

論文 準マイクロ波帯のシールドボックス測定装置によるフレッシュコンクリートの単位水量の測定

河辺 伸二^{*1}・達木 亮平^{*2}・酒井 真也^{*3}

要旨: 準マイクロ波帯のシールドボックス測定装置によるフレッシュコンクリートの単位水量の測定に関して以下のことを行った。1)単位水量の異なる調合におけるフレッシュコンクリートの透過減衰量を測定し、単位水量と透過減衰量の関係を求めた。2)実際にフレッシュコンクリート製造工場で作られたフレッシュコンクリートの透過減衰量を測定し、単位水量と透過減衰量の関係を使い、単位水量を推定した。この結果、単位水量 177 kg/m³の試験体の透過減衰量から推定した単位水量は、調合の単位水量より 3 kg/m³大きかった。単位水量 170 kg/m³の試験体は 12 kg/m³、単位水量 180 kg/m³の試験体は 8kg/m³小さかった。

キーワード: 単位水量, 準マイクロ波, シールドボックス, 透過減衰量, フレッシュコンクリート

1. はじめに

フレッシュコンクリートの単位水量は、コンクリートの強度、作業性、耐久性などに大きく影響する。コンクリート製造工場や打設現場において、フレッシュコンクリートの単位水量の管理は非常に重要である。

既存のコンクリート中の単位水量の測定方法として、エアメータ法、高周波加熱乾燥法、静電容量法など様々な方法が考案され使用されている。しかし、あらかじめコンクリートの調合や骨材などの吸水率等のデータが必要である。また、高周波加熱乾燥法、静電容量法はコンクリート中からウェットスクリーニングしたモルタルを使用し測定を行うなど、測定誤差、測定に要する時間、測定方法の煩雑さなど問題点が残されている。

筆者らは従来から VHF 帯, UHF 帯, 準マイクロ波帯の電波による建築材料の反射減衰量や透過減衰量の測定を行い、建築材料の電波特性の研究^{1),2)}を行ってきた。準マイクロ波帯の電波は水により電波が反射、吸収される特性がある。水分量が変わると透過量も変化する。

筆者らは、準マイクロ波帯の電波の特性を利用し、フレッシュコンクリートの単位水量を推定する方法³⁾を考案した。そこで本研究は、(1)単位水量の異なる調合におけるフレッシュコンクリートの透過減衰量を測定し、単位水量と透過減衰量の関係を求めることと、(2)実際にフレッシュコンクリート製造工場で作られたフレッシュコンクリートの透過減衰量を測定し、先ほどの単位水量と透過減衰量の関係を使い、単位水量を推定することを目的とする。なお、本研究の範囲内で入手した骨材の透過減衰量の測定と、水のみ供試体の透過減衰量の測定を行う。

