コンクリートのひび割れおよび剥離・剥落の 点検技術の評価に関する研究

松村 隆爾¹・杉崎 光一²・鎌田 敏郎³・松田 浩⁴

¹非会員 科学技術振興機構イノベーション拠点推進部 (〒102-0076 千代田区五番町7番地 K's五番町)

E-mail: ryuji.matsumura@jst.go.jp

²正会員 株式会社BMC研究開発部 (〒261-7125 千葉市美浜区中瀬2-6-1 WBGマリブウエスト25 階)

E-mail: sugisaki@hashimori.jp

³正会員 大阪大学大学院教授 工学研究科地球総合工学専攻 (〒565-0871 吹田市山田丘 2-1)

E-mail: kamada@civil.eng.osaka-u.ac.jp

⁴正会員 長崎大学大学院教授 工学研究科システム科学部門 (〒852-8521 長崎市文教町1-14)

E-mail: matsuda@nagasaki-u.ac.jp

インフラ維持管理の新技術活用では、維持管理に関わるニーズと技術開発のシーズとのマッチングが重要となる。本論文では、コンクリート構造物の維持管理技術開発について、ひび割れや剥離・剥落などを検知する技術の評価する方法を検討する。検査機器の性能評価のためには定量的な指標が必要であり、性能の優劣を評価可能な方法が必要である。本手法では、国内外の目視検査等のガイドラインや技術基準等を根拠として、整合的で明快な評価基準の策定フローを構築した。また、フローに基づく具体的な評価方法例として、評価項目に対して誤検知率と未検知率を記載するようにし、合わせて計測スピードや効率についても評価可能な方法とした。評価方法を明示することで、ユーザーとメーカーが一体となった高付加価値で信頼性の高いシステム開発が期待される。

Key Words : concrete crack, exfoliation, monitoring, equipment specification

1. はじめに

点検の基本は目視であるが、高度化のための機器の利用が検討されており、目視点検のサポートや、点検結果の定量化による客観性の確保、もしくは記録を容易にするなどの目的が期待されている¹⁾⁹⁾。また、高所、狭隘箇所など目視点検が困難な箇所への補助的な利用も要求されている。これらの点検機器にはセンサが内蔵され、人間の五感を補完してサポートするなどの役割が期待される。センサを人間社会において活用する研究の蓄積は、ナレッジマネジメントといった熟練技術の代替などで検討され⁹⁾、また自動車運転などで暗闇での人間の視界をサポートするといったような利用が挙げられる⁹⁾。センサは必ずしも一種類である必要はなく、多種類のセンサをフュージョン(融合)する、センサフュージョンの研究等も蓄積されてきた⁷⁾⁸⁾。インフラ点検におけるセンサ技術の活用としてわかりやすいものとしては、打音点検をセンサにより代替するといったことが考えられる。打音検査はまさに人間の五感をフルに活用した検査方法であり、

計測機で数値化して完全に代替することは難しいと考えられるが、点検員をサポートする、もしくは点検員がより注視すべき箇所を選ぶ(スクリーニング)補助的な役割等が考えられている。

点検において、構造物の性能をユーザーが満足する様に直接計測するような機器の開発は困難を極めている。点検をサポートするような機器の開発過程においては、ユーザーがセンサに期待する性能項目が明確でないことも課題として挙げられ、メーカーが提示する仕様(スペック)との間のマッチングが重要であると考えられている⁹⁾¹⁰⁾。マッチングは、構造物の健全度評価のための必要精度を確保する、もしくは機器の精度に応じた利用方法を考えるなど、持続的な開発を行う、もしくは開発へのフィードバック効果を高める上で重要である。土木構造物の設計においては、仕様規定から性能規定へと変更されているが、センサの活用においてもメーカーが作成する仕様ではなく、ユーザーが利用するニーズに基づいて、開発の段階からセンサに要求する性能を提示することが考えられる。性能を提示する上では、定量的な指標が必

要であり、今まで暗黙知的に利用されてきた仕様規定に対する知識を、いかに形式知として明示化できるかがミスマッチを解消する上で重要となる。機器の評価をするための仕様としては、性能を満たす、満たさないという観点のみの評価ではなく、満たさないとしても、性能の優劣を評価できるような仕様が必要である。

構造物の性能を評価する場合は、対象構造物ごとに性能項目の評価目安は相違しており、また点検基準やマニュアル等もそれぞれに存在する。このため、対象構造物ごとに仕様を検討することが考えられる。また、適用する点検の種類により機器に要求される仕様も相違すると考えられる。さらに、機器による作業効率性も機器の有効性を評価する上で重要な指標となる。

本研究の構成は、2.において、コンクリートひび割れについて基準等を調査し検知すべきひび割れ幅の目安を検討する。3.で剥離・剥落について基準や近年の剥落事例等から検知すべき目安を整理する。4.で目安に対してどのように機器の性能を評価するかのフローを提案し、具体的な事例で説明をする。5.で結論を述べる。

