

論文 横波超音波の波動伝達関数解析によるコンクリートの物性評価

小山智幸*¹・松藤泰典*²・山口謙太郎*³・濱崎仁*⁴

要旨：本研究は、横波超音波の波動伝達関数解析によりフレッシュコンクリートから硬化コンクリートに至るまでの物性変化を連続的かつ統一的に評価する非破壊試験法を確立するための基礎的研究である。調合・養生・打ち継ぎ等の条件の異なるモルタル試験体を用いて検討を行い、他の非破壊試験法に比較して、本方法が妥当な値を示すことを示した。

キーワード：横波超音波，動的せん断弾性係数，動的せん断粘性係数，横波吸収係数

1. はじめに

コンクリートは練り混ぜ直後はセメントペースト，細骨材，粗骨材からなる多相材料であり，硬化に伴って物性変化を生じて一体化する。この過程が調合や建設現場の環境等によって異なるため，品質の不安定性が大きい。したがって，建設現場において打設されるコンクリートの物性変化を経時的に的確に把握することができれば，適切な処置を施す上で有用なことである。

本研究では，コンクリート中を伝播する横波超音波の波動伝達関数を解析することにより，フレッシュコンクリートから硬化コンクリートに至るまでの物性変化を，連続的かつ統一的に評価する非破壊試験法の確立を目的としている。本編ではその基礎的研究として，調合・養生・打ち継ぎ等の条件の異なるフレッシュモルタル試験体を用い，打設直後から硬化に至るまでの伝達関数の経時変化を測定した。これにより一般的な力学定数である，動的せん断弾性係数，及び動的せん断粘性係数を算定して他の測定方法との比較を行い，本方法の妥当性を検討した。

2. 実験概要

2.1 計測システム

図1に，本研究で用いた透過型の超音波計測システム概念図を示す。これにより入力波と試験体を透過した後の出力波を比較し，伝播時間や振幅比等の伝達関数を算定するが，採取される出力波のデータには計測システム内の試験体以外の部分を通る際に生じる時間遅れや振幅の減衰が含まれている。そこで，計測システム内の誤差を取り除き，かつ簡便に伝播速度 V 及び吸収係数 α を測定できる算定式を次節に示す様に定めた。

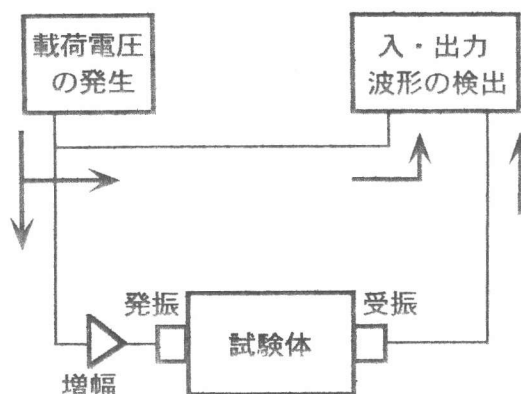


図1 超音波の計測システム

- * 1 九州大学講師 工学部建築学科，工修（正会員）
- * 2 九州大学教授 工学部建築学科，工博（正会員）
- * 3 九州大学大学院 工学研究科建築学専攻，工修（正会員）
- * 4 九州大学大学院 工学研究科建築学専攻

2.2 波動伝達関数及び動的せん断粘弾性係数の算定方法

本研究では超音波の波動伝達関数として伝播速度及び吸収係数を用い、これらを式(1)及び式(2)により算定した。また、粘弾性体中の横波の一次元的伝播においては波動の減衰は伝播距離に対してe関数で表されるため、動的せん断弾性係数 G' 及び動的せん断粘性係数 η' は、式(3)及び式(4)で求められる。

$$V_s = \frac{L}{t - \kappa t_0} \quad \dots(1) \quad \alpha = -\frac{1}{L} \left(\ln \frac{P_{out}}{P_{in}} - \psi \cdot \ln \frac{P_0}{P_{in}} \right) \quad \dots(2)$$

$$G' = \rho V_s^2 \frac{\omega^2(\omega^2 - \alpha^2 V_s^2)}{(\omega^2 + \alpha^2 V_s^2)^2} \quad \dots(3) \quad G'' = \rho V_s^2 \quad \dots(3)'$$

$$\eta' = \rho V_s^2 \frac{2\omega^2 \alpha V_s}{(\omega^2 + \alpha^2 V_s^2)^2} \quad \dots(4)$$

