

## 論文 レーダ法によるコンクリート内部の空隙計測に関する基礎研究

朴 錫 均\*<sup>1</sup> ・ 魚 本 健 人\*<sup>2</sup> ・ 吉 沢 勝\*<sup>3</sup>

要旨：コンクリート層間材料が変化した場合のレーダ伝播特性および各種空隙からのレーダ応答特性をシミュレーション解析し実測値と比較検討した。シミュレーションと実測結果は比較的良好一致し、コンクリート内部に異質材料や大きな空洞等が存在する場合、シミュレーションによる事前解析は効果的であることが立証された。さらに、実測値の信号だけでは判別しにくい各種空隙の形態からの情報もシミュレーション結果を用いて推定すればある程度検出できる可能性も提示された。

キーワード：レーダ、コンクリート内部、空隙、シミュレーション

## 1. はじめに

レーダ法によるコンクリートの非破壊検査は適用部材に対する制約が少なく、測定も簡単であるので将来有望な技術として最近、関心が高まっている。しかし、コンクリート構造物に適用する場合には減衰が大きく、高周波数成分の使用が困難であるので分解能も悪くなり、境界面や異物質等からの雑信号と混合されるため、解析しにくい場合が多い。特に電気的性質の異なる非金属材料間の伝播特性、そして形の違う空隙の検出特性等を究明することはレーダの実用化のために非常に重要な課題であると考えられる。しかしながら今までコンクリートに関するこの分野の研究は初期段階でありまだ充分ではない実情である。そこで、現時点で効率的な検査計測を実施するためにはまず、できるだけ充分な事前情報、たとえば目標物または主材料の境界条件、幾何学的特性、電気的性質、地域的条件等を活用する必要がある。もちろん、このように多様な情報を事前に完全に把握するのはほとんど不可能であるので、その代わりにいろいろな条件を仮想的に作り、各条件でのレーダの伝播特性を検討するシミュレーション研究が切実に要望されている。本研究はこのような観点から、まず電気的性質の異なる層間材料をコンクリート中に挿入し、そのレーダ伝播特性をシミュレーション解析した。また、基本モデルを応用して形別各種空隙の検出特性についてもシミュレーション解析し、これらの結果を実際測定した結果と比較することにより、モデルの妥当性も検討した。

## 2. モデルの基本理論

## 2. 1 媒質中における電磁波レーダの伝播

ある媒質を伝播する電磁波が平面波として、均質な等方性（非分散性）の媒質を伝播すると仮定した時、電磁波信号の伝播に関する減衰定数 $\alpha$ は次式で表現できる。

$$\alpha = \omega \sqrt{\mu\epsilon/2} \sqrt{\sqrt{1 + (\sigma/\omega\epsilon)^2} - 1} \quad (1)$$

\*1 東京大学大学院 土木工学専攻（正会員）

\*2 東京大学教授 生産技術研究所、工博（正会員）

\*3（財）首都高速道路技術センター（正会員）

ここで、 $\epsilon = \epsilon_0 \epsilon_r$ 、 $\epsilon_0$ ：真空の誘電率、 $\epsilon_r$ ：媒質の誘電率、 $\mu = \mu_0 \mu_r$ 、 $\mu_0$ ：真空の透磁率、 $\mu_r$ ：媒質の透磁率、 $\sigma$ ：導電率、 $\omega$ ：角周波数を表わす。なお、コンクリート中または地中のような非金属性の低損失誘電体では $\mu_r = 1$ と仮定できるので  $\mu = \mu_0$ になる。

一方、表皮深さ (skin depth) の概念により、この深さの定義を電磁波が  $1/\alpha$  の深さに到達する時に信号強度が  $e^{-1}$  倍に減衰することであると仮定すると、一定強度の波が深さ  $D_i$  の低損失誘電体を通過する場合の減衰係数  $A_i$  は次のように表わされ、ある特定強度の信号だけが対象媒質を透過できることになる [1]。

$$A_i = 1 - D_i \alpha_i e^{-1} \quad (A_i > 0) \quad (\text{もし、} A_i \leq 0 \text{ の場合は完全に減衰され伝播しない}) \quad (2)$$

