにロメラルあるいは砂鉄を混入した。ロメラルの粒径は 5mm 以下である。調合は、水セメント比は 50%一定とし、混和剤として高性能 AE 減水剤及び AE 調整剤を使用した。

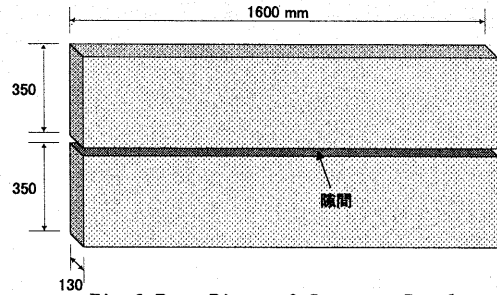


Fig. 6 Test Piece of Concrete Panels

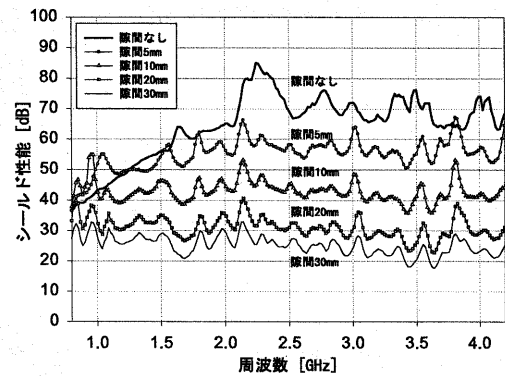


Fig. 7 Shield Performance of Clearance

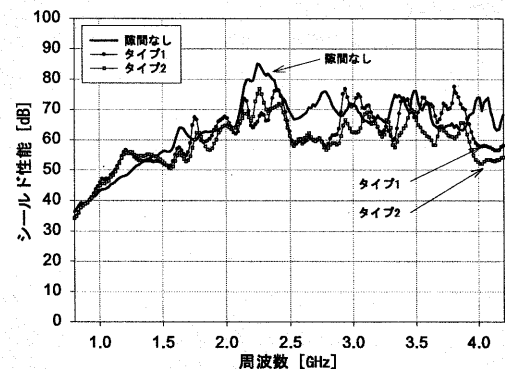


Fig. 8 Shield Performance of Gasket in Clearance

材齢 28 日における単位容積重量、圧縮強度等の測定結果を Table 3 に示す。

Table 3 Specific Weight and Compressive Strength

粗骨材 種類	鉄鉱石 種類	鉄鉱石 混入量 (kg/m ³)	鉄鉱石 混入率 (wt%)	単位容積 質量 (kg/m ³)	圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (×10 ⁴ N/mm ²)	ポアソン比 (-)
普通骨材	ロメラル	400	16	2489	43.8	2.98	0.19
		650	25	2582	43.1	3.09	0.20
		900	34	2703	44.4	3.19	0.19
		1300	45	2913	52.9	3.41	0.22
	砂鉄	650	25	2609	50.6	3.34	0.21
		900	34	2700	50.6	3.18	0.19
		1300	46	2903	48.4	3.40	0.19
人工軽量 骨材	ロメラル	650	29	2289	46.5	2.09	0.20
		900	38	2404	41.0	2.05	0.20
		1300	52	2579	42.1	2.22	0.22
	砂鉄	650	29	2242	42.4	2.05	0.19
		900	38	2404	38.5	2.13	0.21

(1) フレッシュ性状

コンクリートのフレッシュ性状は、ロメラルのスランブが 20cm 前後であり、1300kg/m³の混入量でも施工性に大きな問題となるような性状を示さなかった。

砂鉄は、混入量が 650kg/m³の場合のフレッシュ性状は良好であるが、900kg/m³、1300kg/m³と混入量を多くすると粘性が高くなり、施工性が悪くなった。これは砂鉄の粒径が 0.033~0.3mm と普通の細骨材よりも小さいためと考えられる。

(2) 単位容積重量

ロメラルあるいは砂鉄の混入量と単位容積質量の関係を Fig. 9 に示す。ロメラルあるいは砂鉄は人工軽量骨材を使用したものである。普通骨材を用いてロメラルあるいは砂鉄を 650kg/m³~1300kg/m³の割合で混入した場合、単位容積質量は約 2600~2900kg/m³と通常のコンクリート 2300kg/m³より重いコンクリートとなる。

ただし、人工軽量骨材を使用した場合、単位容積質量は約 2300~2600kg/m³であり、約 10%軽量となる。

(3) 圧縮強度

ロメラルあるいは砂鉄の混入量と一軸圧縮強度の関係を Fig. 9 に示す。ロメラル及び砂鉄の普通骨材を用いた場合の圧縮強度はおおよそ 40~50N/mm²であり、人工軽量骨材を用いた場合は若干小さい傾向があった。