2. ひび割れ

(1) コンクリートのひび割れと評価

a) コンクリートのひび割れ

コンクリート構造物では様々な原因でひび割れが発生する。トンネルのような無筋コンクリートでは幅の大きなひび割れが発生していることは背面圧などの影響が懸念され、たとえば、有効巻厚の不足箇所では突発性崩壊につながる可能性もあるため、構造安全性の観点から、ひび割れの有無を把握することが大切である。橋などの鉄筋コンクリートでは、ひび割れが発生することで、水、塩分等を浸透させ、炭酸化等が進展すればさらに鉄筋腐食が進行し、腐食による鉄筋の膨張がさらにひび割れを進行させる。このため、幅の小さいひび割れでも問題となる。道路橋鉄筋コンクリート床版では、輪荷重の繰返しによりひび割れが進展し、疲労による押し抜きせん断破壊に至るケースもあり、床版下面でのひび割れの進行状況を把握することは極めて重要である¹³⁾。

b) コンクリート表面の計測と記録

コンクリート構造物の点検では、目視検査を主体として、ひび割れの評価はチョークなどで印をつけて展開図として写真撮影をして記録、また浮き等の変状に対しては打音検査を行っているのが現状である。点検の高度化のための機器の開発が試みられているが、実運用されているものから研究開発段階のものまで様々である¹⁴⁾。ひび割れを評価するためには、コンクリート表面の状態を

記録する必要がある¹⁴⁾¹⁷⁾。表面の状態を記録する方法の一つとして、レーザー（反射）法は、レーザー光線を壁面に照射し、反射光の強弱を高感度の光センサで検知し、専用のデータ処理装置で精密画像に再生してひび割れ調査をする方法である¹⁸⁾。それに対して連続走査画像撮影装置は、デジタルカメラで覆工全周を撮影して、画像処理でひび割れを調査する方法である¹⁹⁾²⁰⁾。その他に、トンネルの掘削の際の計測項目として内空変位の計測があるが、維持管理においても定期的な計測から内空変位速度[mm/年]を評価して、覆工の安定性を評価する方法がある。内空変位の計測においては、内空変位計や精密写真測量を行う方法があるが、いずれも車線規制が必要となる。それに対して、3次元レーザースキャナ、いわゆるレーザープロファイラを利用して覆工全体の三次元座標を計測し面的な形状の計測を行う方法がある²¹⁾²²⁾。覆工の三次元計測と画像計測を併用することで、ひび割れの段差まで把握することが可能となる。また、段差などを評価する方法としては舗装の点検における路面性状測定車があるが、ひび割れの検知はトンネル覆工と同様 CCD カメラの画像を利用しており、レーザー変位計等を利用した路面の平坦性評価も行われている²³⁾。

これらの技術の適用方法は対象物によって相違するが、トンネルの覆工表面を評価する場合は、走行車両を利用して連続計測を行う方法が開発されている。橋梁では、橋下からのデジタルカメラによる撮影が一般的であるが、高所や河川上の撮影においては、マルチコプター等を利用して画像撮影を行うことが検討されている。

(2) ひび割れ幅

ひび割れを評価する技術の検知精度において重要なパラメータとしてひび割れ幅が挙げられる。撮影条件が同じであれば、ひび割れ幅が大きいほど、検知することが容易となると考えられる。このため、検知可能なひび割れ幅と検知が必要なひび割れ幅との関係を把握する必要がある。土木学会が制定しているコンクリート標準示方書（設計編）²⁴⁾では、耐久性に関する照査として、コンクリート表面のひび割れ幅が、表-1 に示すような鋼材の腐食に対するひび割れ幅の限界値以下であることが定められている。ひび割れ幅が限界値以下であることが、中性化や塩害等に対する照査の前提となっている。限界値はかぶりにより算出されるが、構造物の環境条件、設計耐用期間、コンクリートの品質によって本来相違することが挙げられており、その他、乾燥収縮によるひび割れ、ひび割れが外観上特に問題となる場合等の配慮がなされている。一方、日本コンクリート工学会のコンクリートのひび割れ調査、補修・補強指針²⁵⁾において、ひび割れが鉄筋腐食や耐久性の低下に影響することに対して、鋼

表-1 鋼材腐食に対するひび割れ幅の限界値 (mm) ²⁹⁾

ひび割れ幅の限界値	
0.005c	
※上限は0.5mm以下とする	
c: かぶり (mm)	

表-2 鋼材腐食の観点からのひび割れの部材性能への影響 ²⁹⁾

環境条件		塩害・腐食環境下	一般屋外環境下	土中・屋内環境下
ひび割れ幅 w(mm)	0.5<w	大	大	大
	0.4<w≤0.5	大	大	中
	0.3<w≤0.4	大	中	小
	0.2<w≤0.3	中	小	小
	w≤0.2	小	小	小

表-3 防水性・水密性についてひび割れの部材性能への影響 ²⁹⁾

環境条件		常時水圧作用環境下		左記以外	
部材厚(mm)		180未満	180以上	180未満	180以上
ひび割れ幅 w(mm)	0.2<w	大	大	大	大
	0.15<w≤0.20	大	大	大	中
	0.05<w≤0.15	中	中	中	小
	w≤0.05	小	小	小	小

表-4 最大ひび割れ幅に着目した損傷程度 ²⁹⁾

程度	一般的状況
大	ひび割れ幅が大きい (RC構造物 0.3mm以上, PC構造物 0.2mm以上)
中	ひび割れ幅が中位 (RC構造物 0.2mm以上 0.3mm未満, PC構造物 0.1mm以上 0.2mm未満)
小	ひび割れ幅が小さい (RC構造物 0.2mm未満, PC構造物 0.1mm未満)

