

- 19 クラックスケール内蔵光波測量器を用いた ひび割れ点検システムの開発と現場適用

Development and On Site Application of Inspection System Utilizing Non-prism Total Station Incorporating Crack Width Ruler

前田穰¹・中庭和秀²・石澤徹³・小山幸則⁴・朝倉俊弘⁵

Minoru Maeda, Kazuhide Nakaniwa, Toru Ishizawa, Yukinori Koyama and Toshihiro Asakura

抄録:本研究では、遠隔から高速・高精度にひび割れ幅が測定できるクラックスケール内蔵光波測量器によるひび割れ点検システムの開発内容とその現場適用の代表例として橋梁アセットマネジメントに取り組んでいる青森県での長大橋の事例を紹介する。

これにより、構造物の点検実施時、現行技術では大きな課題であった仮設足場等の設置による安全上、時間制約上の問題を抜本的に解決すると同時に、迅速なひび割れ幅測定、座標化、CAD図面変換が可能な、これまでにないひび割れ測定および3次元データベース・マネジメント・システムが実現した。

Abstract: This study presents a high speed and precise inspection system that allows remote measurement of cracks using a non-prism total station incorporating a crack width ruler. Its applicability is shown with long and large bridges in Aomori Prefecture which leads Japan in bridge asset management.

Through this study, not only have such technical issues as the hazard and time limitations in constructing temporary footholds been provided fundamental resolutions but also timely production of crack measurements, coordinate conversions and transformation into CAD drawings have become possible, to create a unique crack measurement and 3D database management system.

キーワード: クラックスケール, 光波測量器, ひび割れ幅, 遠隔, 座標化, 3次元 CAD

Keywords : Crack width ruler, Non-prism total station, Crack width, Remote, Coordinate conversion, 3D CAD

1. はじめに

橋梁やトンネル覆工コンクリートの補修計画をする上で、ひび割れ等の変状調査は必要不可欠である。従来より、近接目視を主体とした方法が多く利用されているが、本調査方法は仮設足場や高所作業車を用い実施することから、安全上の問題、時間的制約の問題、経済的に大きな負担となること等により実施が難しい領域が多くあった。

本研究では、これらの問題を解決するために開発した遠方からひび割れ幅を測定し、3次元座標を求め、その測定したデータをCAD図面に変換し、的確な劣化診断だけでなく追跡調査も可能にした新しいシステムの開発とその代表的現場適用事例としてJR操車場の上を跨ぐ長大橋である青森中央大橋での実施例について述べる。

2. 既往の調査方法の問題点

既往のひび割れ調査としては、文献¹⁾に示されているようなコンクリート表面を撮影・記録するシステム等も用いられるようになってきたが、ひび割れ幅が小さくなると検出が難しくなること、撮影・記録に時間が掛かること等から、目視観察とスケッチ記録する方法が用いられている。これは図-1に示すように目視でひび割れを見つけたら、チョークで印を付け、クラックスケールを当ててひび割れ幅を測り、写真を撮り、その後、ひび割れの全体像をスケッチブックに手書きで記録することによって行われる。最終的に、CADデータとする(図-2)とはいえ、スキャンする元データがスケッチである以上、精度には限界がある。

このような既往の方法で行われている大半のひび割れ調査の問題点には、以下のものがある。

1 : 正会員 NTTインフラネット(株)
(〒103-0007 東京都中央区日本橋浜町 2-31-1, Tel :03-5643-5301, E-mail : m-maeda@hqt.nttinf.co.jp)
2 : 正会員 関西工事測量(株)
(〒562-0035 大阪府箕面市船場東 2-1-5, Tel :072-749-1919, E-mail : nakaniwa@kankou.co.jp)
3 : 非会員 青森県
4 : フェロー会員 工博(財)地域地盤環境研究所
5 : 正会員 工博 京都大学大学院 工学研究科教授

大規模な規制，高所作業車，仮設足場等が必要となる場合が多い。
 スケッチする点検者の技量差により成果図面に差が出る。
 展開図を作成するのに手間がかかる。
 経時的な変化を把握するのが困難である。
 ひび割れは成長するため，年々調査ボリュームは増大する。