V_s : 横波伝播速度 α : 横波吸収係数 L : 試験体長さ

ρ : 媒体の密度 ω : 角振動数 ($= 2\pi f$)

t : 入出力波形の立ち上がり時刻差

t_0 : 振動子を直接突き合わせた場合の入出力波形の立ち上がり時刻差

P_{in} : 入力波の定常状態での振幅 P_{out} : 出力波の定常状態での振幅

P_0 : 振動子を直接突き合わせた場合の出力波の定常状態での振幅

式(1)、式(2)中の κ 及び ψ は試験体と振動子間の境界面の波動伝播に関する定数で、振動子に接する試験体表面の状態に応じて変化すると考えられる。ここでは、これまでの結果より、 $\kappa = 1$ 、 $\psi = 1$ とし、材令により変化しないものとした[1]。

2.3 試験体材料、調合及び測定条件

試験体の調合は、表1の通りとし、

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材として豊浦標準砂を用いたモルタル試験体とした。試験体に入力する超音波は、周波数が1kHz, 5kHz, 10kHz, 20kHz, 30kHz, 50kHz, 75kHz, 100kHz, 150kHz, 200kHz, 250kHz, 300kHzの計12種類の連続正弦波で、波動の継続時間を2msecとして以下に示す検討を行った。

a) 硬化モルタル試験体

表1に示すA～Eの硬化モルタル試験体について、①圧縮強度試験時に測定し

た応力-歪曲線の初期接線係数として求めた動弾性係数と载荷初期のポアソン比より算定した動的せん断弾性係数、②本方法を用いて算定した動的せん断弾性係数、及び③JIS A1127により共

表1 試験体の調合

試験体 シリーズ	セメント:水:細骨材 (重量比)	高性能AE減水剤 (x%)	フロー値	図中での 呼称
A	1:0.5:1.8	0	170	ﾌﾞﾚｰﾝ
B	1:0.5:1.8	0.8%	184	SP0.8%
C	1:0.5:1.8	1.2%	207	SP1.2%
D	1:0.5:1.5	0	191	S/C1.5
E	1:0.5:1.2	0	231	S/C1.2
F	1:0.5:1.8	0	159	ﾌﾞﾚｰﾝ30
G	1:0.5:1.8	0.8%	178	SP0.8%30
H	1:0.5:1.8	1.2%	214	SP1.2%30

振周波数から算定する動弾性係数と①で測定した載荷初期のポアソン比より算定した動的せん断弾性係数とを比較し、本方法の妥当性を検討した。試験体の形状は10φcm×20cmの円柱供試体で、打設後は20°C水中養生として材令28日で測定を行った。

b)フレッシュモルタル試験体

表1に示すA～C及びF～Hのフレッシュモルタルを、内径57mmφ、長さ5cmの亚克力パイプ製型枠に打設し、動的せん断弾性係数や動的せん断粘性係数の経時変化を測定した。測定間隔は打設後12時間までを30分間隔、以後24時間までを1時間間隔とし、養生温度は試験体A～Cでは20°C、F～Hは30°Cとしている。また、既往の物性評価法との比較のため、プロクター貫入抵抗試験 (ASTM C403-7T) により試験体の凝結性状を測定した。

c)打ち継ぎに関する実験

打ち継ぎ時間間隔の違いが打ち継ぎ面の性状に及ぼす影響に関して吸収係数の経時変化による評価を試みた。また打ち継ぎまでの養生条件の影響についても検討を行っている。表2に打ち継ぎ時間間隔、打ち継ぎまでの養生条件を示す。調査はいずれも、セメント：水：細骨材＝1：0.5：1.8のモルタルとし、養生温度は20°Cである。試料は高さ10cmの亚克力パイプに1層目が高さ5cmになるように打設し、所定の打ち継ぎ時間間隔を経過した後、残りの5cmを打設して測定を行った。

表2 打ち継ぎ時間間隔及び養生条件

打ち継ぎ時間間隔	打ち継ぎまでの養生条件	打ち継ぎ面	70-値
打ち継ぎなし	—	—	151
2時間	20°C気中養生 (放置)	湿潤	161
			159
4時間	20°C気中養生 (放置)	湿潤	152
			153
6時間	20°C気中養生 (放置)	湿潤	153
			150
4時間	20°C気中養生 (フリージング 氷を逐次除去)	乾燥	150
			147