2. 測定概要⁴⁾

2.1 シールドボックス

シールドボックスは、建築材料を透過した電波を測定するために設計し作製した装置である。シールドボックスを図-1に示す。シールドボックスは受信アンテナを、

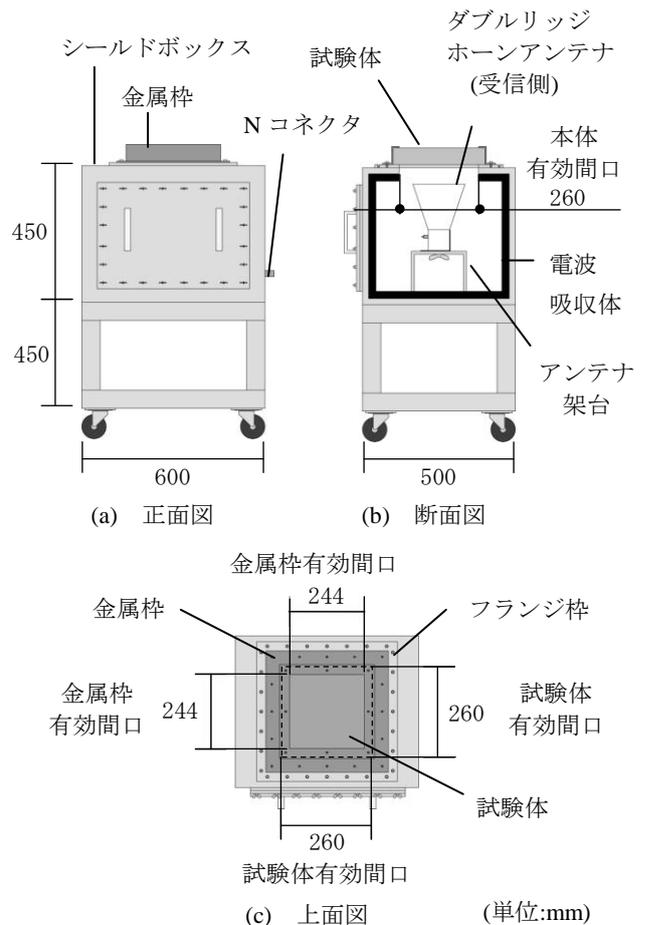


図-1 シールドボックスの概要 (単位:mm)

*1 名古屋工業大学大学院 教授 工博 (正会員)

*2 名古屋工業大学大学院 修士生

*3 名古屋工業大学 学部生

表-1 シールドボックスの仕様

全体外寸	W600×D500×H900mm	
本体外寸	W600×D500×H450mm	
総重量	約50kg(本体30kg,架台20kg)	
材質 仕上げ	本体	鋼板1.6mm厚 メッキ+塗装仕上げ
	架台	角型鋼管 50×50×2.3 mm メッキ+塗装仕上げ
開口部	上面	供試体設置用 寸法 244×244mm
	側面	アンテナ設置用及びメンテナンス用 寸法 420×270mm
対応周波数	1~18GHz	
対応アンテナ	ホーンアンテナ EMC03115	

表-2 測定機器の一覧

品名	形式	仕様	用途
ダブルリッジ ホーンアンテナ	EMC03115	0~ 18GHz	広帯域アンテナ
同軸ケーブル	SUCOFLEX 106	0~ 18GHz	アンテナ - ネット アンテナ間信号伝送
ネットワーク アナライザ	HP/8719D	50MHz~ 13.5GHz	電磁波測定及び 記録装置

鋼板のボックスと電波吸収体で覆い、ボックス上部にのみ開口部を設けている。電波はこの開口部の上部に設置する試験体からのみ透過する。外部からの電波は金属板で遮蔽し、内部の電波は電波吸収体で反射を防いでいる。表-1 にシールドボックスの仕様を示す。電波法により電波は自由に使用することが制約されている。しかし、2.45GHz の周波数帯は自由な使用が認められている。そこで本研究では、2.45GHz を含む 2.40~2.50GHz の周波数帯で透過減衰量の測定を行う。

2.2 測定装置

シールドボックス測定装置の概要を図-2 に、測定機器の一覧を表-2 に、電波暗室内のシールドボックス測定装置とネットワークアナライザを写真-2 に示す。2台のダブルリッジホーンアンテナを、同軸ケーブルを用いてネットワークアナライザに接続する。送信用のホーンアンテナは、受信用のホーンアンテナの真上に作製したアンテナ固定台を用いて設置する。2.45GHz の電波の波長が約 122 mm であり、アンテナ間距離を 2 波長以上離すため、本研究のアンテナ間距離は 300 mm に固定する。開口部の上部に試験体を設置し、この上を金属枠で固定する。写真-3 に試験体の固定の様子を示す。金属枠はねじ留めし、シールドボックスと金属枠を圧着すること