図1のような構造の場合、深さ  $D_i$  の各層を通過する波の強度  $I_i$  は次式で表わされる。

$$I_i = A_i R_i T_{i-1} \quad (3)$$

しかし、図2のように内部にある形の検出対象物がある場合は物体の表面から反射して戻る波の強度は物体からの接線と波のなす傾斜角  $\theta_{wj}$  により変わると考えられるのでこの影響を考慮すると、式(3)に表面傾斜影響係数 (減衰加重値)  $W_{\theta_{wj}}$  を加え補正した次式(4)が求められる。

$$I_i = W_{\theta_{wj}} A_i R_i T_{i-1} \quad (4)$$

ここで、反射係数  $R_i$  と透過係数  $T_i$  は、誘電率の異なる媒質間の境界面を波が入射する場合、次式(5)で与えられる。

$$R_i = \frac{\sqrt{\epsilon_i} - \sqrt{\epsilon_{i+1}}}{\sqrt{\epsilon_i} + \sqrt{\epsilon_{i+1}}}, \quad T_i = \frac{2\sqrt{\epsilon_{i+1}}}{\sqrt{\epsilon_i} + \sqrt{\epsilon_{i+1}}} \quad (5)$$

しかし、対象物体が鉄筋のように誘電率が  $\infty$  になる場合は上記式はそのまま適用することは無理であるから、ある限界値を仮定しなければならない。なお、鉄筋の直径変化 (mm単位変化) による影響はレーダ方程式で対象物の断面積項で考慮して計算することができるが、他の値に比べると無視できる。一方、位相速度  $V_p$  と群速度  $V_g$  は低損失

誘電体と高周波数帯では  $(\sigma/\omega\epsilon)^2 \ll 1$  と考えられるので、両式は式(6)となる [3]。なお、波長  $\lambda_g$  も同じ方式で表現でき、自由空間での波長  $\lambda_0$  の  $1/\sqrt{\epsilon_r}$  になる。但し、 $c$  は光の速度である。

$$V_p \approx V_g \approx \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}, \quad \lambda_g = v_g / f = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \quad (6)$$

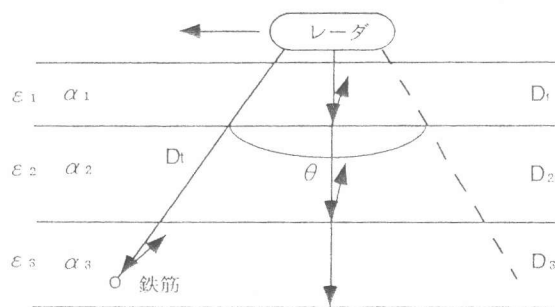


図1 多層構造でのレーダ反射伝播仮想図

## 2. 2 媒質中の水平分解能および伝播距離

媒質内での水平分解能 $R_h$ は、対象媒質を非減衰性媒質とし、使用アンテナを開口アンテナと仮定すると、アンテナ径 $W_d$ と目標物までの距離 $D_t$ との関係は次式のように表わせる（ビームが往復進行しているため、 $R_h$ は半分になっている）。

$$R_h = \frac{cD_t}{2\sqrt{\epsilon_r}fW_d}, \quad \theta = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}fW_d} \quad (7)$$

ここで、 $f$ は使用アンテナの中心周波数であり、アンテナから放射するパターンは線形分布と仮定した。なお、鉄筋等からの反射信号は図1で示したように、アンテナの進行とともにビーム幅 $\theta$ で広がる信号中で最も早く到達する波と仮定したが、各層の境界面のような長方形平面ではアンテナから直進する信号が一番早く到達すると仮定した。この場合、電気的性質の異なる各層を通過する際の電磁波の屈折は直進波以外に

は発生するが、鉄筋までは同じ性質の両材料（コンクリート）のため計算上結局同一入射角になって無視できる。しかし、図2のように検出対象物が電気的性質の異なる材料内にある場合には図3に示したような電磁波の屈折影響を考慮しなければならない。この影響はビーム幅がわかれば次式(8)のSnellの法則から求められる[8]。ここで、 $v_1$ 、 $v_2$ は各媒質の伝播速度である。