現行の点検作業 円内はクラックゲージ
 現行の記録方法 スケッチブックに記録

図 - 1 既往の調査方法

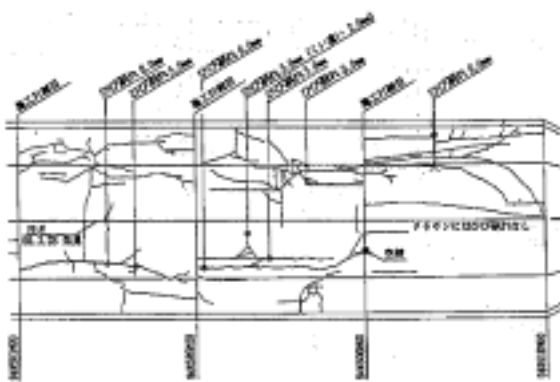


図 - 2 現行のひび割れ計測の記録の例²⁾

3. 開発したシステム

(1) 開発の経緯

クラックスケールとノンプリズムの光波測量器を組合せれば，離れた場所のひび割れが計測できるという発想から開発に着手した。具体的には，図 - 3 に示す現行の光波測量器の焦点鏡に図 - 4 に示す同心円状の蜘蛛の巣に似た形のクラックスケールを内蔵することにした。



図 - 3 現行の焦点鏡

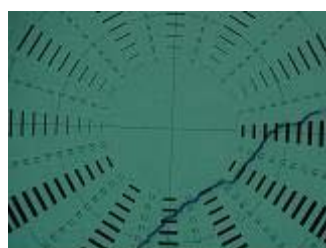


図 - 4 新しい焦点鏡

(2) クラックスケール内蔵光波測量器の特徴

図 - 5 に新しく開発したクラックスケール内蔵光波測量器を示す。この測量器は，以下の特徴を有する。



図 - 5 クラックスケール内蔵光波測量器

1) クラックスケール内蔵高倍率望遠レンズ

焦点鏡に付けられたクラックスケールの目盛と光波測量器を通して目視で確認できるひび割れとを重ね合わせ，幅が一致するクラックスケールの番号を確認する。一致する番号を入力し，器械設置点からひび割れまでの距離を計測すると，番号と距離の関係から計測対象ひび割れの幅が計算される。以上の方法を使って離れた位置からひび割れ幅を計測することができる。

図 - 6 に測定状況を示した。



新しい記録方法：
 測量器でのボタン入力

図 - 6 新システムによるひび割れ計測

2) 40倍の望遠レンズ

通常の光波測量器では 30 倍のレンズを使用しているが，クラックスケール内蔵光波測量器では内蔵ゲージの認識のしやすさと望遠鏡を覗いてひび割れを探す際の効率を勘案して 40 倍のレンズを用いている。40 倍の望遠レンズを搭載しているため，離れた場所にある構造物のひび割れを探して，光波測量器内蔵のクラックスケールと実ひび割れを重ね合わせ計測することにより遠隔からひび割れ幅と 3 次元座標位置が計測できる。5 章 (2) で述べるように，この測量器を用いることにより，0.3mm のひび割れ幅であれば 39m，0.1mm のひび割れ幅では 12m 離れても計測できるこ

とから仮設足場や高所作業車を使用することなく、ノンプリズムで遠隔から簡易にひび割れ幅を計測することができる。

3) ノンプリズムでの長距離測距

プリズムや反射シールを用いることなく、対象物までの距離を計測することが可能である。好条件下でのノンプリズムモード最大測定可能範囲は 350m である。

4) 視準角度補正計測

幅の見え方はそのものを見る時の角度や距離に応じて変化する。正面から視準した場合は見かけの幅と実際の幅とは一致するが、斜めから視準した場合、実際の幅とは異なった幅の見え方を示す。クラックスケール内蔵測量器ではひび割れを 3 次元座標で計測することによって対象物との角度補正を自動的に行うことが可能にした。