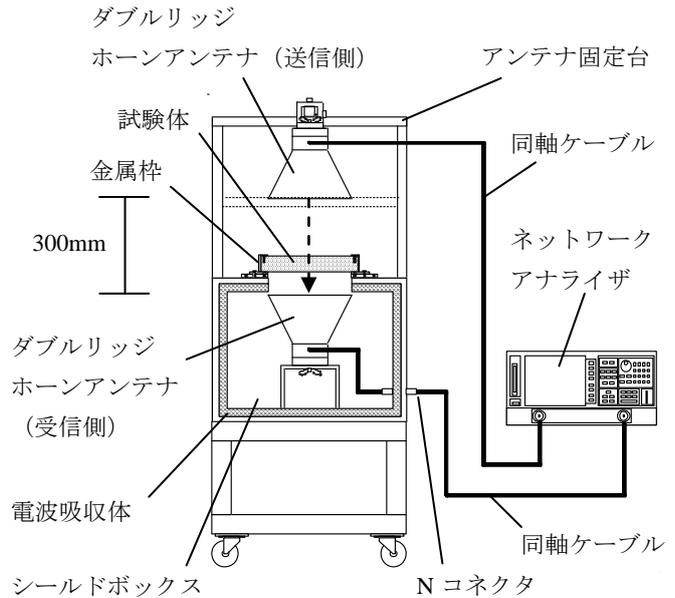


図-2 シールドボックス測定装置の概要



写真-2 電波暗室内の測定装置



写真-3 試験体の固定の様子

で、試験体とシールドボックスの微細な隙間を防ぎ、電波の入り込みを無くす。今回使用する周波数帯の 2.40~2.50GHz は電子レンジや無線 LAN に使用されている。単位水量と透過減衰量の関係を求める場合、送信アンテナから発信された電波以外の不要な外来波の影響を無くし測定精度を上げるため、電波暗室内で測定を行う。

2.3 透過減衰量

電波はシールドボックス外に設置する送信アンテナから発信され、シールドボックス内の受信アンテナで受ける仕組みになっている。開口部の上部に試験体を設置す

る場合と、試験体を設置しない場合に受信される電波の差から試験体を透過した電波を測定する。電波が試験体を透過する際に、試験体によって電波が吸収や反射することで減衰した電波の透過量の割合が透過減衰量である。

試験体を設置しない場合の電界強度レベル(dBμV)をL₁、試験体を設置する場合の電界強度レベル(dBμV)をL₂とすると、透過減衰量(dB)は式(1)で表すことができる。

$$\text{透過減衰量(dB)} = L_1 \text{ (dB}\mu\text{V)} - L_2 \text{ (dB}\mu\text{V)} \quad (1)$$

3. 実験方法

3.1 ネットワークアナライザの設定と型枠

ネットワークアナライザの出力を 5dBm, 周波数範囲を 2.40~2.50GHz, sweep time を 200ms, ポイント数を 201 とし、キャリブレーションキッドを用いて校正を行う。試験体の入っていない状態の塩化ビニル製型枠を金属枠で固定し校正を行う。キャリブレーションを行うことで、今回の測定で使用する塩化ビニル型枠、同軸ケーブルの影響をなくすることが可能となる。測定で用いる塩ビ型枠の内法寸法は 260×260×45mm である。フレッシュコンクリートの測定では、厚さが 40 mm となるようフレッシュコンクリートを流し込む。

3.2 骨材のみの透過減衰量の測定

フレッシュコンクリートの透過減衰量の測定に先立ち、骨材のみの透過減衰量の測定を行う。測定で使用する細骨材を表-3に、粗骨材を表-4に示す。津久見産は石灰石、岩瀬産は硬質砂岩の碎石砕砂である。

骨材の測定は、それぞれ 2kg の骨材を塩ビ型枠内に入れ透過減衰量の測定を行う。フレッシュコンクリートの単位水量の測定では、骨材を表乾状態にして練り混ぜを行う。骨材の測定でも同様に表乾状態にして測定を行う。

3.3 水のみ透過減衰量の測定

準マイクロ波の電波は、水により電波が反射、吸収され透過しにくくなる特性がある。そこでフレッシュコンクリートの透過減衰量の測定に先立ち、水のみ透過減衰量の測定を行う。

フレッシュコンクリートの試験体の寸法と同じ大きさの、260×260×40mm のメラミン製スポンジを用いる。スポンジのみでは透過減衰量は 0dB である。スポンジに水を 0~650g まで 50g ずつ含ませ透過減衰量の測定を行う。水を 50g 含ませるごとに 1 m³ に換算すると水分量は 18.5 kg 増加する。フレッシュコンクリートの単位水量 155, 165, 175, 185, 195 kg/m³ 分の水をスポンジに含ませた場合についても合わせて測定する。