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (8)$$

したがって、目標物までの電磁波伝播距離も式(6)により変化するので補正しなければならない。

## 2. 3 畳み込み積分

解析対象のシステムを線形であると仮定すると、上記のモデルにより計算された結果は畳み込み積分を利用して出力信号として発生させられる。システムの入力 $x(t)$ とシステムに単位インパルスを加えた時の応答 $h(t)$ との畳み込み積分により表わせる[1][7]。

$$y(t) = \int_0^t x(t)h(t-\tau)d\tau \quad (9)$$

## 3. 実験概要

層間材料変化によるレーダ伝播特性を検討するための試験体の測定配置と規格を図4に示した。D10、16、22の三種類の鉄筋（ピッチ30cm）

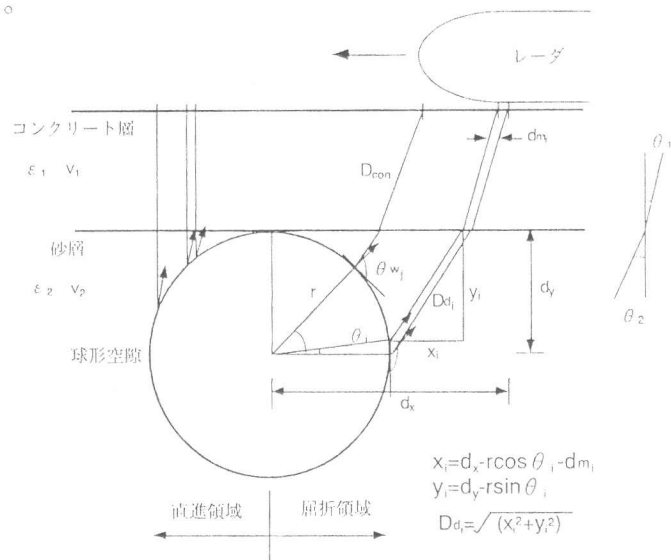


図2 空隙からのレーダ反射伝播仮想図

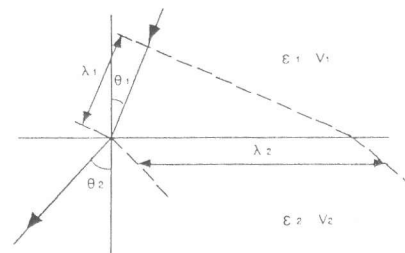


図3 電磁波の屈折と波長の関係

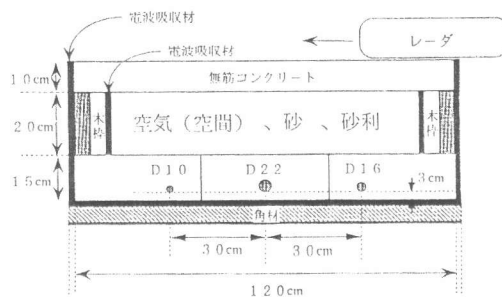


図4 試験体の構成断面（多層構造）

を目標物とし、コンクリート (w/c: 5.5%, slump: 5 cm, 最大骨材寸法: 20 mm, 含水率: 5.8%) だけの場合とそこに各々空気 (空間)、砂、砂利 (碎石) を挿入して各媒質変化によるレーダ測定を実施した。挿入材料の砂と碎石は水洗い等をしないコンクリート用原材料をそのまま使用し、含水率は各々 1.7% と 0.3% と測定された。なお、各種空隙の検出

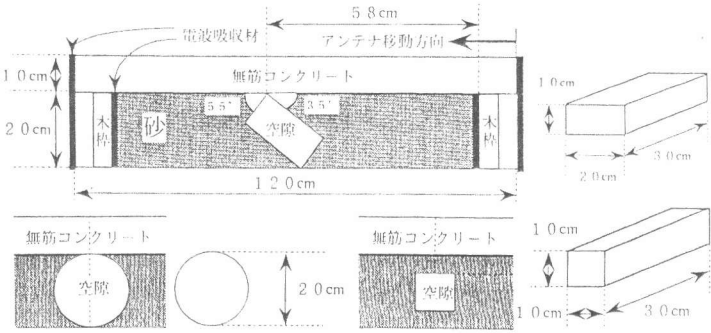


図5 試験体の構成断面 (空隙)

特性を検討するための試験体の測定配置と規格は図5のようである。球形空隙はゴムまりを用い、他の空隙は発泡スチロールで人工的に製作した。なお異質層内からの変化特性と空隙配置の用意性等を考慮しこれらを砂の中に入れて測定した。測定時、ふち等からのノイズをできるだけ抑えるために炭素と発泡性ウレタンで作られた電磁波吸収材を使用した。測定は地中探査レーダを使用した。この装置は3素子ダイポール、3モード動作のアンテナ方式を採用しており (方向検知可能)、20 MHz~1 GHzの広帯域周波数 (中心周波数約 760 MHz) の高分解能型である。