5) サポートソフトウェアの開発

サポートソフトウェアは、計測データを図面化するまでの処理について徹底的な時間短縮を図り、以下の特徴を有するものとした。これにより、計測者が現地で調査したデータをパソコン上に取り込み専用ソフトウェアで市販の CAD に自動描画し、3 次元図面の他、平面図や立面図・展開図といった図面作成も容易に行う事ができるようになった。

a) 自動結線プログラム

ひび割れの始終点、折れ点などの位置を計測すると自動的に結線され、ひび割れの形状が記録されるのでデータ整理工数を削減するとともに計測対象壁面との角度補正も同時に実施し、高速化を図った。

b) 指定平面投影・曲率面の周長展開プログラム

法面・壁面の計測データの指定平面への投影および橋脚・トンネル等の曲率面の周長展開を可能にした。

c) 高速作図プログラム

計測データは、パソコン上で市販の CAD プログラムに接続することが可能で、ひび割れ幅を含んだ「変状図」だけでなく、構造物の「立面図」、「展開図」等を簡易に極めて短時間で作図することができる。

d) データ交換による付加価値プログラム

計測データは 3D レーザースキャナデータ、GIS データ、国家座標データとデータ交換でき、重ね合わせ画像、図面表示および 3 次元によるデータ表示・分析も実施可能である。

4. 本システムによる既往の問題点の解決

本システムは、2 章で述べた既往のひび割れ計測の問題点を解決し、次のようなことを実現した。

大がかりな規制、高所作業車、仮設足場等が不要で非常に安全である。

展開図等の作成が簡単にでき、成果図面の品質が

高く、しかも均一である。

時間的なひび割れ進行の数値把握ができる。

成長したひび割れのみを計測することも可能で、作業量を減らすことができる。

5. 実証実験

計測者によるばらつき、距離別最小計測ひび割れ幅を確認する実験および視準角度の補正精度を検証する実験を行った。

(1) 計測者によるばらつき実験

1) 目的

本システムによるひび割れ計測において、最も計測値に影響がでるのが、クラックゲージ番号選択時の個人差と考えられる（クラックゲージ番号を選択すると自動計算され、一意にひび割れ幅が決定される）。この距離毎によるばらつき状況を把握し、適用領域を明確化することを目的とした。

2) 実験概要

正確なひび割れ幅データのある検証用の模擬ひび割れを本測量器と正対した同じ高さで屋外の垂直な壁上に設置した。図 - 7 に実験概要の平面図を示す。また図 - 8 に内蔵クラックスケールを示す。この読取ゲージをひび割れに当て、それに相当するゲージ番号を読み取りその値を入力するとひび割れ幅に自動変換するシステムとなっている。

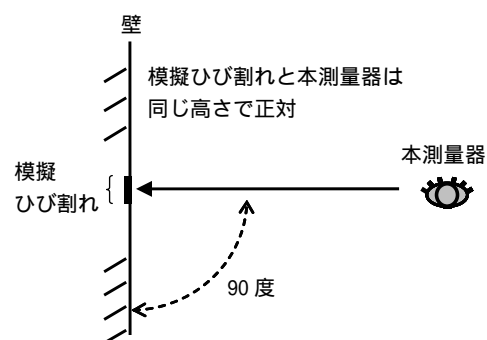


図 - 7 実験概要 (平面図)

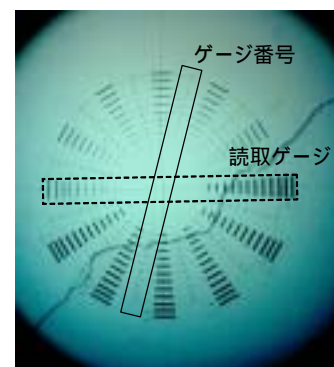


図 - 8 内蔵クラックスケール

3) 実験条件

実業務を想定した表-1の条件で実験を実施した。なお、計測者は測量会社技術系社員100人とし、資格や経験年数は問わないこととした。

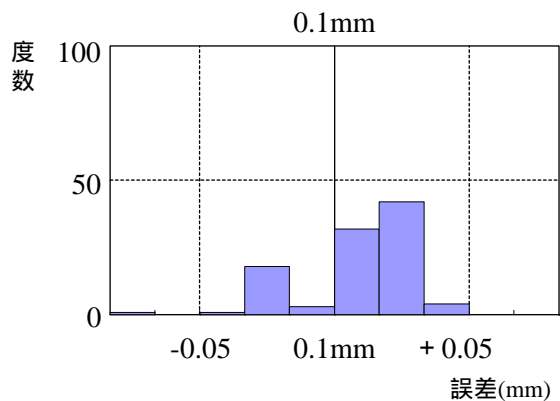
表 1 実験条件

項目	水準
距離	10m, 20m, 30m, 40m, 50m
ひび割れ幅	0.1mm, 0.2mm, 0.3mm, 0.4mm, 0.5mm
場所・測量器	屋外で同じ測量器を用いて実施
対象物	正確なひび割れ幅を持つ模擬ひび割れ (マイクロスコープで確認)
計測日時	6月初旬の3日間,各9:00~17:30
判定基準	現行のクラックスケールの規格値である誤差±0.05mm以内を100%満足する