表-5 荷重載荷時鉄筋コンクリート許容ひび割れ幅基準 ³⁰⁾

Exposure condition	Crack width	
	in	mm
Dry air or protective membrane	0.016	0.41
Humidity, moist air, soil	0.012	0.30
Deicing chemicals	0.007	0.18
Seawater and seawater spray, wetting and drying	0.006	0.15
Water retaining structure	0.004	0.10

材腐食の観点 (表-2), 防水性・水密性の観点から (表-3) 評価の目安が示されている。

点検・検査基準に関しては, 国土交通省の橋梁点検基準 ²⁹⁾³⁰⁾においてひび割れの評価は, 損傷評価基準として「ひび割れ」の項目があり, コンクリートを利用した部材に対して「最大ひび割れ幅」と「最小ひび割れ間隔」

表-6 床版ひび割れに関する損傷評価

状態	損傷パターン	程 度
a	損傷なし	
b	1方向ひび割れ	間隔 1m 以上, ひび割れ幅 0.05mm 以下
c	1方向ひび割れ	0.1mm 以下が主
c	格子状ひび割れ	格子大きさ 0.5m 以上 ひび割れ幅 0.1mm 以下が主
d	1方向ひび割れ	ひび割れ幅 0.2mm 以下
d	格子状ひび割れ	格子大きさ 0.5m~0.2m ひび割れ幅 0.2mm 以下が主
e	1方向ひび割れ	ひび割れ幅 0.2mm 以上, 部分的な角落ち
e	格子状ひび割れ	格子大きさ 0.2m 以下 ひび割れ幅 0.2mm 以上, 部分的な角落ち

表-7 ひび割れ進行の有無が確認できない場合の判定の目安例

対象箇所	部位区分	ひび割れ						判定区分
		幅			長さ			
		5mm以上	3-5mm	3mm未満	10m以上	5-10m	5m未満	
覆工	断面内			○	○	○	○	I～IIa
			○				○	IIa
			○			○		III
			○		○			III
		○					○	IIb～III
		○				○		III
		○			○			

表-8 ひび割れの進行性が確認された場合の判定の目安

対象箇所	部位区分	ひび割れ				判定区分
		幅		長さ		
		3mm以上	3mm未満	5m以上	5m未満	
覆工	断面内		○	○	○	IIa-III
		○			○	III
		○		○		IV

に着目した評価となっており, 表-4に示すように RC 構造物と PC 構造物で相違する。鉄道に関してはコンクリート構造物の維持管理標準 ³⁰⁾において, 重大な変状として, 「RC 橋脚において, 幅 0.5mm 以上のひび割れが発生し, 進行しており, 落橋の恐れがあるもの」という記載がある。また, 変状判定例として, ひび割れ幅が 0.2mm 程度を超えるものが多数発生, 0.2mm 以下のものが多数発生といったことで判定が相違する。海外の基準としては, FHWA の Bridge Inspector's Reference Manual ²⁹⁾では, 表-5に示す ACI の設計基準 ³⁰⁾を目安にした評価の記載がある。床版の点検では, 橋梁定期点検要領および道路橋定期点検要領

表-9 ひび割れ(進行性あり)

箇所	ひび割れ		判定区分	方向	段差	圧ざ	密度 (スパン)
	幅	長さ					
覆工, 坑門	3mm 以上	5m 以上	3A-II～ 2A-II	方向：輪切り方向の場合 →1ランク下げる			
		5m 未満	2A-II～ A-II	段差：段差を伴う場合 →1ランク上げるか上位ラン クを採用			
	3mm 未満	5m 以上 5m 未満	A-II	圧ざ：圧ざがある場合 →3A-II			
				密度：0.3～0.5mm以上のひび 割れ密度が20cm/m ² の場合 →1ランク上げるか上位ラン クを採用			

表-10 ひび割れ密度に関する補修ランク

補修ランク	I	II	III
アーチ部 ひび割れの状況	ひび割れが広い範囲で密集している、あるいは圧ざ、うきによりコンクリート片落下の危険がある	ひび割れが全域に発生し、将来コンクリート片落下の危険がある	一般に見られるひび割れに加えて部分的なひび割れ集中箇所がある
側壁部 ひび割れの状況	ひび割れが広い範囲で密集している、あるいは圧ざ、うきによりコンクリート片落下の危険がある	ひび割れが全域に発生し、局所的に剥落の危険性がある	一般に見られるひび割れに加えて部分的なひび割れ集中箇所がある
ひび割れ密度の目安	50cm/m ² 以上	20~50cm/m ²	20cm/m ² 以下

において、損傷評価基準として「床版ひび割れ」の項目があり、評価基準は表-6 のようであり、ひび割れ間隔やひび割れの方向が橋軸直角方向一方向のみか、あるいは格子状になっているか等の性状で損傷程度が相違するが、ひび割れ幅としては、0.05mm を判定する必要がある。高速道路橋の点検においては、ひび割れのみでなく、浮きや剥離の影響を合わせて評価する。

トンネルの点検では、道路トンネル定期点検要領³⁹⁾においては、ひび割れ幅の値の目安としては、定期点検によって、進行性が確認されていない状態で表-7、さらに調査を行って進行性が確認された場合に表-8 が目安となる。橋桁等の一般的な RC 部材の場合と比べると 1桁大きな値であり、これは、覆工が無筋構造物であり、ひび割れが鉄筋の腐食等を誘発する恐れがなく、また過去の実績等から覆工のひび割れが相当進行してもトンネル構造が崩壊することはないと想定されることがある。