特性を検討するための試験体の測定配置と規格は図5のようである。球形空隙はゴムまりを用い、他の空隙は発泡スチロールで人工的に製作した。なお異質層内からの変化特性と空隙配置の用意性等を考慮しこれらを砂の中に入れて測定した。測定時、ふち等からのノイズをできるだけ抑えるために炭素と発泡性ウレタンで作られた電磁波吸収材を使用した。測定は地中探査レーダを使用した。この装置は3素子ダイポール、3モード動作のアンテナ方式を採用しており (方向検知可能)、20 MHz~1 GHzの広帯域周波数 (中心周波数約 760 MHz) の高分解能型である。

4. モデルの比較検討  
4. 1層間材料の変化によるレーダ伝播特性  
上記モデル理論により、層間材料の変化によるレーダシミュレーション結果と実測結果を比較検討

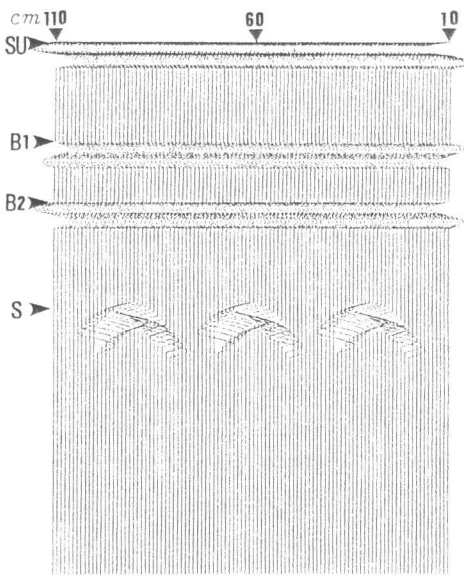


図6 空間挿入下のシミュレーション

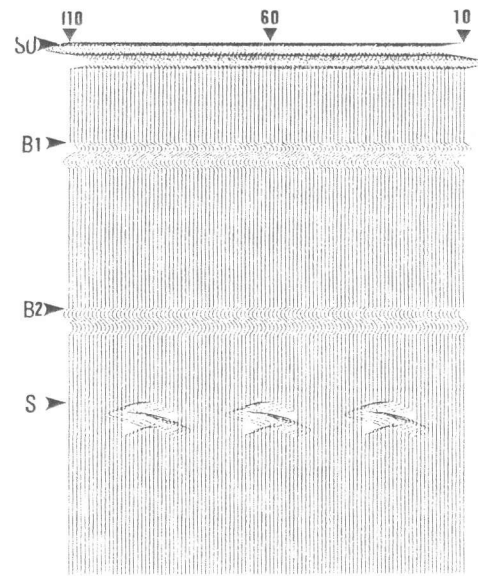


図7 碎石挿入下のシミュレーション

(SU:表面 B1:1層と2層の境界 B2:2層と3層の境界 S:鉄筋)

した。代表的な結果として層間挿入材料が空間の場合と碎石の場合を取り上げると、シミュレーション結果は図6、図7に、実測結果は図8、図9となる。シミュレーションでは信号の発生間隔を測定装置と同じく 1 cm (アンテナの移動距離) とした。まず、シミュレーション結果を見ると、鉄筋の分解能は図6と図7で各々 1.9 cm と 1.3 cm になり実測結果 (図8で約 2.0~2.3 cm) に近く、層間挿入材料が空間と碎石の場合は伝播速度が他の材料より速い (空間ではコンクリートの 3.5 倍、碎石の 2.2 倍) ことから波の反射距離は相対的に短くなる。また、各層から反射して戻る波の強度 (振幅) と位相等も各材料の電気的性質が変わるに従って変化することが示されている。しかし、図9の場合は鉄筋からの信号が認められなかったが、パラレルモード (境界検出) から3素子ダイポール3モード (鉄筋検出) に変換することで検出できた。これらの結果を解析モデルに対

して相対比較したのが表1であり、各層境界からの反射信号の到達時間による距離も28.4 cmまでの深さでは3.6 cm以下の精度で求められている。但し、相対値の発生はモデルで仮定した誘電率（コンクリート：12、碎石：5）と実際の材料の誘電率の違いが原因であると推定される。なお、実測信号での波のくずれ等と鉄筋からの反射信号の形が異なるのは実際の媒質は分散性が大きく（層間材料変化等）、アンテナ方式等使用装置の特性にも関係があると考えられる。

