

電磁シールドコンクリートの開発(その1)

Performance of Concrete with an Electromagnetic Shield (Part1)

横田 依早弥 平井 淳一 山木 克則
桜本文 敏 宮本 克己

要 約

最近の建物内では事務所用 PHS や無線 LAN などの電波の利用が増加し、電磁シールドによる電波使用エリアの区分け、情報の漏洩防止など電磁環境の整備が必要となってきた。その具体的な方法として建物の電磁シールド施工があり、事例も増えてきているが、現状の電磁シールド構法は、躯体ができて上がった後、銅箔などの導電性材料で内装面にシールド層を形成するため高コストとなっている。

そこで、低コスト・短工期で建物全体あるいは部屋単位の電磁シールドを実現するために躯体自体に電磁シールド性能を持たせたコンクリートの開発を目的とし、研究を行っている。今回、製鉄所で発生する酸化鉄ダストをコンクリートに混入して誘電率を大きくしたもののについて、電磁シールドの基礎特性とともにコンクリートのひび割れの影響、建材としての施工性や力学特性、耐久性について調査した結果、実用性が大きいことが判明した。

目 次

- I. はじめに
- II. 電磁シールドコンクリートの基礎特性
- III. 床、壁モデルの電磁シールド性能
- IV. コンクリートの各種特性及び耐久性
- V. おわりに

I. はじめに

オフィス内では無線 LAN や携帯端末の利用のように、ワイヤレス化が急速に進んでいるが、このような電波の利用増大で問題となっているのが、隣接する部屋や上下階の部屋あるいは隣のビルと電波が競合し、事務所用 PHS が使えなくなったり、LAN のデータ伝送速度が極端に遅くなったりする通信障害である。

その解決策として電磁シールド技術があるが、従来の電磁シールド構法は、建物の内装面に銅箔などの導電性材料で電磁シールド層をつくり、シールド材の表面で電波を反射させることで効果を得る方法であるが、この方法は材料の接続部の処理方法が煩雑であり工期がかり、高コストであった。

そこで躯体自体に電磁シールド性能を持たせることができるコンクリートの研究開発に取り組んだ。コンクリートに混入する材料は低コストを実現するために製鉄所で回収される酸化鉄ダストを使用した。

対象とする電波は、PHS (1.9GHz)、IMT-2000 (1.9GHz, 2.1GHz) 無線 LAN (2.4GHz) などのテレコミュニケーション関連で使用されている周波数の高い電波であり、これらは、シールド層の小さな隙間からでも漏れが大きくなる傾向がある。そこで、電磁シールドコンクリートで、壁・床・天井を一体化して接続部に隙間のない電磁シールド層を形成しようとするものである。

II. 電磁シールドコンクリートの基礎特性

(1) 電磁シールドの原理

Fig.1 に示すように、コンクリートのような誘電性材料に電波が入射すると一部は反射し、一部はコンクリート中で吸収され、残りが透過する。電磁シールドコンクリートは主にこの吸収効果を狙ってシールド層を形成しようとするものである。

誘電性材料に進入した電波の吸収エネルギー P (W/m^2) は(1)式で与えられ、比誘電率の虚数部 ϵ''_r が大きいほど、また周波数 f が高いほど吸収エネルギー P は大きくなる。

$$P = \frac{1}{2} \omega \epsilon_0 \epsilon''_r |E|^2 \quad (1)$$

ただし、 $\omega = 2\pi f$ (1/s), ϵ_0 = 真空の誘電率 (F/m),
 ϵ''_r = 比誘電率の虚数部, E = 誘電体中の電界 (V/m)

