

論文 コンクリート構造物に用いる光学式ひび割れ幅測定器の開発と性能評価

田村 雅紀^{*1}・近藤 照夫^{*2}・茨田 匠^{*3}・長谷川 拓哉^{*4}

要旨：コンクリート構造躯体における簡便なひび割れ幅の測定には，一般にクラックスケールが用いられる。本研究は，光学的原理によりひび割れ幅を自動で測定することができる携帯型ひび割れ幅測定器を用いて，一般建材ならびに実構造物におけるひび割れ幅をクラックスケールとともに測定し，その基礎的な性能を検証した。その結果，測定物の材質，色調，表面状態ならびに測定者の習熟性等に関する影響や適用範囲が明らかになり，クラックスケールの代替可能性や，構造躯体の非破壊による簡易劣化度診断技術に関連づけられる可能性が示された。

キーワード：光学原理，ひび割れ測定，非破壊劣化度診断，建設材料，コンクリート構造物

1. はじめに

人工物における劣化度診断の歴史は，熱電力供給に関わるプラント系設備，航空機などの輸送系設備での取り組みにその起源を置いており¹⁾，国内では，1952年に非破壊検査研究会が発足し，その後発展を続けながら現在に至っている。近年では，建設物においても劣化度診断の意義が高く認識されつつあり，放射線透過法，超音波探傷法，磁気探傷法，渦流探傷法，ひずみ測定法などを測定原理とした各種手法の適用が検討されている。コンクリート構造物に関しては，外壁面の目視観察による簡便な劣化度評価要因として，ひび割れ個数とひび割れ幅の計測が挙げられる。このひび割れ幅の測定は，ひずみ測定法に分類される劣化度診断技術であり，躯体表面の劣化度に直接影響する要因と考えられるため，特定部位のひび割れ個数とその幅を簡便に定量化し，部材劣化度として評価する意義は大きいと考えられる。

本測定器は，このような劣化度診断の基礎的条件を備えた光学原理によりひび割れ幅を極めて短時間で定量化する携帯型のひび割れ幅測定器である。本研究は，当該測定器の測定精度や適

用範囲などの基本性能を明らかにするとともに，建設物の維持管理に関わる実務を想定した適用性の検証を目的とするものである。

2. 光学式ひび割れ幅測定器の概要

2.1 ひび割れ幅測定方法

コンクリート構造物のひび割れ幅測定には，一般にクラックスケールという合成樹脂フィルムに測定目盛りを記したシートを用いる。本ひび割れ幅測定器（以下，本測定器。**写真-1**参照）は，クラックスケールの代替可能性を念頭に開発されており，ひび割れに対し，測定器の先端ラバーを押し当て測定スイッチを押すことで，瞬時にひび割れ幅を表示する。携帯可能な大きさに設計されており，開口幅 0.05～2.0mm までのひび割れを 0.05mm 単位で測定する。

ひび割れ幅の測定方法を**図-1**に示す。先端に赤色発光ダイオード（以下，LED）を備えており，光を照射してひび割れ部分に影を作り出す。影寸法を電荷結合素子（以下，CCD，0.014mm 素子が 256 個並列）で読み取り，ひび割れ幅を直読する。光を透過する材料の測定は原理的に困難となるため，不透明シート等による処理が必要となる。

*1 東京都立大学 大学院工学研究科建築学専攻・助手 博士(工学)(正会員)

*2 ものつくり大学 技能工芸学部建設技能工芸学科・教授 博士(工学)(正会員)

*3 三協エンジニアリング(株)開発部・課長

*4 独立行政法人建築研究所 材料研究グループ・研究員 博士(工学)(正会員)