3. 実験結果及び考察

3.1 硬化モルタル試験体

図2に式(1)～式(4)より求めた動的せん断弾性係数の周波数依存性を示す。同図では、先述のように応力-歪曲線から求めた実測値、及び共振周波数から算定した値との比較を行っている。

動的せん断弾性係数は100kHz以下の範囲では入力周波数が高くなるほど値が大きくなり、100kHz程度からほぼ一定値をとる。この様に本方法により算定される動的せん断弾性係数は低周期波数で周波数依存性を示すが、100kHz以上の周波数の超音波を用いることにより、先に示した式(3)で、即ち弾性体の理論式を用いて近似できることが分かる。

図3に、フレッシュモルタルから硬化モルタルに至るまでの動的せん断弾性係数の経時変化を

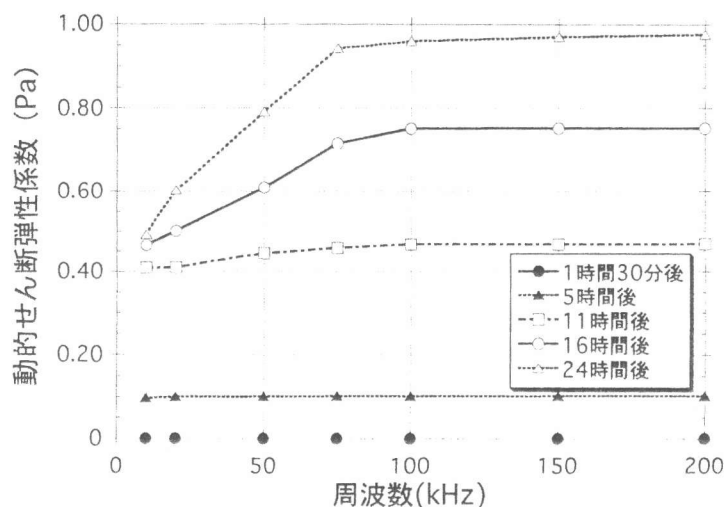


図2 動的せん断弾性係数の周波数依存性

示す。動的せん断弾性係数の周波数依存性は、打設直後は小さく水和水が進むにつれて大きくなること分かる。これに対して、図は省略しているが動的せん断粘性係数はいずれの材令においても周波数依存性が明瞭に見られた[1]。

図4は表1の調査A～Eの硬化モルタル試験体について、各測定法による動的せん断弾性係数を比較したものである。なお本方法により算定する際の測定周波数は、200kHzとしている。図より明らかな様に本方法により算定した値が実測値に近く、その誤差は大きいものでも5%程度となっている。

3.2 フルッシュモルタル試験体

図5、図6に高性能AE減水剤の添加量を変えた場合の動的せん断弾性係数、粘性係数の経時変化を示す。動的せん断弾性係数では、入力周波数を200kHzとし、動的せん断粘性係数に関しては、10kHzと200kHzの2種類とした場合の結果を示している。

図中の○印はプロクター貫入試験による凝結始発から終結までの時期を示している。高性能AE減水剤の添加量が多いほど凝結が遅延し、これに対応して動的せん断弾性係数及び粘性係数の増加も遅れていることが分かる。

動的せん断弾性係数のグラフ全体の形は、定性的に下に凸の増加、直線的な増加、上に凸の増加部分に分けられる。これらはそれぞれセメントの水和反応における、誘導期、加速期、減速期に相当するものと考えられる。動的せん断粘性係数の場合、10kHzでは上に凸、

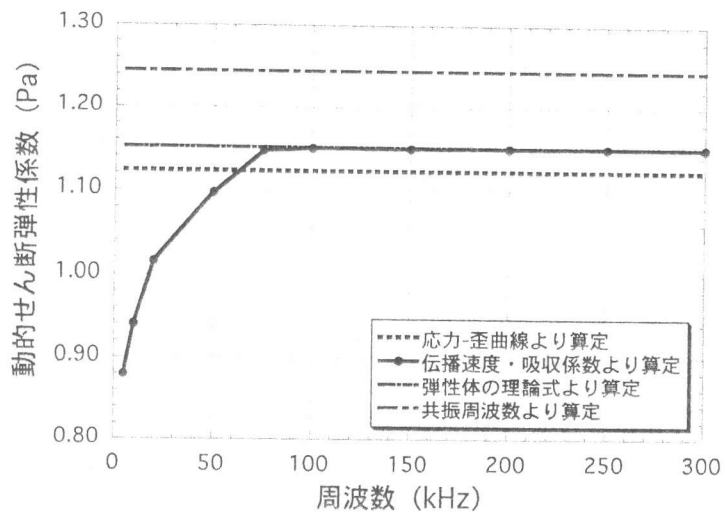


図3 動的せん断弾性係数の周波数依存性(経時変化)