しかし、普通コンクリートでは比誘電率の虚数部 ϵ''_r が小さく、これを大きくするために、コンクリートに導電性の粉体を混入する方法について検討した。

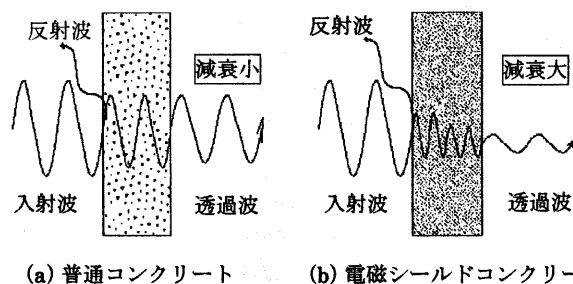


Fig.1 Reflection and Absorption of Radio Wave in Concrete

キーワード: 電波, 電磁シールド, 吸収, 酸化鉄, 製鉄所ダスト, コンクリート, 力学的特性, 安定性, 中性化, 腐食性, 無線 LAN,

(2) 酸化鉄ダスト

一般に誘電性材料の誘電率を大きくするために使用するものにカーボン粉末やカーボン繊維があるが、高価である。そこで、安価な製鉄所ダスト（酸化鉄が主成分）の利用を検討した。

酸化鉄ダストは、製鉄所の高炉等から発生したダストを集塵して回収されたものであり、その主な成分は、Table 1 に示すように、 Fe_3O_4 が 31%、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ が 22%、 FeO が 11% であり、この他に酸化されていない鉄 (M-Fe) やカーボン (C) が少量含まれる。このうち電波の吸収に寄与しているのは主に Fe_3O_4 である。

その粒径は $150\mu\text{m}$ 以下であり、 $25\sim 33\mu\text{m}$ が多い。これをコンクリートの細骨材の代わりに混入する。

Table 1 Ingredient and Particle Size of Iron Oxide Dust

成分	Fe_3O_4	$\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$	FeO	M-Fe	C
比率 (%)	31	22	11	2.3	1.3
粒径 (μm)	-17	17-25	25-33	33-75	75-150
比率 (%)	6	12	36	22	24

(3) 酸化鉄ダスト混入モルタルの誘電率

この酸化鉄ダストとセメントを同量混入したモルタルパネル ($500\text{mm}\times 500\text{mm}\times 30\text{mm}$) を製作し 1GHz における電波の反射減衰量及び透過減衰量を測定して比誘電率を求めた。その結果、Table 2 に示すように、普通モルタルに比べて酸化鉄ダストを混入したモルタルは比誘電率が実数部、虚数部ともに大きく、特に虚数部は $\epsilon''/\epsilon' = 25$ と普通モルタルの 10 倍以上であった。

Table 2 Dielectric Constant of Iron Oxide Dust Mixture Mortar

モルタル試験体名 (水セメント比 50%)	反射 減衰量 (dB)	透過 減衰量 (dB)	比誘電率	
			実数部	虚数部
普通モルタル (セメント:砂=1:1)	6.9	5.0	7	2
酸化鉄ダスト混入モルタル (セメント:ダスト=1:1)	3.5	18.0	26	25

Ⅲ. 床、壁モデルの電磁シールド性能

(1) 壁モデルの電磁シールド性能

酸化鉄ダストを混入した壁モデルのコンクリート試験体を製作した。Fig. 2 (a) に示すように、大きさは $1600\text{mm}\times 700\text{mm}\times 150\text{mm}$ であり、縦横筋を 2 段に配置している。コンクリートの調査は Table 3 に示すように、全体重量に対する酸化鉄ダストの混入率を 0%、16%、25%、34% とし、このダストの増量に応じて細骨材を減らした。

電磁シールド性能の測定は、Fig. 3 に示すように電磁シールド測定室の開閉部に試験体を設置し、室内側アンテナから送信した電波を室外アンテナで受信して行った。電磁シールド性能 S (dB) は、

$$S = 20 \log (E_i / E_t) \quad (2)$$

ただし E_i : 開口部に試験体を設置しない時の電界強度

E_t : 開口部に試験体を設置した時の電界強度

により求めた。

アンテナは、ダブルリジッドガイドアンテナ (1GHz~18GHz) を

使用し、電界強度はネットワークアナライザ (HP8719D 50MHz~13GHz) により測定した。測定した周波数帯は、0.2~4GHz である。

コンクリートの材齢 56 日における測定結果を Fig. 4 に示す。1GHz における性能は、普通コンクリートの場合が 10dB 程度であるのに対して酸化鉄ダスト混入コンクリートは混入率が 16% で 30dB、25% で 50dB、34% で 65dB であり、混入率に比例してシールド性能が良くなることが判った。また、周波数に比例してシールド性能が良くなることが確認できた。