2.2 測定器の感度調整

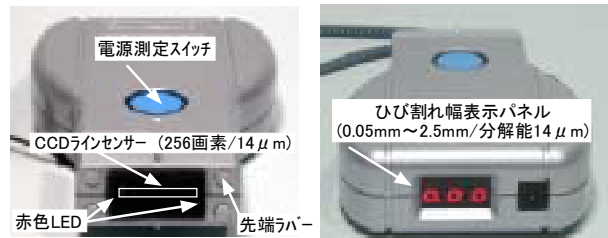
写真－2に測定補助具の概要を示す。本測定器は、光源による明部と、ひび割れによる暗部のコントラスト差を平面的に読み取るため、白背景に黒線を印字したものであれば、その幅を読み取ることができる。測定器の感度調整は、その変形量が $1.0 \times 10^{-3} \% / ^\circ \text{C}$ で、常温では変形が無視できるPET製の測定補助具を用いる。1.0mm幅を主基準に、0.5mm、1.5mm、2.0mmの感度確認線における測定値が $\pm 0.05 \text{mm}$ の誤差範囲内であれば、測定器は正常に作動している。また、測定補助具のスリットをひび割れに当て、先端ガイドに測定器をはめ込む測定により、精度良い測定が可能となる。更に、スリットを介して測定箇所をマーキングしておけば、特定のひび割れにおける経時的なひび割れ開口幅として定量化することも可能となる。

以上を前提に、本測定器の測定精度をクラックルーペの測定値を比較対象に検討した。補助具の基準目盛り(0.10mm～2.50mmの計21本)を測定し、目盛寸法と同一値の読み取りが困難であった場合の相違率を求めると、クラックルーペの場合は、測定数105回中26.7%の割合で、測定補助具なしの条件における測定器の場合、測定数420回中1.67%の割合となり、測定精度の高さが確認できた。

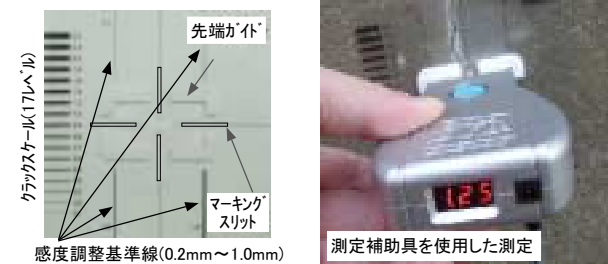
3. 実験概要

3.1 実験方法

表－1に測定器の性能評価試験の概要を示す。測定物における色調、材質、ひび割れ部の形状・段差の影響ならびに測定者における習熟性の影響を実験要因とし、ひび割れ幅の検出特性に関する基礎的実験に加え、実部材と実構造物のひび割れを対象とした応用的実験を実施した。なお本測定器は、ひび割れ幅を自動定量する機構を有することから、コンクリートに限らず建材全般に広く適用が可能と考えられるため、コンクリート、鋼材試験片、建築用仕上塗材を測定対象に位置づけて、検討を実施することとした。**写真－3**に主な測定対象物を示す。