(4) 弾性係数及びポアソン比

Table 3 に示すように、弾性係数は普通骨材を使用した場合が 2.98~3.41×10⁴N/mm²、軽量骨材を使用した場合が 2.05~2.22×10⁴N/mm²であり、ポアソン比はともに 0.19~0.22 であり RC 基準に示された 0.2 に概ね合っていた。

2. 耐久性

(1) 乾燥収縮試験

ロメラル 1300kg/m³あるいは砂鉄を 900kg/m³混入した試験体 (10cm×10cm×40cm) を 20℃、60%RH で養生を行い、長さ変化を測定した。その結果、材齢 9 か月の長さ変化が 640~820μm であり、JASS5 の 800μm 以下をおおよそ満足し、過大なひび割れを発生する可能性は小さいと考えられる。

(2) 鉄筋の腐食性試験

ロメラルを 1300 kg/m³混入したコンクリートに塩分 3 kg/m³混入した試験体 (単体) と普通コンクリートと打継ぎした試験体 (打継ぎ) について腐食面積を測定した。試験体の大きさは、10cm×10cm×40cm、鉄筋の直径は 13mm である。8 か月後の鉄筋の腐食面積を測定した結果を Fig. 10 に示す。

腐食試験の結果、単体に比べて普通コンクリートとの打継ぎをした場合に腐食面積が大きく、また軽量骨材より普通骨材を使用した場合にその傾向が強かった。

腐食面積の比率は最大 1.8%であったが、これは普通コンクリート単体の腐食面積の比率 6~16%に比べて小さな値であり、ロメラル (砂鉄も同様) を混入したコンクリートは、腐食に強いことが判明した。

(3) 促進中性化試験

試験体 (R-650N 及び R-325N) を 20℃、60%RH、二酸化炭素 5%の雰囲気中で養生を行い中性化深さを測定した。その結果、中性化深さは普通コンクリートと同程度であり、中性化抵抗値は普通コン

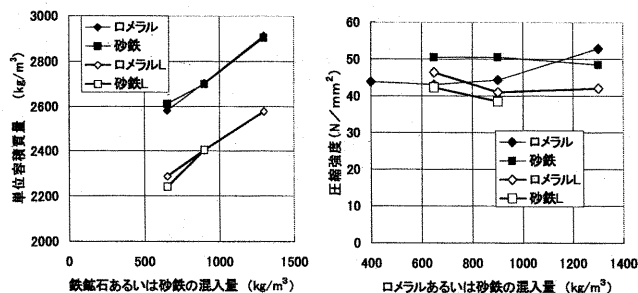


Fig. 9 Specific Weight and Compressive Strength

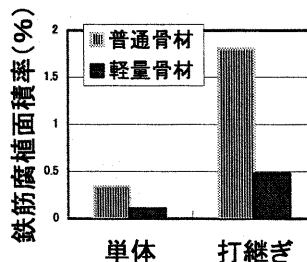


Fig. 10 Corrosion of Reinforcing Bar

コンクリートと同程度であることが判明した。

(4) 凍結融解試験

試験体 (R-650N 及び R-325N) を水に浸し、-18℃~+5℃まで繰り返し変化させ (1 サイクル: 3~4h)、相対弾性係数を測定した。その結果、300 サイクルにおける相対弾性係数が 90%以上であり、JASS5 で規定されている 60%以上を大きく上回っており、凍結融解作用による耐久性低下の問題はないと思われる。

V. おわりに

鉄鉱石を混入したコンクリートは、酸化鉄ダストを混入したものより電磁シールド性能は多少低いですが、施工性が良く、圧縮強度等は普通コンクリートと同等であり、また耐久性にも問題がないことが判明した。

砂鉄は周波数が 4GHz 以上の高い場合にロメラルよりシールド性能が良かったが、混入量が多い場合、コンクリートのフレッシュ性状が良くなかったため、混入率は 650kg/m³以下の小さい場合に適していた。

IT 関連で要求されるシールド性能は 20~40dB が多いが、今回の実験では厚さ 50mm のコンクリートパネルの 2GHz におけるシールド性能が 10~60dB であり、この結果から壁、床などの厚さが決まれば、鉄鉱石あるいは砂鉄の混入量の調整により、任意のシールド性能が設計できる。

以上、開発したコンクリートは、壁・床・天井を一体化して打設できるため、低コストな電磁シールドビルやルームが実現できる。また、PCa カーテンウォールへの適用もできるため、今後これらの適対象について実証実験を行う予定である。

参考文献

- 1) 横田依早弥, 平井淳一, 山木克則, 桜本文敏, 宮本克己; 電磁シールドコンクリートの開発 (その 1), 鹿島技術研究所年報, 第 49 号, (2001).
- 2) 山木克則, 桜本文敏; 電磁シールドコンクリートの開発, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (関東), (2001), pp. 1143-1144.