Table 3 Mixing Proportions of Wall Model

酸化鉄 ダスト 濃度 (%)	水セメン ト比 W/C (%)	単位容積重量 (kg/m^3)					混和 剤 C×%
		水 W	セ メン ト C	細 骨 材	粗 骨 材	ダ ス ト	
0	45.8	170	371	810	956	0	0.5
16	45.8	183	399	470	1025	349	1.6
25	52.0	211	405	237	1045	650	2.4
34	58.0	239	415	0	1066	903	3.5

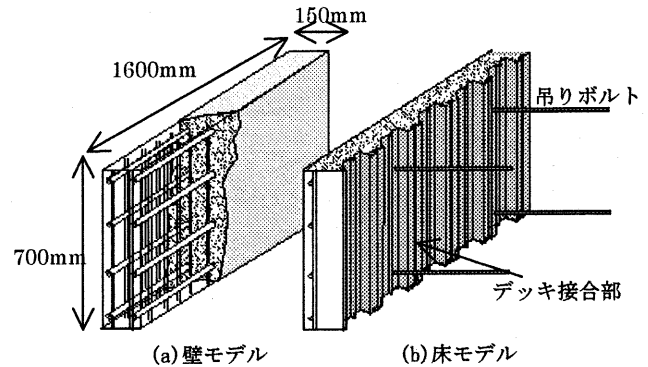


Fig. 2 Test Specimens

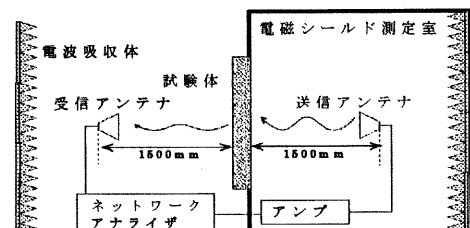


Fig. 3 Measurement Method of Shield Characteristics

(2) 床モデルの電磁シールド性能

Fig. 2 (b) の床モデルについてシールド性能を測定した。試験体の大きさは、壁モデルと同様に $1600\text{mm}\times 700\text{mm}\times 150\text{mm}$ であり、デッキプレートを使用している。調査は Table 3 に示す No. 3 の試験体と同じで、酸化鉄ダストの混入率は 25% である。

Fig. 5 にコンクリート打設前のデッキプレート単体と酸化鉄ダストを混入したコンクリート打設後のシールド性能を対比して示す。デッキプレート単体では、接合部からの電波の漏洩が大きく 20~30dB 程度のシールド性能であったのに対し、コンクリート打設後は測定周波数全域でほぼ 70dB 以上のシールド性能があった。