3.4 フレッシュコンクリートの透過減衰量の測定

3.4.1 透過減衰量の測定方法

フレッシュコンクリートは練混ぜ後すぐに型枠に打設し、練混ぜ後 15 分から測定を開始し、練混ぜ後 120 分ま

表-3 細骨材

細骨材の種類	絶乾密度 (g/cm ³)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率(%)
大井川産陸砂	2.51	2.57	2.40
津久見産砕砂	2.63	2.66	1.14
岩瀬産砕砂	2.57	2.61	1.47
瀬戸産陸砂	2.51	2.55	1.74

表-4 粗骨材

粗骨材の種類	絶乾密度 (g/cm ³)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率(%)
小笠原産砂利	2.61	2.64	0.98
津久見産碎石	2.69	2.70	0.28
岩瀬産碎石	2.61	2.63	0.64
瀬戸産砂利	2.57	2.60	1.24

表-5 フレッシュコンクリートの調査
(単位水量と透過減衰量の関係用)

No.	W/C (%)	単位量(kg/m ³)				混和剤対セメント(%)
		W	C	S	G	
1	40	155	388	760	986	0.65
2	50		310	787	1022	
3	60		258	806	1045	
4	40	165	413	739	960	
5	50		330	769	998	
6	60		275	788	1023	
7	40	175	438	719	933	
8	50		350	750	974	
9	60		292	771	1001	
10	40	185	463	699	907	
11	50		370	732	950	
12	60		308	754	979	
13	40	195	488	679	881	
14	50		390	714	926	
15	60		325	737	956	

表-6 フレッシュコンクリートの調査
(単位水量の推定用, コンクリート製造工場)

No.	W/C (%)	単位量(kg/m ³)					混和剤対セメント(%)
		W	C	S1	S2	G	
16	57	170	299	785	-	993	1.0
17	53	177	334	788	-	944	1.0
18	67	180	269	686	180	920	1.0

で 5 分おきに測定を行う。型枠内にフレッシュコンクリートを厚さが 40mm になるよう流し込む。フレッシュコンクリート打設後、パイプレーターをかけた表面をこてでならす。

3.4.2 単位水量と透過減衰量の関係

単位水量の異なる調査におけるフレッシュコンクリートの透過減衰量を電波暗室で測定し、単位水量と透過減衰量の関係を求める。

フレッシュコンクリートの調査を表-5に示す。単位水量を 155, 165, 175, 185, 195 kg/m³ の 5 条件、水セメント比を 40, 50, 60% の 3 条件、計 15 条件で測定を行う。細骨材率は 44% とする。粗骨材の最大寸法は 25mm

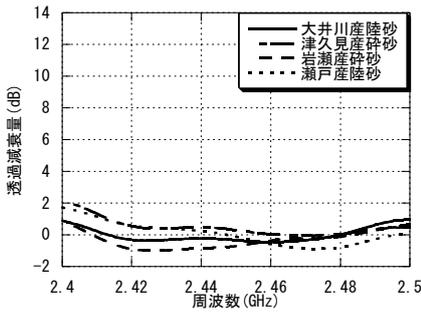


図-3 周波数と透過減衰量の関係
(細骨材)

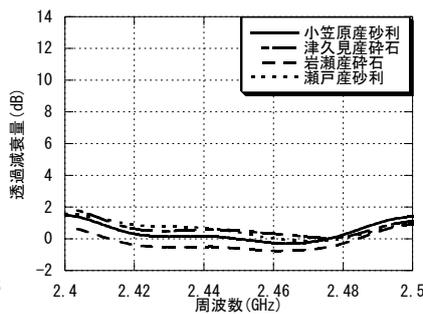


図-4 周波数と透過減衰量の関係
(粗骨材)

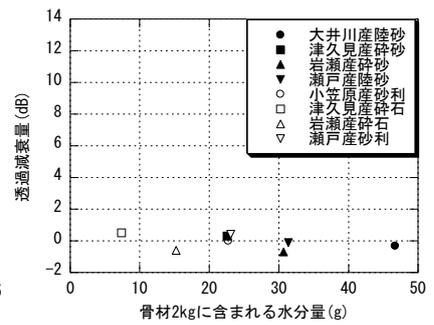


図-5 水分量と透過減衰量の関係
(骨材, 2.45GHz)