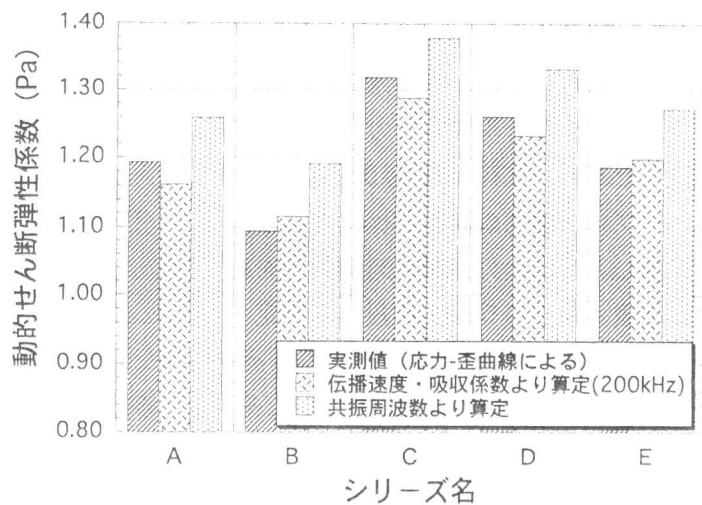


図4 各測定法による動的せん断弾性係数の比較

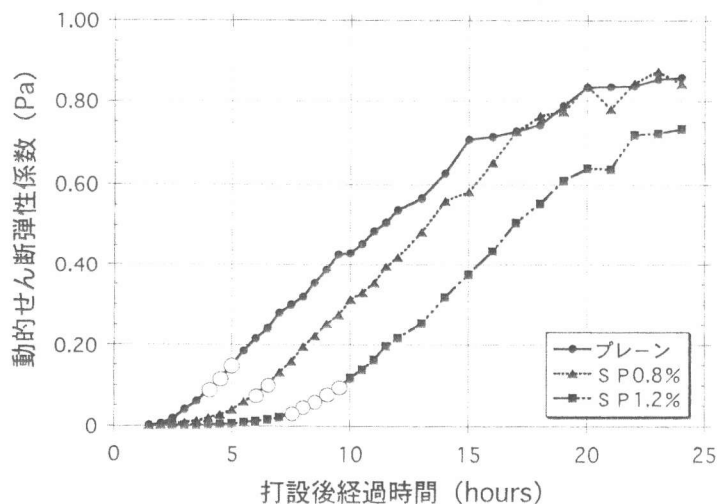


図5 高性能AE減水剤の影響(動的せん断弾性係数)

下に凸，上に凸の3つの曲線的な増加部分に分けられる．3段階の変曲点は動的せん断弾性係数に比べて早い時期に表れており，凝結初期の物性変化の把握に利用できるものと思われる．これに対して周波数の高い200kHzの場合，せん断歪み速度が大きいため試料中並びに試料と振動子間の振幅の減衰が大きくなるため，物性変化が著しい時期での変化が現れにくく，物性の変化を捉えにくい．

図7，図8に養生温度を変えた場合の動的せん断弾性係数，動的せん断粘性係数の経時変化を示す．動的せん断粘性係数に関しては，入力周波数を10kHzとした場合の結果を示している．

いずれの調合においても添加率が同じであれば養生温度の高い試験体の方が，動的せん断弾性係数，動的せん断粘性係数ともに早い時期に大きくなっており，グラフ全体の傾きも大きくなっている．また，高性能AE減水剤の添加率が動的せん断弾性係数や動的せん断粘性係数の経時変化に及ぼす影響は養生温度が低い場合の方が大きい．このことは高性能AE減水剤を用いる場合，低温になるほど凝結遅延の度合いが大きくなること[2]と対応していると考えられる．