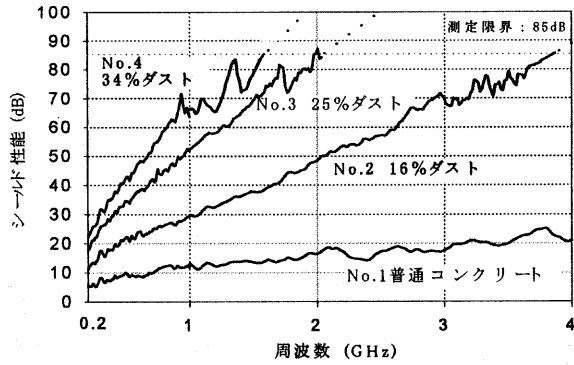


Fig. 4 Shield Characteristics of Wall Model

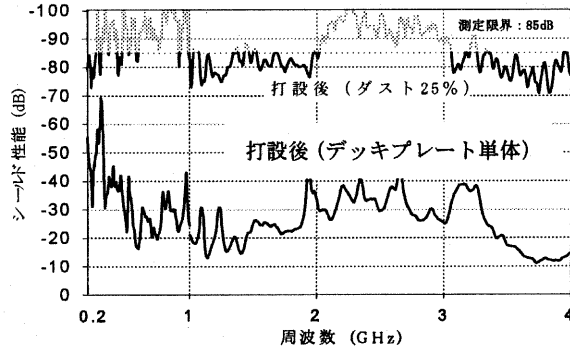


Fig. 5 Shield Characteristics of Bed Model

(3) コンクリートひび割れの影響

電磁シールドコンクリートのひび割れによる影響を調べるために、壁モデル No. 3 についてアムスラ加力試験機によりひび割れを生じさせた試験体について電磁シールド性能を測定した。

加力を徐々に大きくし試験体中央部の縦方向に4段階の曲げひび割れを発生させ、各々の段階における曲げ外面のひび割れ幅とシールド性能(水平偏波)を測定した。

その結果、Fig. 6 に示すように1回目 0.1mm, 2回目 0.2mm 及び3回目 0.5~0.7mm のひび割れではシールド性能が2~3dB の低下, 4回目 0.8mm~1.5mm のひび割れでは4~8dB の低下でいずれも影響は小さかった。

IV. コンクリートの各種特性及び耐久性

(1) フレッシュ性状及び力学的特性

前記シールド性能の試験結果から酸化鉄ダストの混入量とシールド性能との関係が明らかになった。しかし、酸化鉄ダストを混入したコンクリートは、酸化鉄ダストの粒径が細かいために、Table 3 に示すように、ダスト濃度が 25% の調合で単位水量は 211kg/m^3 と多くなる。単位水量が多いと乾燥収縮が大きくなり、ひび割れの発生する可能性が高い。これは建築部材のコンクリートとして適用を図るには望ましくない。

そこで、単位水量を少なく、施工性の良いコンクリートを得るために、混和剤の種類及び調合を条件とした実験を行うとともに、コンクリートの力学的性質について調べた。調合は Table 4 に示すように単位水量は JASS 5 の規定値である 185kg/m^3 に満足させることを原則として定めた。また、W/C50% を基本にして、3種類の高性能 AE 減水剤 (SSP104, 1200N, PNT907) を用いた。このう

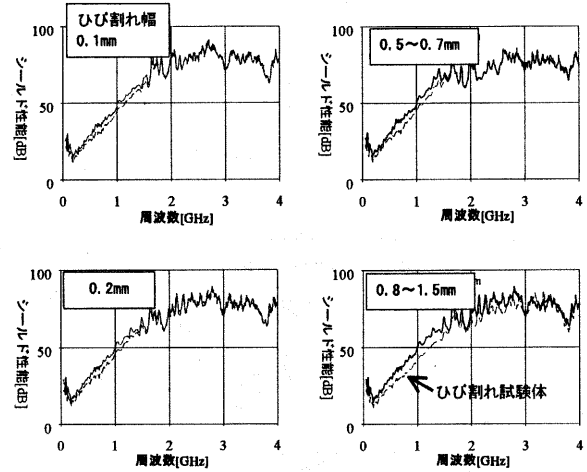


Fig. 6 Cracking of Concrete and a Shield Characteristic

Table 4 Mixing Proportions (the dust density 23.5%)

記号	W/C (%)	W/d (%)	単位量 (kg/m ³)						
			水 (W)	セメント (C)	ダスト (d)	シリカ (SF)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)	混和剤 (Adl)
SSP104-50	50.0	30.8	185	370	600	0	517	889	11.10
1200N-50	50.0	30.8	185	370	600	0	517	889	9.62
PNT907-50	50.0	30.8	185	370	600	0	517	889	10.36
907-60	60.0	30.8	185	308	600	0	567	889	8.62
907-SF	50.0	30.8	185	333	600	37	502	889	9.62
907-200	50.0	33.3	200	400	600	0	452	889	8.00