である。No.1～No.15 で使用する細骨材は瀬戸産陸砂、粗骨材は瀬戸産砂利である。混和剤は単位水量 175 kg/m³でスランプ 18cm となるようセメントの質量に対し 0.65%とする。他の単位水量ではスランプを考慮せず単位水量 175 kg/m³の場合と同様に混和剤をセメントの質量に対し 0.65%とした。なお、電波暗室内は室温 26±1℃、湿度 50±10%であった。

3.4.3 単位水量の推定

実際にフレッシュコンクリート製造工場で製造されたフレッシュコンクリートの透過減衰量を測定し、単位水量を推定する。

コンクリート製造工場のフレッシュコンクリートの調合を表-6に示す。細骨材1は瀬戸産陸砂、細骨材2は瀬戸産砕砂、粗骨材は瀬戸産砂利である。砕砂はワーカビリティ改善のため用いた。細骨材1の表乾密度は 2.54g/cm³、吸水率は 1.71%、細骨材2の表乾密度は 2.68g/cm³、吸水率は 1.18%である。粗骨材の表乾密度は 2.59g/cm³、吸水率は 1.14%である。表-3と表-4の瀬戸産と同じ産地であるが採取時期の違いにより値が異なった。なお、コンクリート製造工場内は室温 24±1℃であった。

4. 実験結果と考察

4.1 骨材のみの透過減衰量の測定結果

図-3に周波数と透過減衰量の関係(細骨材)を、図-4に周波数と透過減衰量の関係(粗骨材)を示す。グラフの形はどの細骨材や粗骨材に関係なく同様の傾向を示した。透過減衰量は骨材の違いにより若干の違いがみられた。本来、透過減衰量はマイナスの値にならない。しかし、一部の結果でマイナスの値となった。参考文献⁵⁾のシールド性能の測定値にも同様にマイナスの値があるが、詳細は今後の検討課題とする。

図-5に2.45GHzにおける骨材 2kgに含まれる水分量と透過減衰量の関係を示す。本研究の骨材中の水分量の範囲内では、透過減衰量は 1dB 以下となった。

4.2 水のみ透過減衰量の測定結果

図-6にスポンジ 1 m³に含まれる水分量と透過減衰量

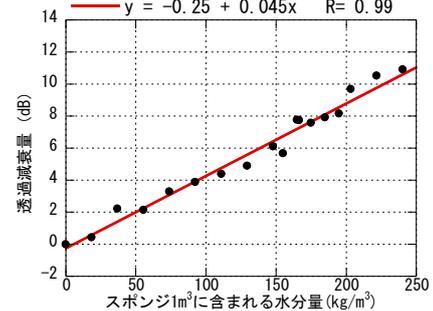


図-6 水分量と透過減衰量の関係(スポンジ, 2.45GHz)

の関係を示す。水分量が増えるにつれ透過減衰量も増加している。水分量と透過減衰量で回帰直線をとると、非常に相関が高いことがわかる。

4.3 フレッシュコンクリートの測定結果

4.3.1 単位水量と透過減衰量の関係

単位水量 155kg/m³のフレッシュコンクリートについて、図-7に周波数と透過減衰量の関係を、図-8に経過時間と透過減衰量の関係を示す。同様に、単位水量 165kg/m³のフレッシュコンクリートについて図-9と図-10に、単位水量 175kg/m³のフレッシュコンクリートについて図-11と図-12に、単位水量 185kg/m³のフレッシュコンクリートについて図-13と図-14に、単位水量 195kg/m³のフレッシュコンクリートについて図-15と図-16に関係を示す。

どの単位水量のフレッシュコンクリートも、周波数と透過減衰量の関係のグラフの形はほぼ変わらなかった。グラフの形が同じであるため、単位水量が異なる場合でもフレッシュコンクリートの電波特性はほぼ同じであると考えられる。

経過時間と透過減衰量の関係を見てみると、どの単位水量のフレッシュコンクリートのグラフも経過時間とともに透過減衰量が減少していることがわかる。

単位水量が少ないほど時間経過に伴う透過減衰量の減少量は多く、単位水量が多いほど減少量は少なくなっている。また、水セメント比の違いによって多少のばらつきが見られる。単位水量が一定の場合、シールドボックス測定装置を用いて水セメント比までを推定することは