4) 実験結果

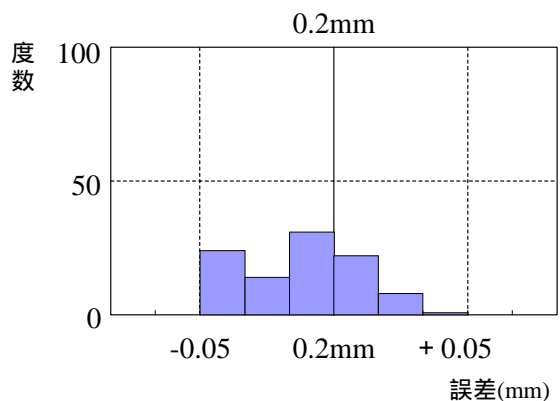
代表例として、距離20mにおけるひび割れ幅0.1mm,0.2mm,0.3mm,0.4mm,0.5mmにおける結果を図-9~図13に示す。

また、全体をまとめると表-2のようになる。



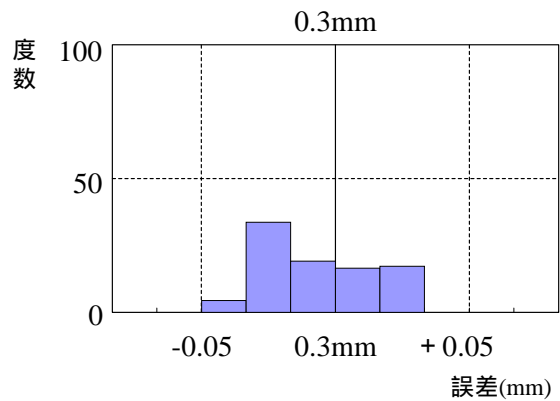
(平均:0.11mm, 標準偏差:0.02mm)

図-9 実験結果：距離20m,ひび割れ幅0.1mm



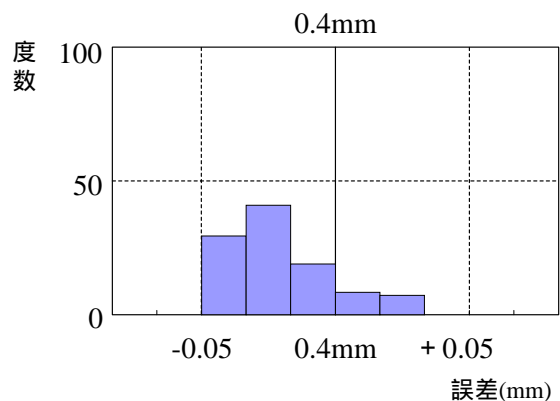
(平均:0.19mm, 標準偏差:0.02mm)

図-10 実験結果：距離20m,ひび割れ幅0.2mm



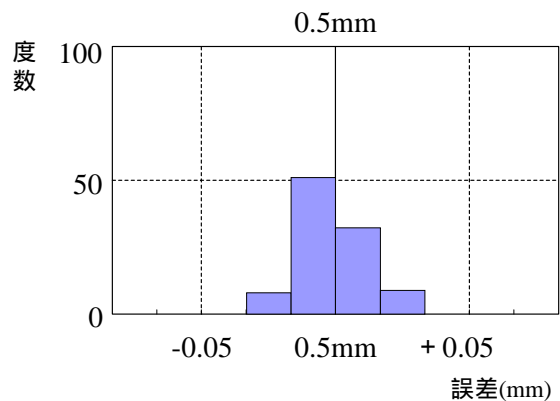
(平均:0.29mm, 標準偏差:0.02mm)

図-11 実験結果：距離20m,ひび割れ幅0.3mm



(平均:0.39mm, 標準偏差:0.02mm)

図-12 実験結果：距離20m,ひび割れ幅0.4mm



(平均:0.50mm, 標準偏差:0.01mm)