トンネルの補修補強の判断においては、上記のような耐荷力にかかわる判定だけでなく、剥落などの問題がある。このため特に国土交通省では総点検実施要領(案)【道路トンネル編】³⁹⁾を定めており、ブロック化したひび

割れにおいて判定例等を示している。平成 13 年 7 月発行の近畿地方整備局版の道路トンネル点検・補修の手引き³⁹⁾においては、表-9に示すようなひび割れ密度による判定方法が記載されている。高速道路総合技術研究所が発行している保全点検要領³⁹⁾があり覆工の評価では「利用者の安全(第三者等被害)に対する安全」と「機能面に対する判定」(要求性能に対して、特に構造的な変状に対して健全性を把握し保持するための評価)を分けて評価している。現在の基準は H27 年に発行された基準であるが、H18 年の基準には、耐荷力を回復する必要はないが覆工表面に著しいひび割れが発生している場合、あるいは補強工と同時にひび割れ補修を行う場合には、表-10 に示すようなひび割れの状況と密度により補修ランクを定める、という記載がある。ひび割れ密度の算出においては、幅が 0.2~0.3mm 程度以上のひび割れを抽出することになっている。H27 年の基準では、トンネル詳細点検の方法として、覆工表面画像の取得やひび割れ展開図の作成方法が示されており、展開図の評価方法として利用されていると考えられる。健全度評価方法は定性的な評価もしくは評価点による方法であり、ひび割れ幅についても評価の際の参考として数値が記載されている。また、変状判定例として、ひび割れ幅が 0.2mm 程度を下限とした評価であり、1.5mm, 3.0mm, 5.0mm を区切りとしている。また、設計要領第三集トンネル(トンネル本体保全編)の目安等を行う旨記載がある。鉄道トンネルについては、鉄道構造物維持管理標準³⁹⁾においては、健全度 A~S の判定を行うとともに、別途剥落に対する健全度判定 α~γ を行うことになる。

3. 剥離・剥落

(1) コンクリートの剥離・剥落と評価

a) コンクリートの剥離・剥落

コンクリート剥落の原因として、コールドジョイント、初期ひび割れ、押し抜きせん断破壊などが原因とされるが、鉄筋コンクリートでは、鉄筋腐食によるかぶりコンクリートの剥落が考えられている³⁹⁾⁴⁰⁾。どのような原因にしても剥落が生じる際にはコンクリートに浮きが生じる。浮きは、表面コンクリートが内部コンクリートと一体性を失っている状態であるが、覆工コンクリートの背面空洞、豆板等の施工不良が原因によるひび割れの貫通で生じるものもある。

b) コンクリートの剥離・剥落検知

剥離・剥落を評価するための非破壊検査方法は様々な方法が開発されているが⁴⁰⁾⁴¹⁾、打音による方法は浮き自体を検知するため、浮きの原因がどのようなものであつて

図-1 落下コンクリート片の寸法
(上: 縦軸 70,000cm³ 下: 縦軸 500cm³)

図-2 落下コンクリート片の大きさと発生頻度

も有効な調査方法であり自動化が模索されてきた^{43,44)}。また、浮きの原因となる空隙を打音により検知する方法も検討されている⁴⁵⁾。赤外線サーモグラフィを利用した調査方法は、コンクリートの表面温度の差から浮きを検知する方法であり、熱源を利用するアクティブ赤外線サーモグラフィ法も開発されている^{46,47)}。また、コールドジョ

イント等が表面近くにあれば検知することも可能である。電磁波レーダ法は、ひび割れや空隙を検知する方法であり、浮き自体を検知するわけではない^{48,49)}。適用範囲はトンネル覆工などの無筋コンクリートであるが、浮きが生じる前の空隙をより予防的に評価可能である。電磁波の入力に際して、どの程度接近できるか、また入射角等により測定精度が相違するが、覆工厚に対する深さと空洞の大きさによって検知精度が相違する。レーザー（加振）法では、高出力のパルスレーザーを利用してコンクリート表面を加振し、コンクリート表面の振動特性を評価して内部欠陥を検知する方法である⁵⁰⁾。その他にも、自然電位法といった、コンクリート内の鉄筋腐食の可能性を非破壊で評価する方法も利用されている⁴²⁾。

浮きを検知する場合には、どのような原因であれ浮きが生じている範囲や深さが重要なパラメータとなる。打音の方法などの検討では、打音の特性と浮きの寸法には相関があると考えられているように⁴⁵⁾、剥離が生じた際の落下物の大きさといったリスクの観点からも浮き範囲の大きさは重要と考えられる。浮きの範囲が広いほうが打音や赤外線サーモグラフィ法により検知することが容易であると想定され、また範囲が広く深いほうが剥離した場合のリスクが高いと想定される。そのため、検出すべき最小の寸法を想定しておくことがよいと思われる。