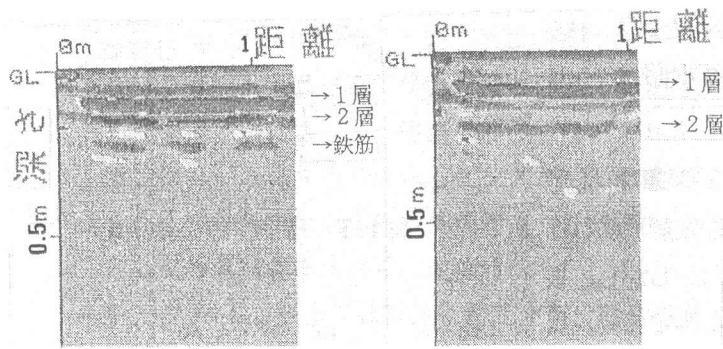


図8 空間挿入下の実測結果 図9 碎石挿入下の実測結果

表1 モデルと実測値の相対比較

測定対象	空間		
	モデル	実測	相対差
1層厚み	7.9cm	8.8cm	-0.9cm
2層厚み	4.7cm	4.4cm	+0.3cm
鉄筋深さ	20.5cm	22.0cm	-1.5cm

碎石		
モデル	実測*1	相対差
7.9cm	8.8cm	-0.9cm
13.1cm	12.0cm	+1.1cm
28.4cm	32.0cm	-3.6cm

\*1 3素子ダイポール3モードで実測した値による。

#### 4.2 空隙の検出

前の4.1節で適用したモデルを補完して形別空隙条件下のシミュレーション結果と実測結果を比較検討した。ここでは空隙検出信号だけの相対比較のため、ほかの信号は無視した。測定データも空隙等で表れる特定信号変化が検出された画像（3素子ダイポール3モード）を利用した。図10から図12に各場合のシミュレーション結果を示した。なお、より正確な比較のため各空隙からの信号（画像）中で輪郭線（エッジ）だけのデータを取り上げ両方の比較対象にした（誘電率はできるだけ実測値に近く仮定した）。

これらの比較結果を図13から図15に示した。図13の球形空隙の場合はモデルと実測結果がほとんど一致しているが図14及び図15の場合は多少ずれた部分も現れた。この原因については、まず測定装置の周波数帯による波長（アンテナの大きさ）の影響、すなわち波長が長い場合はそれより小さい形状の変化は無視してしまう可能性、矩形かどでの波の散乱、対象空隙を透過した信号の影響、それにアンテナ方式等測定装置の特性による影響が考えられる。また実測値がもっと長く現れた主な理由は実際のアンテナのビーム幅がもっと広がったためであると考えられる。しかし、モデルと実測データは両方とも比較的似ている傾向を示していることが分かる。さらに、実測結果では各条件下の信号がほとんど類似なパターンとなり判別しにくかったが、シミュレーション結果と比較解析すれば効果的な検出ができるともいえる。