図-13 実験結果：距離20m,ひび割れ幅0.5mm

表 - 2 実験結果のまとめ

距離 (m)	規格値内に全データが収まった最小ひび割れ幅 (mm)	左記における最大誤差(mm)
10	0.1	0.05
20	0.2	同上
30	0.3	同上
40	0.4	同上
50	同上	同上

5) まとめ

誤差が所定の範囲 (0.05mm) 内に 100%収まることを計測可能であることの判定基準とすると次のようになる。

- 距離 10m 0.1mm のひび割れ幅は計測可能
- 距離 20m 0.2mm "
- 距離 30m 0.3mm "
- 距離 40m 0.4mm "
- 距離 50m 0.4mm "

(2) 距離別最小計測ひび割れ幅実験

計測者によるばらつき実験を、誤差が所定の範囲 (0.05mm) 内に 100%収まることを計測可能であることの判定基準として、さらに 5m 間隔で実施した結果、図 - 14 のデータを得た。これから、以下のことがいえる。

- ひび割れ幅 0.1mm の場合、約 12m 離れて計測可能
- ひび割れ幅 0.2mm の場合、約 27m "
- ひび割れ幅 0.3mm の場合、約 39m "

内径 20m 程度の道路トンネルで考えると、路面上に測量器を設置した場合で最大計測距離は 20m 程度以下にできるので、この実験結果からは 0.2mm 幅のひび割れ (一般的に求められている最小計測ひび割れ幅) まで十分計測可能となることが分かった。点検対象となるトンネルの大半はこれよりも内径の小さいものであることから、多くの場合、本測量器を用いることに

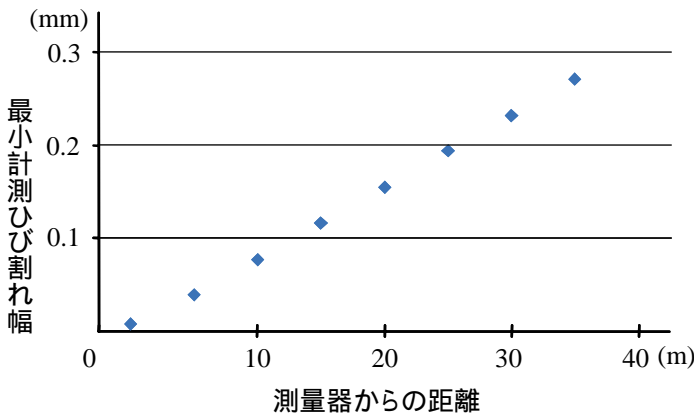


図 - 14 距離別計測ひび割れ幅 (ひび割れ幅 0.3mm 未満)

より、足場等を設置せずにひび割れ計測が可能となる。通信用トンネルの点検対象のひび割れ幅の基準である 0.3mm を十分満足することから通信用と道の点検に活用している。

また、実験結果より 0.3mm までのひび割れ幅を計測しようとする場合は 39m 以内、0.2mm までのひび割れ幅を計測しようとする場合は 26m 以内であれば、計測可能であるので、通信専用橋や建物等の点検にも活用し、確認を行っている。

(3) 斜めからみた場合の精度検証実験

1) 目的

正対しているひび割れ幅の計測精度については (1) および (2) で確認した。次に正対していない、斜めから見たひび割れ幅について、見え幅による補正計算プログラム結果を検証することを目的とする。すなわち、斜めから見た場合、同じ距離の条件では、正対する場合と比べひび割れが細く見える。この細く見えるひび割れ幅を正確に補正するプログラム (第3章 (2) 5) a) 参照) により、リアルタイムで補正することとしているが、その精度が実用上問題ないことを検証する。

本測量器のハード上および人間の目の構造上の限界から、視準角度が 30 度以下になる場合、読み取り不能となる。一方、90 度の場合は、既に (1)、(2) で検証できていることから、本実験では、30 度以上 80 度以下を対象とした。

2) 実験概要

実験は図 - 15 に示すように模擬ひび割れと測量器を配置して行った。

3) 実験手順

模擬ひび割れを測量器と同じ高さに設置し、斜め方向に設置した測量器の任意の器械位置から、まず模擬ひび割れの両端 2 点を計測する。次にあらかじめ決めてある壁面上の 3 点目を計測し、この 3 点で 1 つの平面を定義する。これによりひび割れのある壁面に対する視準角度を求め、ひび割れ幅を補正するプログラム