(2) 検出寸法の検討

検出寸法の検討のため、過去のコンクリート剥落の事例について道路および鉄道事業者の報告を整理し、剥落片の大きさについて整理した。道路事業者としては、基本的に高速道路事業者（NEXCO三社）で公表されているもの、およびインターネットで調査可能な自治体の事例を整理する。鉄道管理者に関しては鉄道構造物の維持管理に関する基準の検証会議において報告された、鉄道構造物における剥落事象の報告一覧（平成25年4月1日～平成26年8月31日）⁵¹⁾を利用した。図-1には落下したコンクリート片の寸法（落下事象における最大のコンクリート片の体積）を整理した。なお、上図では落下した破片の全体数がわかるように縦軸の大きさを70,000cm³とし、下図では、小さな寸法の破片の分布がわかるように縦軸を500cm³とした。鉄道のデータに比べて、高速道路の方が小さい破片まで報告されていることが見て取れる。図-2には寸法と発生頻度を整理した。寸法が小さいコンクリート片の検知が難しいと仮定し、寸法と発生比率の関数に本データを利用すれば、90%程度以上の検知を想定した時、体積100cm³程度を最小検出体積とできる。また、空隙（空洞）の表面からの距離と剥離の可能性との相関関係は決まらないが、空隙が大きいほど剥離した際のリスクは高くなると想定される。そのため、表面から深い

表-11 高度技術の適用場面³⁹⁾

高度技術		対象とする変状							適用段階			適用目的	
		ひび割れ幅		ひび割れ深さ	浮きはく離		背面空洞	内空変位	日常点検	定期点検	調査	利用者被害防止	構造的な変状
		検出可能幅			検出可能剥離厚								
		0.5mm以上	1.0mm以上		5mm以上	5mm以下							
1	レーザー法	◎	◎							○			○
2	連続走査画像撮影装置		◎							○			○
3	赤外線+CCDカメラ		◎			◎				○		○	○
4	電磁波法（レーダー法）						○				○	△	○
5	打撃音法					△	△				○	○	○
6	音響弾性波法				◎		△				○	○	○
7	超音波法			○	○						○		○
8	精密写真測量技術	○						◎		△	○	△	○

図-3 評価フロー

表-12 点検基準等から目安となるひび割れ幅

対象構造物		損傷判定の開始ひび割れ幅[mm]	判定が変わるひび割れ幅[mm]
桁	RC	02	03, 05
	PC	0.1	02
床版		005	01, 02
トンネル	機能	02	1.5, 3, 5, 10
	利用者安全	03 (ひび割れ密度の計算のため)	05

剥離を検知できる方が望ましく、最小寸法に対して、コンクリートの深さ方向の検出限界を対象構造物や検知方法ごとに技術的判断で提示させるのがよいと考える。その際には、鉄筋コンクリートが対象であればかぶりが目安となる。また、技術的には、文献 36)では、高度技術の

適用場面について表-11 のように整理しており、検出方法によって検出可能剥離厚等の目安を提示させることができると考える。

4. 評価方法

(1) 評価フロー

検査・点検標準やひび割れ補修・補強に対する基準などを参考にすると、防水性・水密性などを考慮するとかかなり微細なひび割れを検知する必要がある。しかし、点検・検査基準においては、2(2)で整理したように、対象とする構造物ごとに変状評価における目安は異なっており、各基準の値を利用して、対象構造物ごとにひび割れ幅を表-12 のように整理することができる。ひび割れの評価は当然ひび割れ幅だけでなく、ひび割れ間隔、ひび割れ発生位置、ひび割れパターンによっても判定が相違する。トンネル点検に関して、文献 52)では、圧縮していない画像の自動解析、圧縮画像の机上目視、現場での目視を、「ひび割れ展開図」、「ひび割れ密度」の比較で行っている。ひび割れ幅については、圧縮した画像の連続印刷によっても 0.5mm 以上のひび割れが抽出できた事例を示すとともに、剥落の観点から 0.5mm 以上のひび割れを抽出する重要性が記載されている。ひび割れと構造物の健全度や剥離の可能性との関係について整理され、ひび割れの長さ、幅、方向性などを指標とした、ひび割れ指数(TCI)との関係も整理されているが³⁹⁾³⁹⁾、自動計測を想定した場合には、撮影環境や解析の精度、点検者の技量等により未検知(ひび割れをひび割れと認識できない)、誤検知(ひび割れでないものをひび割れとして認識してしまう)が想定される。誤検知や未検知の評価指標としては、「ひび割れ幅別のひび割れ累計長(m)」と「ひび割れ密度(cm/m^2)」を利用している³⁹⁾。文献 56)では、トンネル覆工表面画像の使用実績の事例から、覆工画像

表-13 鉄道トンネルの覆工表面撮影・記録システム仕様例³⁹⁾

手法	主な仕様
連続走査画像撮影装置	15km/h (単線), 27km/h (複線片側)
	10km/h, 幅 1mm のひび割れ検出
	10km/h 程度, 0.5-1mm の解像度
レーザー法	4-7km/h 以下, 幅 0.5mm のひび割れ検出
	28-17km/h, 幅 0.5mm のひび割れ検出
電磁波 (レーダー法)	最高 35km/h

表-14 トンネル定期点検における積算基準 (10,000m²当り)³⁹⁾

項目		主任技師	技師 A	技師 B	技師 C	技術員
点検ひび割れ密度 c (m/m ²)	$0 \leq c \leq 0.1$	—	—	50	50	70
	$0.1 < c \leq 0.2$	—	—	75	75	105
	$0.2 < c \leq 0.3$	—	—	100	100	140
	$0.3 < c \leq 0.4$	—	—	125	125	175
	$0.4 < c$	—	—	150	150	210