3.3 打ち継ぎ試験体

図9に打ち継ぎ時間間隔の異なる場合の100kHzにおける横波吸収係数の経時変化を示す．打ち継ぎの影響は，横波吸収係数において最も顕著に見られた．

図の様子に打ち継ぎ時間間隔が6時間の試験体の場合，24時間後の

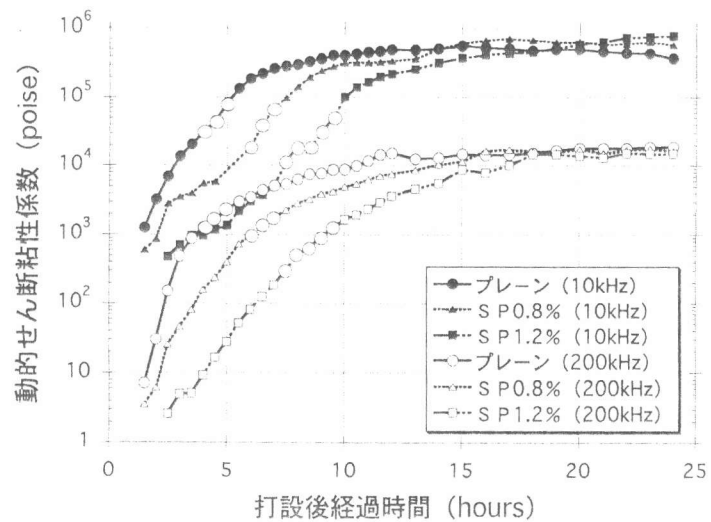


図6 高性能AE減水剤の影響(動的せん断粘性係数)

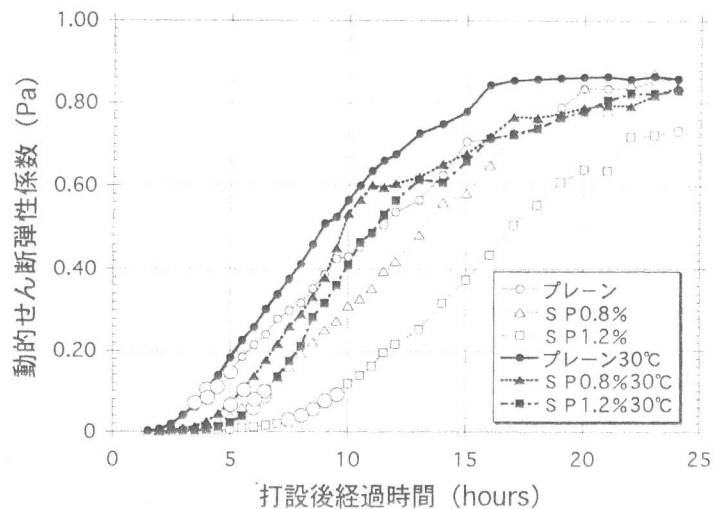


図7 養生温度の影響(動的せん断弾性係数)

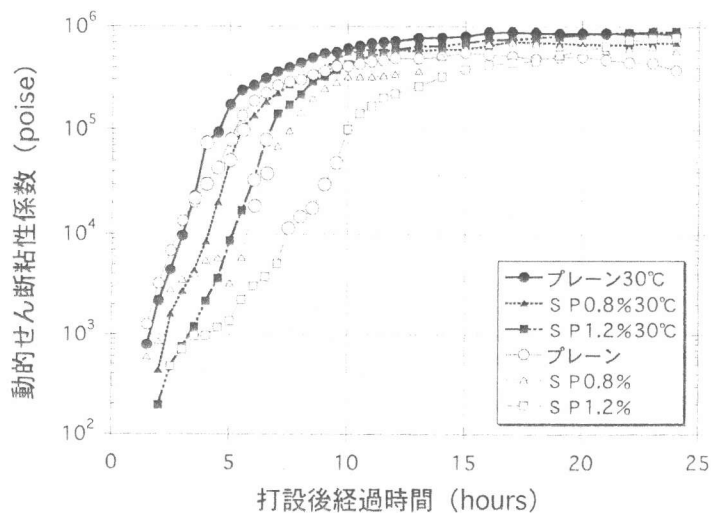


図8 養生温度の影響(動的せん断粘性係数)

値は他の試験体とは大きく異なり、吸収係数の低下に停滞が見られる。このことは、打ち継ぎ面付近において不連続な面が生じていることを示しており、コールドジョイント発生の可能性が高いと判断できる。