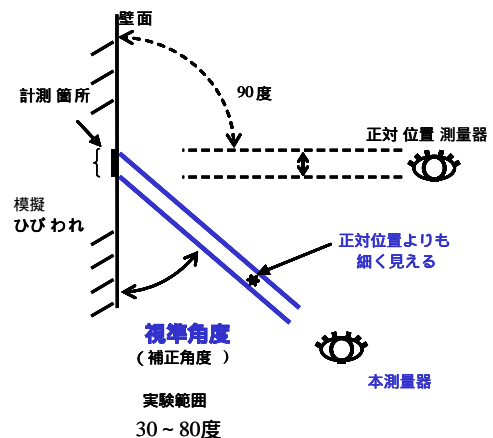


図 - 15 実験概要 (平面図)

でアウトプットされる補正データと真値（マイクロスコブ確認値）の差を評価する。

4) 実験条件

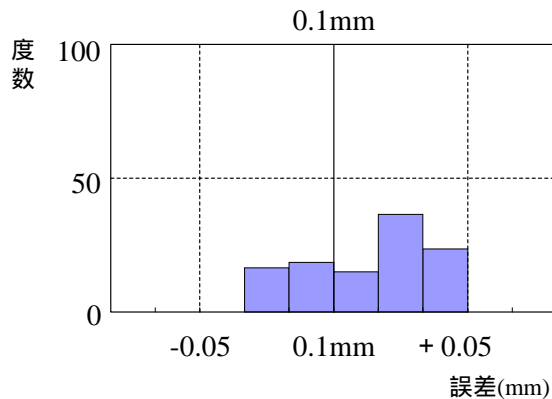
実験条件は実際の調査を想定して表 - 3 の条件で実施した。視準角度は、ひび割れ幅 0.1mm, 0.2mm において 30 度から 80 度の範囲を 10 度ピッチで実施した。

5) 実験結果

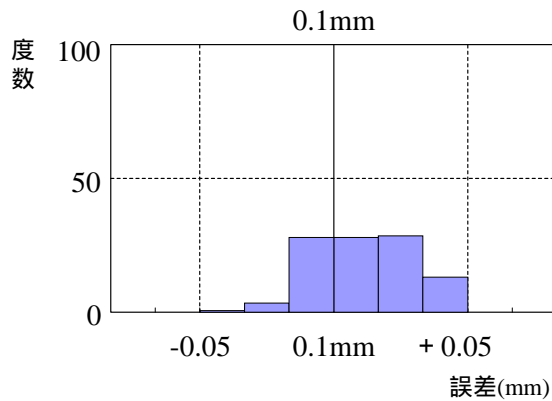
代表例として、距離 20m におけるひび割れ幅 0.1mm, 0.2mm における視準角度 30 度, 60 度, 80 度の結果を図 - 16 ~ 図 21 に示す。

表 - 3 実験条件

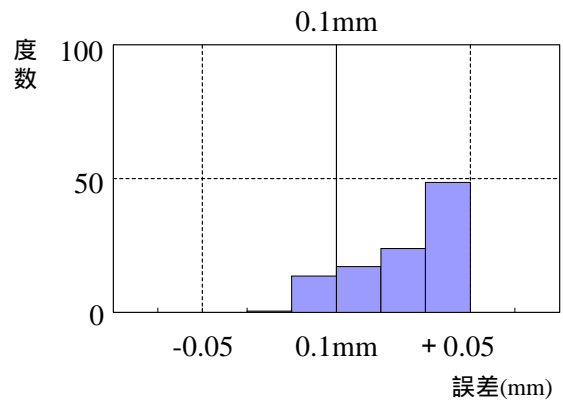
項目	条件
距離	10m, 20m
ひび割れ幅	0.1mm, 0.2mm
対象物	正確なひび割れ幅を持つ模擬ひび割れ (マイクロスコブで確認)
位置	水平視準角度 30 度 ~ 80 度
計測日時	(1), (2) と同じ日時に実施
判定基準	現行のクラックスケールの規格値である 誤差 $\pm 0.05\text{mm}$ 以内を 100% 満足