計測の基準を「計測速度 50km/h 以上, 覆工表面画像出力精度 ; 0.5mm 程度のひび割れ幅を認識」とした場合, 未検出が 10%以上確認された, といった表現が利用されている。

以上の検討から, 本評価基準においては, 対象構造物ごとに点検基準を整理し, 表-12 のように基準となるひび割れ幅を決めた。そして図-3 にフローを示すが, 評価するひび割れ幅ごとに, ひび割れをトレース (展開図) できる技術, ひび割れ総延長を算出できる技術, ひび割れ密度が算出できる技術として整理した。

(2) 評価に関わる項目

コンクリートの非破壊検査技術を比較する場合, 検査項目に対して検査精度と合わせて, 検査能力, 検査費用などを評価する必要があるが, 本研究では, 図-3 の評価を行う上では, 点検種類と作業効率が影響すると考えているため以下で検討した。

a) 点検種類

点検要領²⁹⁾³⁰⁾³⁷⁾によれば, 定期点検により発見された変状の状況や原因を把握して対策の必要性や緊急性を判断するために調査が位置付けられている。表-11 では, トンネル構造物の点検において機器を適用する際に, 適用段階という項目で, 「日常点検」, 「定期点検」, 「調査」を挙げており, 段階的な評価をしている。また, 高速道路の保全基準では, 定期点検における詳細点検を, 点検 A, 点検 B に分け, 点検 A においてレーザー光等を用いた計測手法による覆工表面画像による方法を位置付けている。評価結果において判定の悪い箇所等に対して近接目視と打音を基本とする点検 B を適用する方法になっている。このように, レーザー法や連続走査画像撮影装置は,

悪い箇所を抽出するスクリーニング点検として利用され, 電磁波レーダ法や打音法などで詳細調査を行うといった場面が想定されている。また, 文献 50) では, レーザー加振法を点検で利用する場合の考え方として, 打音前のスクリーニング方法としており, 点検種類に応じて機器の種類が検討されている。

鉄道構造物の点検 (検査)³⁹⁾においても, 全般検査で変状がある構造物に対して個別検査を実施するという体系になっている。ただし, 剥落に対する点検は全般検査において目視で必要と判断された箇所には打音検査を実施し, 剥落に対する判断を行うようになっている。機器に関しては, 覆工表面を連続的に撮影, 記録する方法として記載があり, 目視観察・スケッチを補完する技術として位置づけられているが, 利用方法としては各事業者に任されている状況である。

トンネル点検を例にとれば, 地山の状態や施工方法 (施工時期) 等である程度変状の発生を予測でき, 材料の特性を確認することでも悪い構造物のスクリーニングは可能である。橋梁点検も同様に年代や施工方法, また現状として支点部の変状の有無といった個々の構造物の変状との関係からひび割れの発生を類推する等の判断であろう。このような経験に基づいた点検をサポートするという観点から機器の適用を検討する必要がある。本論文では, スクリーニングのための点検とその結果を利用した詳細調査という分類をした⁵⁾。

b) 点検効率

検査手法を実務に適用する上で, 最も重要視されるのが, 検査精度と検査時間と考えられている³⁹⁾。一般的に, 検査精度と検査時間は互いにトレードオフの関係がある。コンクリートのひび割れを調査し記録する図-3 のフローを考えると, 対象がトンネルで検測車を利用することを想定すれば, 車両の走行速度は重要な要素と考えられる。鉄道維持管理標準では, 覆工表面を連続的に撮影・記録するシステムの仕様例が表-13 のように整理されている³⁹⁾。また, 文献 36) では, 高度技術の点検への適用にあたって, 点検による交通規制による渋滞=社会損失として, 点検費と合わせてコストパフォーマンスを検討している。車両の速度に対して, ひび割れを解析する速度については, リアルタイムである必要はないが, 記録媒体の容量とは関係する。走行速度や解析速度を総合的に評価する指標としては, 覆工面積に対する検査時間で評価することが考えられる。例えば, トンネル覆工に電磁波レーダ法を適用し, トンネル覆工の半断面が 200m/h で計測できる, といった検討事例がある⁴⁰⁾。このような事例を参考に, ひび割れ検知などの技術では, 表面積をどのくらいの時間で評価可能か, Hour/m² (トンネルは Hour/m も利用) を指標とできると考えた。もう一つの評価指標としては,

表-15 橋梁定期点検における積算基準(10橋当たり)⁹⁾

標準 幅員	橋長	技師 A	技師 B	技師 C	技術 員
8m 程度	2以上5以下	—	3.1	3.1	3.1
	5を超え10以下	—	3.8	3.8	3.8
	10を超え15以下	—	4.4	4.4	4.4
12m 程度	15を超え20以下	—	6.4	6.4	6.4
	20を超え30以下	—	7.5	7.5	7.5
	30を超え50以下	—	9.1	9.1	9.1
	50を超える	—	9.1	9.1	9.1