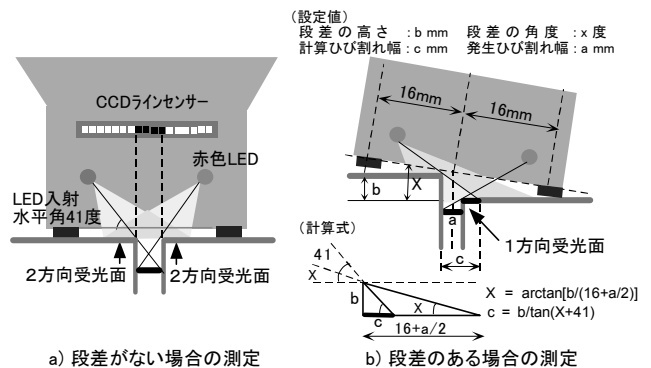
写真－1 ひび割れ幅測定器の概要



写真－2 測定補助具の概要



写真－3 ひび割れ幅の主な測定対象物



図－1 ひび割れ幅の計測原理

表－1 ひび割れ幅測定器の性能評価試験概要

項目	測定対象物	測定内容
背景色の影響	カラーパレット試料	120種類 (色数24種×ひび割れ幅5種:0.1mm～2.0mm)
材質の影響	コンクリート、鋼材試験片、建築用仕上塗材仕上げ試験片	各3種類 (ひび割れ幅:大,中,小)
ひび割れ段差の影響	模擬ひび割れ幅計算試料	49種類 (段差7種×ひび割れ幅7種:0.1～2.0mm)
ひび割れ形状の影響	コンクリート試験体	31種類 (4分類:標準,段差,塗装,木端欠け)
測定習熟性 の影響	コンクリート試験体,コンクリート壁部材 ^{*1} ,鉄筋コンクリート造建築物 ^{*2}	4指標 (使用頻度,個人技量,測定角度,測定補助具)

備考)

*1 都市公園再生コンクリート壁状試験体(形状3.8×16.0×0.15m)

*2 都市公園都市型住宅総合実験C館²⁾(再生骨材RC構造物)

3.2 ひび割れ面における背景色の影響

本測定器は、赤色 LED を用いることから、測定面が補色である青系色の場合は、測定誤差が発生する可能性がある。そこで、カラーパレットを用いて背景色の影響を評価した。パレットは建材の多様な色彩特性を評価するのに適当な条件となるように、JIS Z 8102（物体色の色名）における有彩系統色 10 種類における、彩度・明度の関係において鮮やかと分類される vivid, light, deep の各系統色から任意に 24 色を選定して作製した。それに対し、色差計を用いて JIS Z 8721（三属性による色の表示方法）の色相 H（色知覚の性質を特徴付ける色の属性）、明度 V（物体表面の相対的な明暗に関する色属性）、彩度 C（色味の強さを明度の無彩色からの隔たりで表した視知覚の属性）を定量化した上で、5 種類の模擬ひび割れ（線幅 0.1, 0.2, 0.5, 1.0, 2.0mm）を黒色で印刷し、各色 3 箇所の模擬ひび割れ幅を測定し、背景色調と与える影響を評価した。

色差の測定結果を図-2に示す。測定誤差が発生する色調を丸印で示したが、これらは色相が青系色であり、LED 光により黒味を帯び、ひび割れ幅の測定が困難となる可能性が示された。

3.3 ひび割れ形状の影響

ひび割れ段差がある場合の適用範囲を検討した（図-1 参照）。LED は装置先端の水平方向から 41° で照射され、段差による装置の傾きを X とした場合、段差 b により影の投影長さ c が実際のひび割れ幅 a よりも大きくなる場合があるといえる。従って、ひび割れ幅と段差の長さ比に対する関係を、各々 7 段階に設定して、計算に基づき評価を行った。

適用範囲を図-3に示す。段差による影幅がひび割れ幅より小さい場合、段差のない場合と同様に測定できる。一方、影幅がひび割れ幅と同程度で、段差が外光を遮断する先端ラバー高さ 1.0mm よりも大きく、測定部の接触が不安定である場合、ひび割れ幅は小さく表示された。LED による明部と暗部の境界が不明瞭となることで CCD 感度が低下し、ひび割れ幅が小さく評価されるためである。以上、段差とひび割れ幅の比が 1:1 未満で、段差が

1.0mm 未満であることが測定条件になる。

図-4に、コンクリートにおけるひび割れ端部形状を考慮した測定結果を示す。端部形状は、大きな特徴がない標準以外に、段差、凹凸、そして角欠けによる外部と内部のひび割れを有する木端欠け等の形状的特徴を有するものが存在し、それらの一部は測定に影響を及ぼすと考えられる。