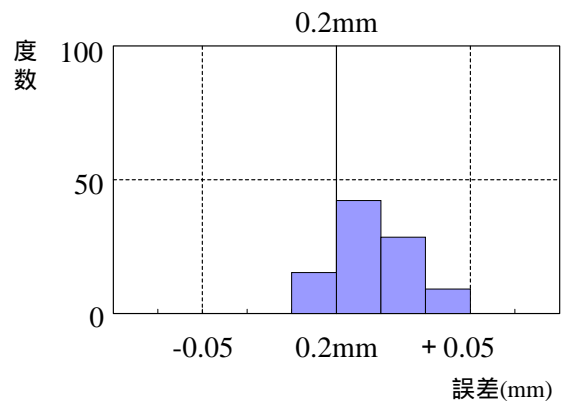
(平均: 0.12mm, 標準偏差: 0.03mm)
図 - 16 実験結果
 (ひび割れ幅 0.1mm, 視準角度 30 度)



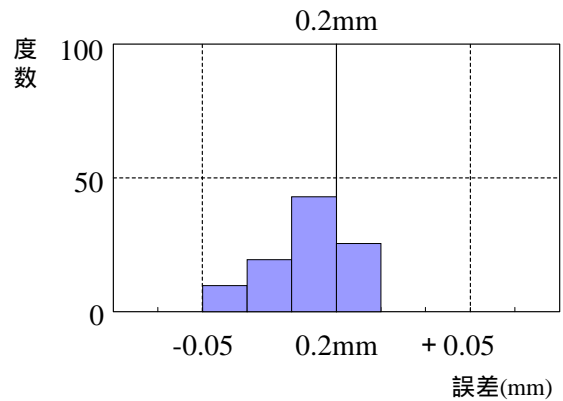
(平均: 0.11mm, 標準偏差: 0.02mm)
図 - 17 実験結果
 (ひび割れ幅 0.1mm, 視準角度 60 度)



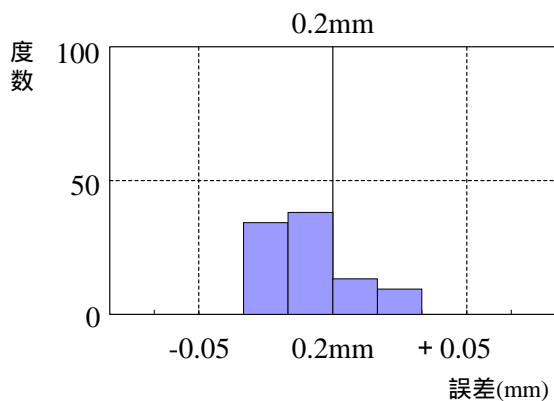
(平均: 0.13mm, 標準偏差: 0.03mm)
図 - 18 実験結果
 (ひび割れ幅 0.1mm, 視準角度 80 度)



(平均: 0.22mm, 標準偏差: 0.02mm)
図 - 19 実験結果
 (ひび割れ幅 0.2mm, 視準角度 30 度)



(平均: 0.19mm, 標準偏差: 0.02mm)
図 - 20 実験結果
 (ひび割れ幅 0.2mm, 視準角度 60 度)



(平均:0.19mm, 標準偏差:0.03mm)

図 - 2 1 実験結果

(ひび割れ幅 0.2mm, 視準角度 80 度)

全体をまとめると表 - 4 , 表 - 5 のようになる . 全ケースで規格値内に収まり , 補正計算が適正に行われていることが確認できた .

表 - 4 実験結果のまとめ (ひび割れ幅 0.1mm)

距離 (m)	ひび割れ幅の誤差範囲 (mm)	左記における最大絶対値誤差 (mm)
10	-0.02 ~ 0.02	0.02
20	-0.02 ~ 0.03	0.03

表 - 5 実験結果のまとめ (ひび割れ幅 0.2mm)

距離 (m)	ひび割れ幅の誤差範囲 (mm)	左記における最大絶対値誤差 (mm)
10	-0.04 ~ 0.01	0.04
20	-0.04 ~ 0.01	0.04

また , 室内試験確認後 , 屋外で実験を行ったが , 室内試験と同様 , 0.1mm , 0.2mm についても補正計算が确实に行われ , 規格値に収まっていることが確認できた .

6 . 青森中央大橋での実施例

R C 構造物の計測事例として , 青森中央大橋の事例を述べる .

青森中央大橋は , 青森市中央部の J R 東北本線の青森操車場を跨ぐ橋長 582m , 4 車線 , 1986 年供用開始の青森県所管の長大道路橋である .