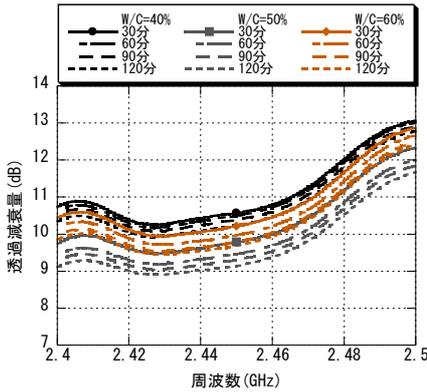


図-7 周波数と透過減衰量の関係
(単位水量 155kg/m³)

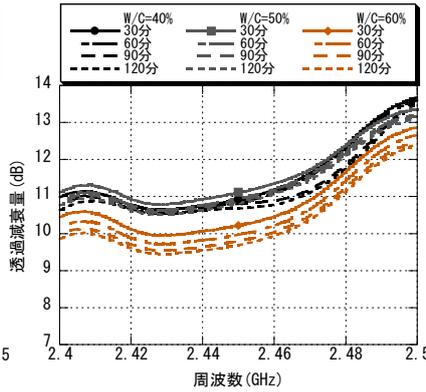


図-9 周波数と透過減衰量の関係
(単位水量 165kg/m³)

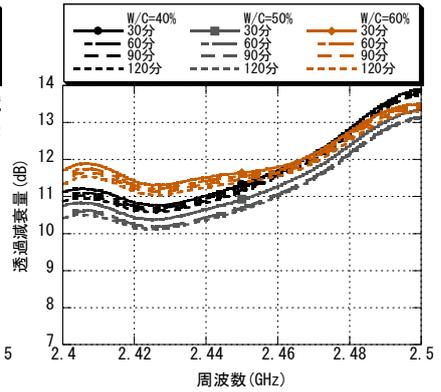


図-11 周波数と透過減衰量の関係
(単位水量 175kg/m³)

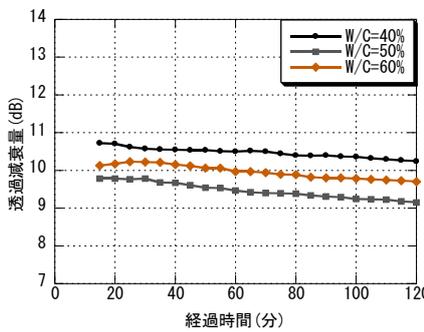


図-8 経過時間と透過減衰量の関係
(単位水量 155kg/m³, 2.45GHz)

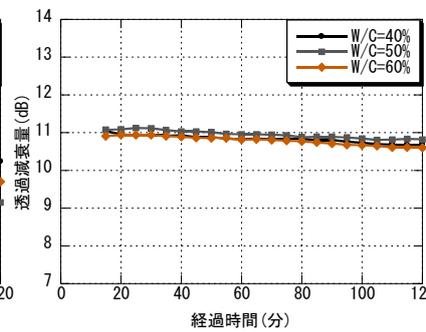


図-10 経過時間と透過減衰量の関係
(単位水量 165kg/m³, 2.45GHz)

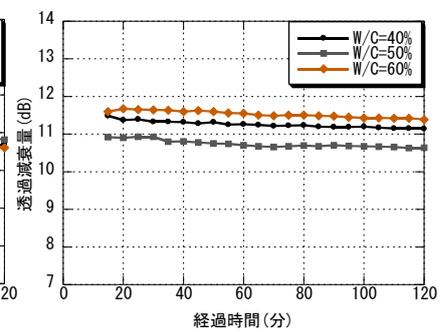


図-12 経過時間と透過減衰量の関係
(単位水量 175kg/m³, 2.45GHz)