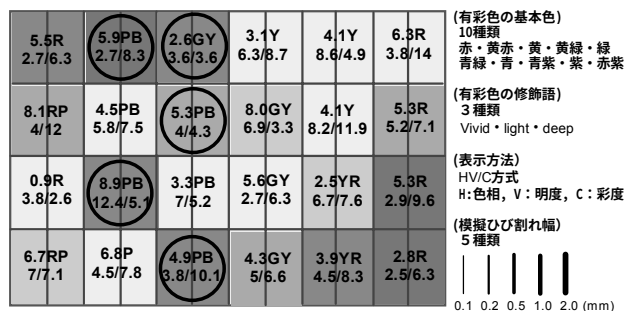


図-2 カラーパレット模式図と色差の測定結果

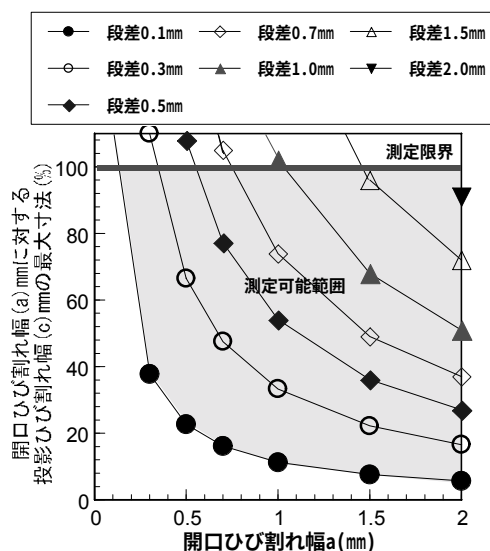


図-3 段差のあるひび割れ幅測定の適用範囲

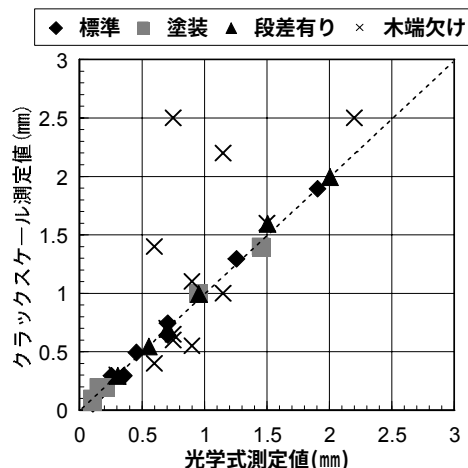


図-4 ひび割れ形状を考慮した測定結果

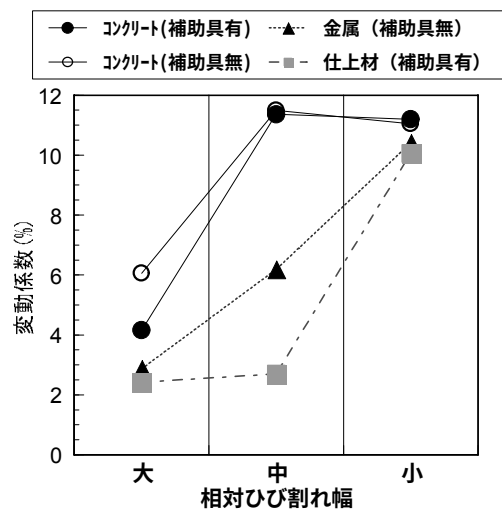
表－２ 一般的な建材を対象としたひび割れ幅測定結果の概要

項目	コンクリート試験体	鋼製試験片	建築用仕上塗材仕上げ試験片
特徴	木製型枠成型。耐久性、防水性、美観性から機能低下性が想定される幅0.5mm前後で3種類のひび割れを有する。	表面粗さ40～150μmを有する粗面に幅0.5mm前後で3種類の切欠ひび割れを有する。	大中小模様の表面うねり面に幅0.5mm前後で3種類の切欠ひび割れを有する。
測定水準	クラックスケール測定値：1回 ひび割れ測定器：断続5回 測定補助具：有、無	クラックルペ測定値：1回 ひび割れ測定器：断続5回 測定補助具：無	クラックルペ測定値：1回 ひび割れ測定器：断続5回 測定補助具：有
結果	①クラックスケール測定値(mm) (大:中:小)=(1.20:0.60:0.35) ②光学測定値(平均)(mm) 無(大:中:小)=(1.180:0.635:0.435) 有(大:中:小)=(1.108:0.725:0.345)	①クラックルペ測定値(mm) (大:中:小)=(0.99:0.49:0.19) ②光学測定値(平均)(mm) 無(大:中:小)=(0.980:0.485:0.195)	①クラックルペ測定値(mm) (大:中:小)=(1.03:0.50:0.18) ②光学測定値(平均)(mm) 有(大:中:小)=(0.927:0.477:0.157)