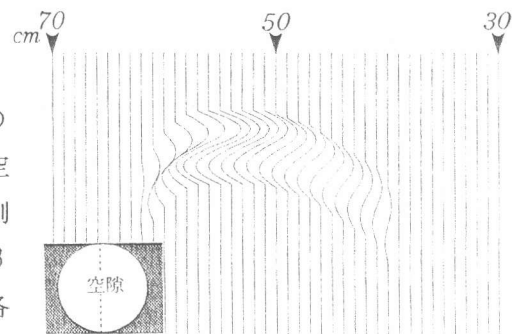


図10 球形空隙シミュレーション

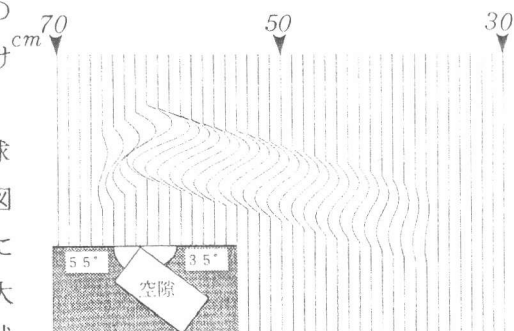


図11 傾斜空隙シミュレーション

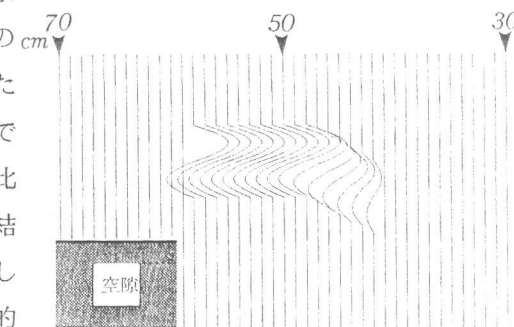


図12 矩形空隙シミュレーション

## 5. まとめ

本研究から得られた主な結果をまとめると次のようになる。

(1) 全般的にはシミュレーション結果と測定結果は比較的よく一致した。しかし、コンクリート内部に異質材料が存在したり大きな空洞等ができていない場合のレーダ検査では、実際の構造および断面とは異なる出力結果が得られる場合が存在するためシミュレーションによる事前解析が重要である。

(2) 実測値の信号だけでは区分しにくい各種空隙の形態からの情報もシミュレーション結果により推定解析すれば効果的に検出できる可能性が明らかとなった。しかし、根本的な解決のためには検出対象物に適合する測定装置（周波数の考慮=アンテナの大きさ選択）、特にコンクリート内部探査専用のレーダの開発等が必要であり、それに従うモデルの最適化も必要であると考えられる。

(3) 種々の仮定に基づいたモデルではあるものの、本シミュレーション技法を活用すれば、既知の最小の情報から探したい目標物を検出する場合や、蓄積された資料から未知のデータを解析する場合に役に立つと考えられる。

[謝辞] 本研究にあたり、御協力を頂きました芝浦工業大学の齊藤啓子さんおよび東大生研魚本研究室の技術官の西村次男氏に感謝致します。

### 参考文献

- 1) N.McCAVITT, M.C.FORDE : The Application of Convolution to The Simulation of The Response of Masonry Arch Bridges To Ground Proving Radar, Nondestr.Test.Eval., Vol.6, pp.179-194, 1991
- 2) 魚本健人ほか著：コンクリート構造物の非破壊検査、森北出版、1993
- 3) 山下栄吉編著：応用電磁波工学（第10章）、近代科学社、1992
- 4) 関根松夫著：レーダ信号処理技術、電子情報通信学会編、1993
- 5) 村沢観治ほか：3アンテナ素子を有する地中埋設物探査レーダ、三井造船技報 第152号、pp.18-24
- 6) 木村憲明ほか：電磁波によるトンネル覆工厚と空洞検査技術の開発、三井造船技報 第141号、pp.11-18
- 7) 佐藤幸男著：信号処理入門、オーム社、1992
- 8) 後藤尚久著：電磁波とはなにか、講談社、1993

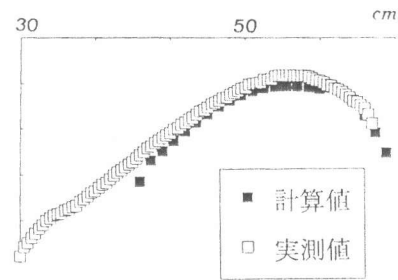


図 1 3 球形空隙の結果比較

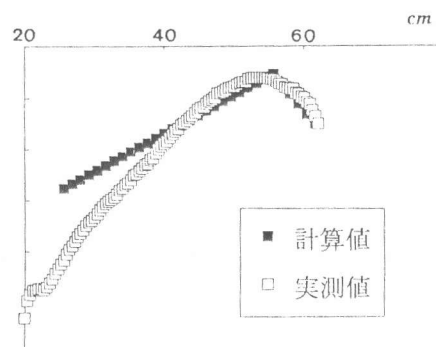


図 1 4 傾斜空隙の結果比較

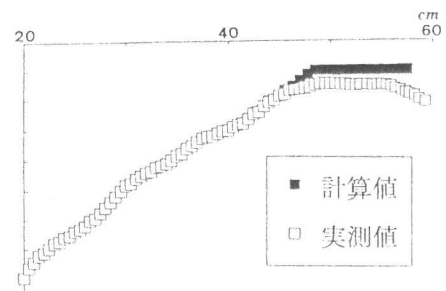


図 1 5 矩形空隙の結果比較