今回の実験の範囲内において困難である。

図-17にNo.1~15の試験体の練り混ぜ後30分後の単位水量と透過減衰量の関係を示す。ここで、単位水量を $x(\text{kg/m}^3)$ 、透過減衰量(dB)を y とすると式(2)の関係を得た。

$$y = 6.0245 + 0.028623x \quad (155 \leq x \leq 195) \quad (2)$$

単位水量の増加とともに透過減衰量は直線的に増加していく傾向がある。また、スポンジに含んだ水の測定に比べ透過減衰量が多い。値のばらつきも水のものに比べ大きい。

4.3.2 単位水量の推定

図-18にコンクリート製造工場で測定を行ったフレッシュコンクリートの周波数と透過減衰量の関係(練り混ぜ後30分)を示す。グラフの形は、電波暗室内で測定した結果と同様の傾向を示した。単位水量 170 kg/m^3 のフレッシュコンクリートにおいて、 $2.40 \sim 2.46 \text{ GHz}$ で透過減衰量が低くなった。

フレッシュコンクリート製造工場で測定を行ったフレッシュコンクリートの透過減衰量の結果と、式(2)の単位水量と透過減衰量の関係から単位水量の推定を行った。フレッシュコンクリート製造工場の調合による単位水量と、図-18の透過減衰量と式(2)から推定した単位水量の比較を図-19に示す。

単位水量 177 kg/m^3 の試験体の透過減衰量から推定し

た単位水量は、調合の単位水量より 3 kg/m^3 大きかった。単位水量 170 kg/m^3 の試験体は 12 kg/m^3 、単位水量 180 kg/m^3 の試験体は 8 kg/m^3 小さかった。

5. まとめ

準マイクロ波帯の電波の特性を利用し、シールドボックス測定装置によるフレッシュコンクリートの単位水量の測定に関して以下のことを行った。

- 1) 単位水量の異なる調合におけるフレッシュコンクリートの透過減衰量を測定し、単位水量と透過減衰量の関係を求めた。
- 2) 実際にフレッシュコンクリート製造工場で製造されたフレッシュコンクリートの透過減衰量を測定し、単位水量と透過減衰量の関係を使い、単位水量を推定した。
- 3) 単位水量 177 kg/m^3 の試験体の透過減衰量から推定した単位水量は、調合の単位水量より 3 kg/m^3 大きかった。単位水量 170 kg/m^3 の試験体は 12 kg/m^3 、単位水量 180 kg/m^3 の試験体は 8 kg/m^3 小さかった。

今後は、単位水量の推定の精度向上のため、供試体の厚さの最適化、反射波の測定、複数の周波数帯の検討を行う。

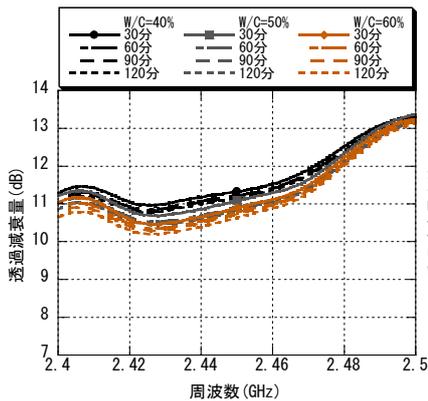


図-13 周波数と透過減衰量の関係
(単位水量 185kg/m³)

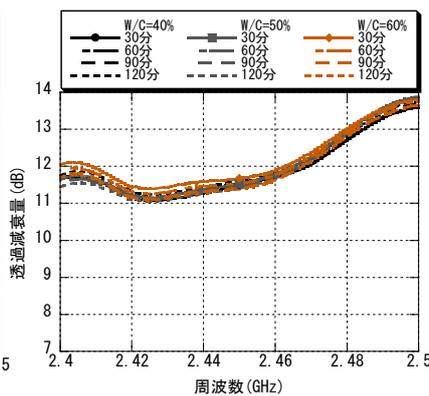


図-15 周波数と透過減衰量の関係
(単位水量 195kg/m³)

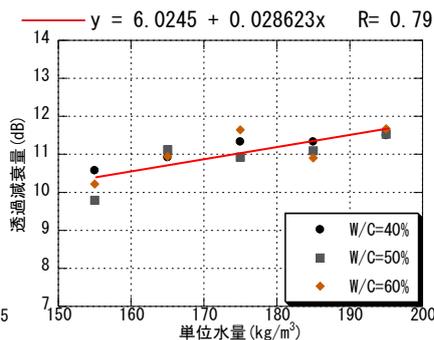


図-17 単位水量と透過減衰量の関係
(練混ぜ後 30分)