打ち継ぎ時間間隔は、JASS5では150分以内とされているが、4時間以内の場合、吸収係数の経時変化には大きな変化が見られない。これは、試験体がアクリルパイプ内で養生されるため、ブリージング水が漏れたり、蒸発することが少なく、保水養生が行われている状態となるためであると考えられる。

図10に打ち継ぎまでの養生条件の異なる試験体の100kHzにおける横波吸収係数を示す。打ち継ぎ面を乾燥させた場合、打ち継ぎ後6時間から12時間程度まで、吸収係数の低下の勾配が緩やかになる傾向が見られ、打ち継ぎ後の性状に悪影響を及ぼしているものと考えられる。

4. まとめ

- ①横波超音波の伝播速度及び吸収係数から算定される動的せん断弾性係数は、打設直後には周波数依存性が小さいが材令と共に次第に大きくなる。しかし100kHz以上の横波超音波を用いることにより、硬化モルタルの動的せん断弾性係数を精度良く求めることができる。
- ②本方法によって動的せん断弾性係数及び動的せん断粘性係数の経時変化を算定することにより、フレッシュモルタルの物性変化、凝結性状の把握などへの利用が可能である。
- ③打ち継ぎ時間間隔や養生条件が、打ち継ぎ境界面へ及ぼす悪影響は、横波吸収係数の経時変化が一定となる時の値、低下勾配の停滞によって判断が可能である。

<謝辞>本研究は文部省科学研究費(一般研究C, 課題番号:04650526)の助成を受けた。ここに謝意を表す。

<参考文献>[1] 松藤泰典ほか：超音波によるコンクリートの動的せん断粘弾性係数の評価に関する基礎的研究(その1 評価法の検討), 日本建築学会九州支部研究報告, pp.13-16, 1994.3

[2] 兎玉和巳：高強度化のための材料 -混和剤-, コンクリート工学, Vol.32, No.7, pp.23-27, 1994.7

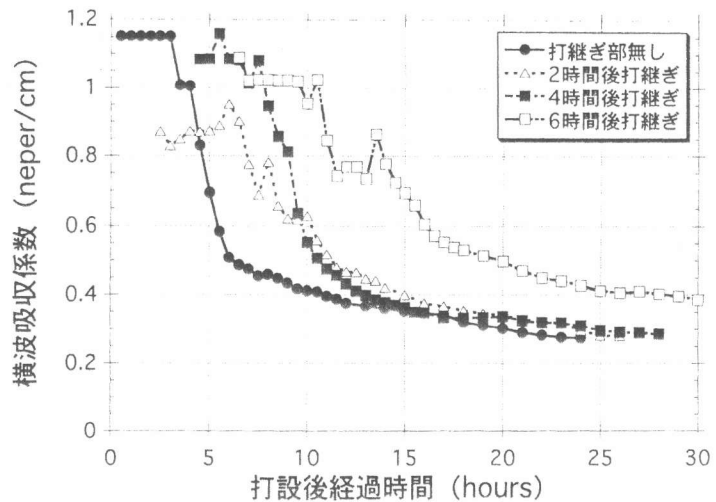


図9 打ち継ぎ時間間隔の影響(横波吸収係数100kHz)

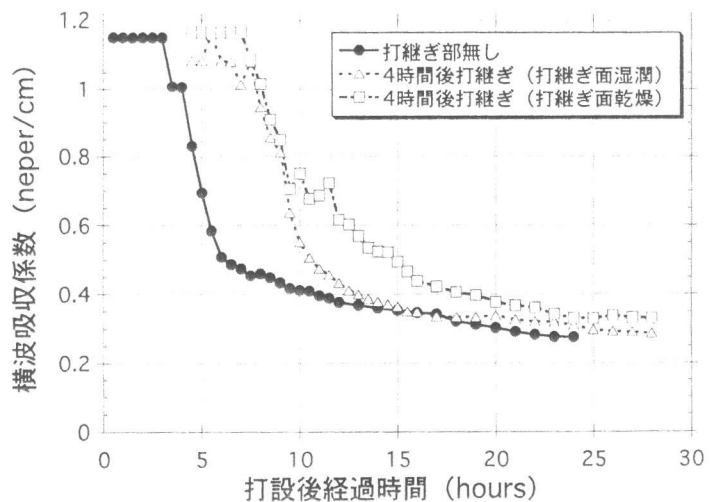


図10 打ち継ぎの養生条件の影響(横波吸収係数100kHz)