段差に関しては、適用範囲内であればひび割れ幅測定は可能であるが、木端欠けに関しては、ひび割れが、内部と外部ひび割れの間で読み取られ、その範囲内で測定値がばらつくことが確認された。但しその傾向は、クラックスケールの場合でも同様といえる。つまり、木端欠けの場合、どの深度のひび割れを真のひび割れ幅とするかは、測定目的に依存する。例えば、ひび割れ幅に起因する部材損傷度の評価には内部ひび割れが³⁾、構造物としての美観の評価には外部ひび割れが重要となる。従って、測定目的が明確ではない場合は、木端欠けを避けてひび割れ幅の測定を行うことが適当となる。

3.4 材質の影響

一般建材において、耐久性、防水性、美観の観点からその機能が低下するひび割れ幅を0.5mm前後⁴⁾とし、そのひび割れ幅を含む各種ひび割れに対し、クラックスケールとクラックルペの測定値を考慮した結果の概要を表－2に、測定値のばらつきを図－5に示す。コンクリートは、測定補助具の有無を区別し、鋼製試験片は、ひび割れ幅を均一に加工したことから測定補助具を用いない測定とし、仕上塗材試験片は、模様の連続性が損なわれていない表面の高低差が小さい部分を特定し、測定補助具を用いた測定とした。結果、全試料ともに目視読み取り値と同程度の測定値が得られるが、ひび割れ幅が小さくなるにつれ、変動係数が若干大きくなることが確認された。この傾向は、クラックスケールやクラックルペにおいても同様に起こりうるものと考えられる。一方、本実験では複数被験者が同一箇所のひび割れに対し、短時間で延べ10



図－５ 一般建材のひび割れ幅測定結果

回の測定を行ったが、目視では読み取りが困難なひび割れに関しても、ばらつきが少ない測定値を繰り返し出力可能であったことは大きな特徴であるといえる。測定補助具を使用した場合は、ばらつきが更に改善されるため、少ない測定回数で精度が要求される場合に有効であるといえる。鋼材試験片および仕上塗材試験片は、ひび割れ幅を人工的に作製していることから、コンクリート試験体よりも測定値の変動係数が若干小さくなった。

続いて、表面状態の影響を評価する。鋼製試験片は、放電加工により最小40μmから最大150μmの表面粗さを有している。これは、タイル施工時にコンクリート面に施す高圧水洗処理による表面粗さ⁵⁾や、サンドブラストによる表面状態よりも粗面といえる。鋼材試験片は、補助具がない状態でも精度良い測定が可能であったことから、同程度の粗さを有する建材に関しては、同様の測定精度を求めることができる。仕上塗材試験片に関しては、粗さの

平均中心高さが変動することで生じる表面うねりが発生する場合があるため、先に示した仕上げ材における測定上の配慮を行うことで、コンクリートや鋼材と同等な測定精度を求められるといえる。

3.5 測定習熟性の影響

本測定器を使用する際における測定者の習熟性の影響を、使用頻度、個人技量、測定角度および測定補助具の要因に分けて評価した。被験者はクラックスケールを用いたひび割れ幅測定の実務経験者とした。これにより、実務的な使用を想定した本測定器の適用範囲がより明確になるといえる。

(1) 使用頻度

使用頻度に関しては、「本測定器を使用する同一測定者における測定回数が習熟性に及ぼす影響」として捉える。図－6に使用頻度の影響に関する実験結果を示す。写真－3の c)鉄筋コンクリート造構造物と b)壁状試験体における各種ひび割れに対し、水平方向測定および測定補助具なしの条件で、同一被験者による測定回数(断続測定5回から30回)を考慮した測定を実施した。その結果、ひび割れ幅によらず5回測定時のばらつきが最大で、それ以後の測定値は安定することが確認された。以上より、実務経験者である場合、5回以上の試行後に本測定を開始することで、使用頻度による習熟性の影響は軽減できるといえる。