図-4 ひび割れ密度と作業量の関係

図-5 点検精度と価格

表-14 に示すような積算基準への適合の観点から、評価面積あたりの人工の考え方があろう (人工/m²)。積算基準においては、ひび割れ・漏水調査や覆工背面空洞調査および解析といった詳細調査などについても基準があり、点検車の機械経費についても決められている。橋梁に関する積算基準は表-15 のようになるが、幅員や橋長を参考に作業効率を検討することができる。

表-14 のデータについて図化したものが図-4 であるが、ひび割れ密度が大きい対象ほど作業時間がかかると想定されているが、機械の場合はひび割れ密度に対してそれほど作業量は増加しない可能性も考えられる。文献 52) では、点検員の技術水準と点検の精度について検討している。ひび割れ密度に関して、技師 B の点検結果を正とした誤差率として単価との関係を示したのが図-5 である。誤差率の求め方は、技師 B がひび割れ密度 x とし、技師 C が y とした場合、 $(x-y)/x$ で誤差を算出している。あくまでも一つの事例に対する結果ではあるが、点検の精度は作

業員の質と関連があることが確認できる。

(3) 評価事例

ひび割れを評価するためのシステム性能は表-16 のように整理できる。対象構造物ごとに点検種類を考慮して最小ひび割れ検出幅を決め、未検知率と誤検知率を記載する仕様となっている。また、作業効率性を評価するために、表-17 に Hour/m² や人工/m² を記載する。さらに剥離・剥落に関しても未検知率 (誤検知率) を表-18 に、作業効率を表-19 に示すように評価する。最小検出剥離寸法に対する未検知率と誤検知率を記入する際には、表面からの検出深さについて検出限界を対象構造物や検知方法ごとに技術的判断で記載する。剥離・剥落の発生過程を考えれば、ひび割れが閉合しかつその内部に空洞がある場合に剥離・剥落が生じると考えられており、ひび割れを評価する機能と剥離・剥落を評価する機能を融合するといった機能の融合に対しても評価する必要がある。

本論文では参考として未検知率 (誤検知率) には値を、作業効率にはランク付けの a-e の記号を記載した。あくまでも比較のための参考であるが、数値は小さいほうがより厳しい精度が要求されていることになる。作業効率のランクは a であれば時間や人工が多くなることを e であれば少ない時間や人工で作業可能であることを示している。

記載された誤検知率や未検知率に対して性能が出ているかを評価する方法としては、答えとなる近接目視検査結果との比較を想定している。評価方法は表-20 に示すように、機器の開発を、画像撮影 (ハード) とひび割れ幅算出 (ソフト) に分けた場合に、両方を開発したもの、ハードのみ、もしくはソフト開発のみでも評価できるように検討した。

4.(1) で挙げた文献 56) の事例について本手法で評価することを考えると、トンネル覆工を対象として剥離・剥落箇所に対して覆工検測車を適用した場合となる。表-18 について、最小検出はく離寸法を決めた上で、詳細点検で、誤検出率 11% (未検出率 9%) という記入ができる。作業効率に関しては、計測速度 50km/h により行ったとあるため、本手法では Hour/m で考え、1/50000 (Hour/m) を記入できる。上記のように、本手法を適用することで、系統的な評価が可能となる。ただし、すべての技術に対して評価表のすべてを記載する必要はなく、適宜取捨選択することで技術の相対評価に利用することが想定されよう。

5. 結論

本研究では、維持管理に関わるニーズと技術開発のシ

表-16 ひび割れ検知仕様の記入例 未検知率と()内は誤検知率% ※数字は参考値

点検種類	評価指標	最小検出ひび割れ幅 (単位 mm)					
		トンネル A 利用者の安全	トンネル B 機能面に対する判定 (構造的な変状)			橋桁	床版
		03 以上	1 以上	2 以上	3 以上	RC : 02 以上 PC : 0.1 以上	0.05 以上
スクリーニング点検	ひび割れ密度 (cm/m ²)	5%(5%)	—			5%(10%)	5%(5%)
	ひび割れ総延長 (m)	10%(10%)	5%(5%)			10%(10%)	10%(10%)
	展開図	20%(20%)	10%(10%)			20%(20%)	20%(20%)
詳細点検	ひび割れ密度 (cm/m ²)	3%(3%)	—			3%(3%)	3%(3%)
	ひび割れ総延長 (m)	5%(5%)	3%(3%)			5%(5%)	5%(5%)
	展開図	10%(10%)	5%(5%)	10%(10%)	10%(20%)		

表-17 ひび割れ検知仕様の記入例 作業効率 Hour/m² or 人工/m² ※どちらで評価するかを選択

点検種類	評価指標	最小検出ひび割れ幅 (単位 mm)					
		トンネル A 利用者の安全	トンネル B 機能面に対する判定 (構造的な変状)			橋桁	床版
		03 以上	1 以上	2 以上	3 以上	RC : 02 以上 PC : 0.1 以上	0.05 以上
スクリーニング点検	ひび割れ密度 (cm/m ²)	d	e			e	d
	ひび割れ総延長 (m)	c	d			d	c
	展開図	b	c	c	C	c	b
詳細点検	ひび割れ密度 (cm/m ²)	c	d			d	c
	ひび割れ総延長 (m)	b	c			c	b
	展開図	a	b	b	B	b	a

※記号は参考で「Hour/m²」の場合 a:長時間⇒e:短時間, 「人工/m²」の場合 a:大人数⇒e:少人数 (点検種類ごとに設定)