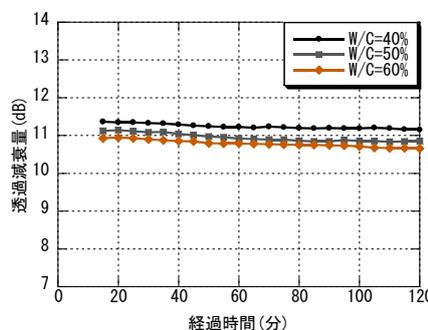


図-14 経過時間と透過減衰量の関係
(単位水量 185kg/m³, 2.45GHz)

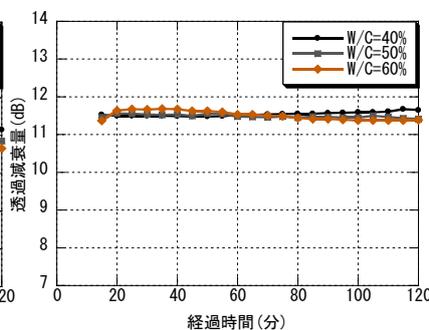


図-16 経過時間と透過減衰量の関係
(単位水量 195kg/m³, 2.45GHz)

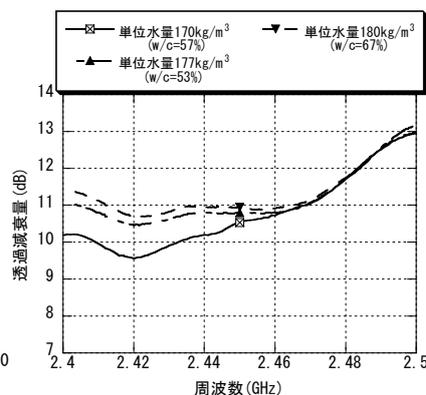


図-18 周波数と透過減衰量の関係
(コンクリート製造工場、
練混ぜ後 30分)

謝辞 本研究は名古屋工業大学名誉教授池田哲夫工学博士、日本シールドエンクロージャー、名東生コン、竹本油脂のご協力で行いました。本研究の一部は、科学研究費補助金(基盤研究(C)21510083)で行いました。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 池田哲夫, 河辺伸二, 岡島達雄: フェライト混入モルタルの TV 電波吸収特性に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.496, pp.17-22, 1997.6
- 2) 河辺伸二, 稲吉哲弥: 建築材料の平行二線線路による電波特性の研究, 日本建築学会構造系論文集, Vol.643, pp.1551-1557, 2009.9
- 3) 河辺伸二, 達木亮平, 西尾隆太郎: 準マイクロ波によるフレッシュコンクリートの単位水量の測定, コンクリート工学年次論文集, 33-1, pp.593-598, 2011.7
- 4) 清水康敬他: 電磁波の吸収と遮断, 日経技術図書(株), 1989.1

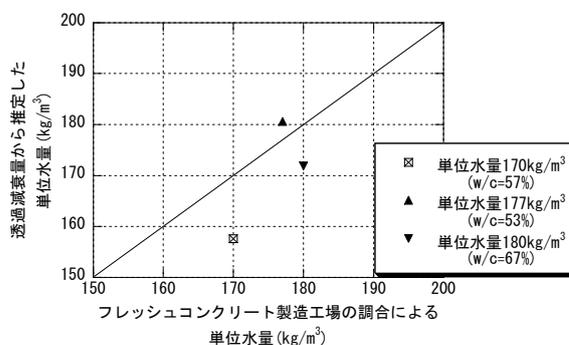


図-19 調査による単位水量と
透過減衰量から推定した単位水量の比較

- 5) 吉野涼二, 井上勝夫, 村田義明: 電磁シールド性能に対する開口寸法と受信距離の影響度に関する検討(窓状開口部の電波透過性状に関する実験的検討: その 2), 日本建築学会大会学術講演論文集(東北), pp.563-564, 2009.8