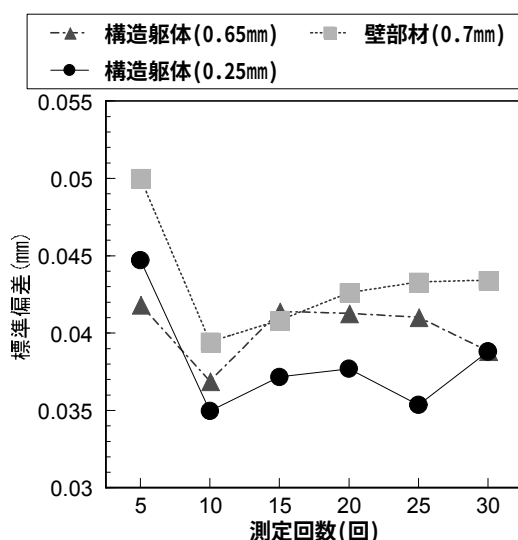
(2) 個人技量

個人技量に関しては、「本測定器を使用する複数測定者における相対的な個人技量の差が習熟性に及ぼす影響」として捉える。図－7に個人技量の影響に関する実験結果を示す。写真－3の a)コンクリート試験体から、任意に選定した各種ひび割れに対し、下方向測定および測定補助具なしの条件で、複数の被験者(ABC 3名)による1回目測定値(断続測定3回平均)を比較検討した。その結果、特定被験者の測定値が安定せず、被験者間のばらつきが発生したが、測定補助具の使用により軽減した。以上より、個人技量の影響は実務経験者においても発生するが、測定補助具の使用または5回以上の試行測定後に本測定を実施するなどの

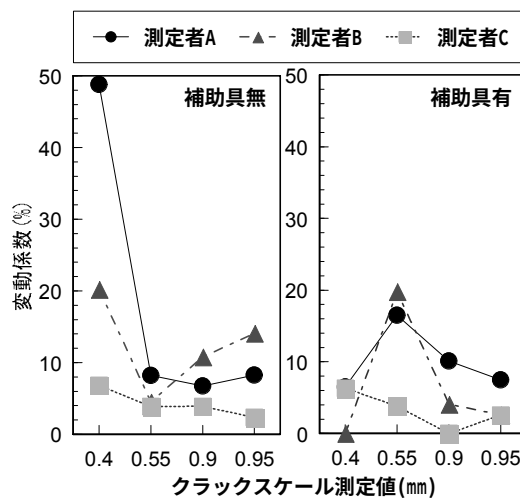
対策により、個人技量による測定値のばらつきをある程度小さくすることができる。

(3) 測定角度

測定角度に関しては、「本測定器を使用する同一測定者における測定角度が習熟性に及ぼす影響」と捉える。図－8に測定角度に関する実験結果を示す。写真－3の a)コンクリート試験体から任意に抽出したひび割れに対し、測定難易度が高いと想定される上方向測定、低いと想定される下方向測定、測定補助具なしの条件で、同一被験者による1回目の測定値(断続3回平均)を比較検討した。その結果、ひび割れ幅によらず測定角度の影響は見られず、補助具を使用した場合は、更にばらつきが小さくすることが確認された。以上より、測定角度が習熟性に及ぼす影響は小さいといえる。



図－6 使用頻度の影響



図－7 個人技量の影響

(4) 測定補助具

測定補助具に関しては、「本測定器を使用する同一測定者における測定補助具の有無が習熟性に及ぼす影響」と捉える。図-9に測定補助具に関する実験結果を示す。写真-3の a)コンクリート試験体から任意に選定したひび割れに対し、下方向測定、測定補助具ありとなしの条件で、同一被験者による1回目の測定値(断続10回平均)を比較検討した。その結果、補助具ありの場合はひび割れ幅によらず、ばらつきを大きく低減できることが改めて確認された。以上より、測定補助具の有無は習熟性に影響を及ぼし、測定補助具の使用により更に精度の良い測定が可能になるといえる。