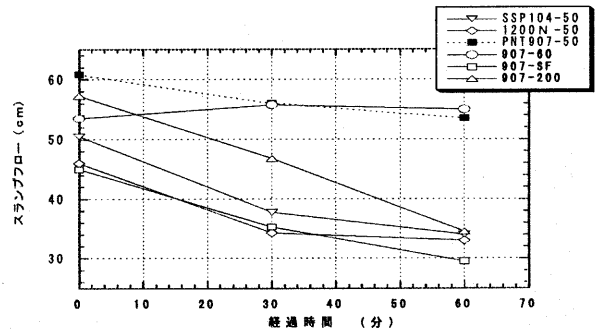


Fig. 7 Relationship between Progress Time and Slump Flow

ち PNT907 については、W/C を 60% にしたもの (907-60)、シリカフュームの (907-SF)、単位水量を 200kg/m^3 としたもの (907-200) についても試験した。

①フレッシュ性状

フレッシュ性状試験時の時間経過とスランプフローの関係は Fig. 7 に示す。上記 6 種類の調合のうち、PNT-907-50 と 907-60 は 60 分後のスランプフローが 50cm 以上であったが、それ以外はフローダウンが大きかったことが判った。

②圧縮強度

Fig. 8 に示すようにすべての調合で、材齢 1 日では強度発現がほとんど認められず、材齢 2 日で 10N/mm^2 前後の強度が発現している。これは高性能 AE 減水剤の過剰添加によるものと思われるが、所定のワーカビリティを確保するには必要な添加量であるため、凝結遅延は避けられない。しかし、材齢 7 日では、 $30\sim40\text{N/mm}^2$ 、材齢 28 日では $40\sim50\text{N/mm}^2$ と通常の建築物にとっては十分な強度発現を示している。

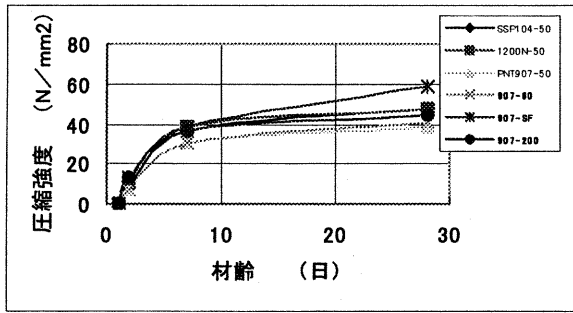


Fig. 8 Compressive Strength

③単位容積質量

酸化鉄ダストを 600kg/m^3 混入したコンクリートは、いずれの調査においても単位容積質量は概ね 2600kg/m^3 となり、通常の普通コンクリート (2300kg/m^3 程度) よりも重くなった。

(2) 耐久性

酸化鉄ダストは産業副産物であり、これを大量にコンクリートへ混入した場合の耐久性については、ほとんどデータがない。本コンクリートは二次部材ではなく、構造部材に適用することを意図しているため、実工事に適用するにはその耐久性について十分検討しておく必要がある。そこで酸化鉄ダストを用いたコンクリートの各種耐久性状の試験を行った。

各試験体の調査は、ダスト混入量 600kg/m^3 、 $W/C50\%$ を基本とし、混和剤として高性能A E減水剤 (PNT-907)、A E調整剤 (775S) を使用した。また、比較用の普通コンクリートにはA E減水剤 (NO.70) を使用した。Table 5 に調査を示す。

①安定性試験

酸化鉄ダストには2~3%の純鉄が含まれており、その酸化・膨張によりコンクリートに悪影響を及ぼすことが考えられる。そこで酸化鉄ダストを強制的に酸化させ、コンクリートの動弾性係数及び長さ変化(膨張)を測定した。強制酸化の方法としてはコンクリートに塩分を混入させる方法を用い、塩分量は塩化物イオン量として 1kg/m^3 と 3kg/m^3 とした。試験体 ($10\times10\times40\text{cm}$) は、材齢7日まで標準養生した後、 $40^\circ\text{C}\cdot90\%\text{RH}$ 以上で養生を行った。