従来の方 法であると , 操車場内に大規模な仮設足場を多数組んで , 橋脚のひび割れ状況を調査する必要が生じる . しかし , 本技術によれば足場を必要とせず , J R の列車運行にも支障せず , 安全かつ経済的であることから , 3 次元レーザースキャナの図面作成と合わせ実施した .

図 - 2 2 にひび割れ測量状況を示す . 3 D レーザー

スキャナと本測量器は , データを測量座標で管理しているため , 各器械の測量座標系を統一すれば , 同じ画面上 (図 - 2 3) に表現することが可能となる . これから , 平面図等のひび割れ図 (図 - 2 4) を作成できる . 従来のように足場を組んで作業を行えないような場所でも 4 日間で , 安全かつ経済的に , 必要とされる品質で橋脚のひび割れ点検を実施できた .



図 - 2 2 ひび割れ測量状況

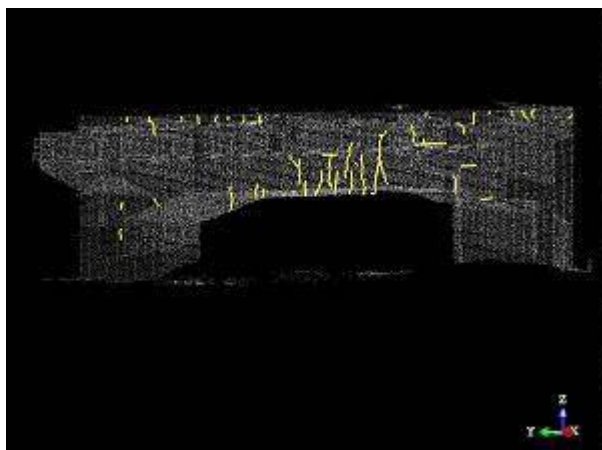


図 - 2 3 3 D レーザースキャナのデータと重ね合わせたひび割れ状況

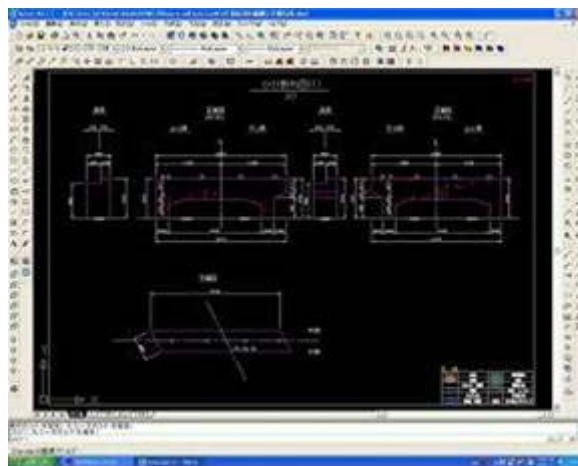


図 - 2 4 作成ひび割れ図

7. おわりに

本研究では、モデル実験による精度の検証と現場における適用事例を示したが、本システムはこの事例以外にも使用され、多様な条件・環境での使用実績を蓄積しつつある。今後、さらにデジタル写真画像の利用や自動追尾機能等の開発を行い、システムの改善を図っていくとともに、得られたひび割れ計測データを用いた構造物維持管理システムの構築を図りたいと考えている。

謝辞：本研究を進めるに当たって、京都大学大学院工学研究科小林潔司教授、青森県の山本昇氏、NTTインフラネット（株）の松永広氏、竹岡雅裕氏、関西工事測量（株）の藤田誠二氏、中越秀樹氏、木寺浩紀氏、中尾怜史氏、関西工事測量（株）のグループ会社、（株）ソキアなど多くの方に助言、協力を頂いた。この場を借りて御礼を申しあげる。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル，pp.102-104，2007年1月，丸善
- 2) 鉄道総合技術研究所編：トンネル補強・補修マニュアル，p.115，2000年10月
- 3) 橋梁マネジメント研究会編：道路橋マネジメントの手引き，2004年8月，（財）海洋架橋・橋梁調査会
- 4) 村井俊治編：測量工学ハンドブック，2005年6月，朝倉書店
- 5) (社)土木学会トンネル工学委員会，技術小委員会編：トンネルの維持管理，2005年7月，丸善

(2007.5.18受付)