4. まとめ

光学式の携帯型ひび割れ幅測定器に関する基本性能を評価した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 本測定器は、コンクリート、鋼材、仕上げ材など一般的な建材への適用性は高く、短時間で精度良くひび割れ幅を測定することができる。
- (2) 測定物の色調は、青系色以外であれば、ひび割れ幅の測定に大きく影響しない。
- (3) 測定物の表面性状は、ひび割れ部の段差による制限、木端欠けを有する場合を除き、測定に大きく影響を及ぼすことはない。
- (4) 測定における習熟性の影響は、一定回数の測定後であれば、その程度は小さくなり、測定補助具の使用は、精度の良い測定を可能にする。
- (5) 本測定器は、構造体壁面のひび割れ個数とひび割れ幅が関連づけられる劣化度診断技術の進展に貢献できる可能性を有している。

謝辞

本研究は、日本建築仕上学会・ひび割れ幅測定器調査研究委員会(委員長:近藤照夫)における研究成果の一部である。本測定器の開発元である三協エンジニアリング(株)、東京理科大学梅津裕二氏、八洋コンサルタント(株)斉藤順一氏ならびに、都市公団総合技術研究センター各位から多大なご協力を賜りました。深く感謝申し上げます。

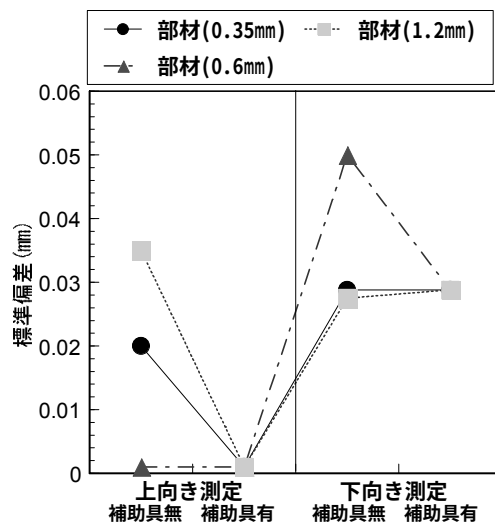


図-8 測定角度の影響

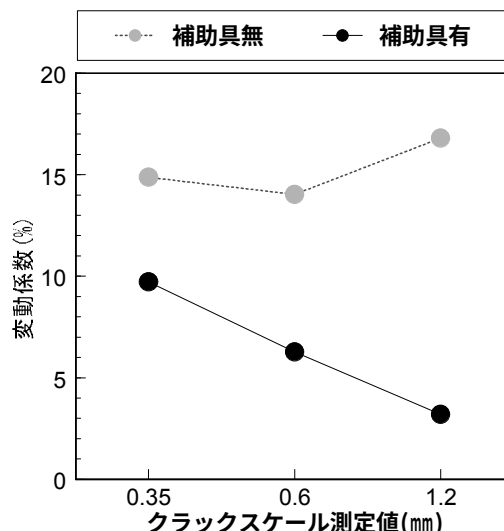


図-9 測定補助具の影響

参考文献

- 1) 日本非破壊検査協会編, 非破壊検査の進歩, 1982
- 2) 都市基盤整備公団調査研究期報 No.114, 都市基盤整備公団, 1997
- 3) コンクリート構造の破壊力学に関するコロキウム論文集, コンクリートの破壊力学研究委員会, 1990
- 4) コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針, 日本コンクリート工学協会, 1987
- 5) T.Kondo, K.Motohashi, T.Nireki, K.Ogasawara: Water Jet System for Pretreating Concrete Surfaces before Plastering, Proc. of CIB W70, Int. National Symp. on Management, Maintenance & Modernization of Building Facilities, pp.275-279, 1998