一次共鳴振動数と材齢の関係を Fig. 9 に示す。一次共鳴振動数はD-3を除き材齢とともに大きくなっていき、それ以降は比較的安定した性状を示している。しかし、塩分混入量を 3kg/m^3 としたD-3の試験体は一次共鳴振動数が低下している。これは弾性係数の低下を示しており、酸化鉄中に少量含まれる純鉄の酸化・膨張がコンクリート組織の破壊を生じさせているためと推察された。目視でも材齢8か月以降で、幅 0.35mm のひび割れが観察された。

②鉄筋の腐食性試験

直径 13mm の磨き鉄筋を埋め込んだコンクリート試験体 ($10\text{cm}\times10\text{cm}\times40\text{cm}$) を、材齢7日まで標準養生とし、その後 40°C 、 $90\%\text{RH}$ 以上で養生を行い、材齢4か月、8か月、12か月以供試体を割裂して鉄筋を取り出し、鉄筋発錆状況(腐食面積率)を調べた。

その結果、ダストを混入させたコンクリートの鉄筋が、普通コンクリートの鉄筋に比べて腐食が遅く問題のないことが判った。

③乾燥収縮試験

JIS A 1129 「モルタル及びコンクリートの長さ変化試験方法」に基づき試験した結果、乾燥収縮率は、材齢6か月において約 720

Table 5 Mixing Proportions of Durability Examination

コンクリート 試験体	単位 (kg/m^3)					
	水 (W)	セメント (C)	ダスト (d)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)	塩分 (CL)
D-0	185	370	600	517	889	0
D-1	185	370	600	517	889	1.65
D-3	185	370	600	517	889	4.94
N-0	178	356	0	793	954	0
N-1	178	356	0	793	954	1.65
N-3	178	356	0	793	954	4.94

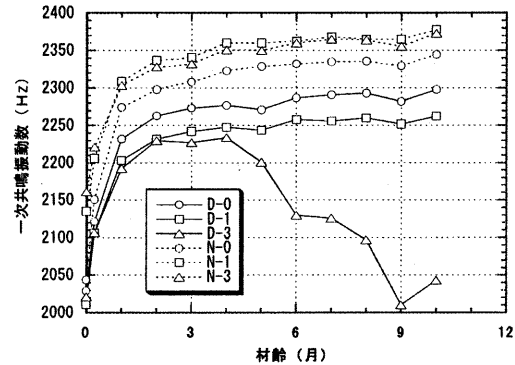


Fig. 9 First Resonance Number of Vibrations

μm であり、乾燥収縮による過大なひび割れが発生する可能性は小さいと判断された。

④促進中性化試験

日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造 設計施工指針 (案) 同解説」付1.コンクリートの促進中性化試験 (案) に基づき試験を行った結果、中性化深さは材齢6か月で約 6mm 進んでおり、一般に使われている普通コンクリートとほぼ同じであることが判った。

V. おわりに

製鉄所で回収された酸化鉄ダストを25%混入した電磁シールドコンクリートは、壁モデルでは 1GHz で 50dB 、 2.4GHz で 90dB 以上、床モデルではさらに高いシールド性能であることが判った。また、コンクリートに少々のひび割れが生じて、シールド性能にあまり影響を与えないことが確認できた。

コンクリートの力学特性では、高性能A E減水剤の添加量がやや多く必要なため、材齢初期に凝結遅延がみられたが、施工性を確保するためにはこれが条件となる。

耐久性試験についても全体的には一般のコンクリートと違いがなかったが、塩分を 3kg/m^3 混入させた試験体が膨張ひび割れを起し、材齢8か月以降で、目視にて幅 0.35mm 程度のひび割れが観察された。この結果から長期間の安定性については不安があり、当面の用途としては構造部材以外のコンクリートや電波吸収体等に適用して行く計画である。また、酸化鉄ダスト以外の低コストな構造部材に適した材料についても究明を続けて行く。