表-18 剥離検知仕様の記入例 未検知率と()内は誤検知率%

点検種類	対象構造物	検知可能 深さ (mm)	最小検出はく離 寸法
			90%超過 (100cm ³ 以上)
スクリーニング点検	トンネル	30	10%(20)
詳細点検	トンネル	50	5%(5)

表-19 剥離検知仕様の記入例 作業効率 Hour/m² or 人工/m²

点検種類	対象構造物	検知可能 深さ (mm)	最小検出はく離 寸法
			90%超過 (100cm ³ 以上)
スクリーニング点検	トンネル	30	b
詳細点検	トンネル	50	a

※記号は参考で, 対象構造物や検知深さごとに設定

表-20 未検知率と誤検知率の評価方法

機器による 自動化	目視検査結果との比較方法
ハード&ソ フト開発	デジタル化したデータを比較
撮影ハード 開発	撮影画像を標準ソフトでデジタル化して比較
ソフト開発	標準画像を提供しデジタル化した結果を比較

ーズとのマッチングに着目して, コンクリート構造物の点検技術に対して評価するための方法を検討した. 以下に結論を述べる.

- コンクリート表面やコンクリート内の損傷を検知する技術の評価項目を検討するために, 基準, 点検マニュアルおよび事象事例等を分析し, コンクリート表面を評価する技術に対しては, 対象構造物ごとのひび割れ幅, コンクリート内の損傷を検知する技術は, 剥離コンクリート片の最小検知体積を評価項目とした.
- 評価項目ごとに, 誤検知率および未検知率を記入するような評価方法を提案した. また, 作業効率評価のための指標として, 積算単価と点検精度との関係や, ひび割れ密度と人工数といった積算基準等を参考に, Hour/m²や人工/m²を指標として提案した.

点検において高度な技術を活用するためには, 既存点検との関係など技術の運用方法の検討が重要となる. 運用においては, スクリーニング判断が可能な 1 次診断を行う仕組みなど, 人間の判断を支援もしくは代替するような機構を含めたシステム開発が重要であり, 本論文での定量的な評価項目を入力できるシステムであれば支援可能なシステムであるといえよう.

本研究の一部は総合科学技術・イノベーション会議の戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) 「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術 (PD 藤野陽三)」

(管理法人等：国土交通省，科学技術振興機構[JST]，新エネルギー・産業技術総合開発機構[NEDO]) によって実施された。インフラ維持管理では多くのコンクリート構造物が対象となり，供用環境も含め，ひび割れの評価基準も多種多様である。これを明確にするためにSIPではひび割れに対する検査について調査を行った。本稿は，この調査結果を基に，剥離・剥落および作業効率を含めた評価についても調査検討した結果をまとめたものである。本稿が今後ますます加速されるであろう高度技術を用いた点検法の開発の糧になれば幸いである。

参考文献

- 1) 戦略的イノベーション創造プログラム(SIP)インフラ維持管理・更新・マネジメント技術：<http://www.jst.go.jp/sip/k07.html>
- 2) 土木学会：社会インフラメンテナンス学-1. 総論編，2. 工学編，2016.2
- 3) 藤野陽三，阿部雅人：インフラ維持管理・更新・マネジメント技術の現在と今後，検査技術，Vol.21，No.5，2016.
- 4) 産業競争力懇談会：インフラ長寿命化技術最終報告書，<http://www.cocn.jp/common/pdf/thema59-L.pdf>，2014.3
- 5) 有本卓：機械システムの知能化 I ロボティクスの維持神話，日本ロボット学会誌，Vol.12，No.1，pp.77-83，1994.
- 6) 野村浩，酒井峰一，横山賢一：安全システムの競争力強化に貢献するセンサ技術の動向，デンソーテクニカルレビュー，Vol.21，2002.
- 7) 高橋昭彦，石川正俊：物理ネットワークによる内部表現を用いたセンサフュージョンシステム，計測自動制御学会論文集，Vol.26，No.7，pp.803-810，1990.7
- 8) 弓削信子，木田智史：気象現象の総合的な観測を実現するセンサフュージョンシステム，東芝レビュー，Vol.69，No.12，2014.
- 9) 佐田達典：社会資本の維持管理におけるセンサ利用と標準化，JACIC 情報，29 巻，1 号，2014.7
- 10) 杉崎光一，阿部雅人，奥水聡：慣性計測を用いた鉄道橋モニタリングのためのセンサ性能評価，土木学会論文集 A1，Vol.69，No.2，pp.315-328，2013.
- 11) 藤原忠司，長谷川寿夫，宮川豊章，河井徹：コンクリートのはなし I，技報堂出版，1993.6
- 12) 小林一輔，牛島栄：コンクリート構造物の維持管理，森北出版，2006.12
- 13) 松井繁之：道路橋床版 設計・施工と維持管理，森北出版，2007.10
- 14) 坪谷剛，市口恒雄：インフラ長寿命化における道路橋の新たな点検技術の開発，科学技術動向，No.143，2014.
- 15) 森島啓行，尾高達男：コンクリート構造物と非破壊検査，JR EAST Technical Review，No.2，2003.2
- 16) 小島芳之：トンネル維持管理技術の発展，土と基礎，Vol.54，2006.11
- 17) 林利行，牛場久典：コンクリートのひび割れを遠方から検出が可能な新技術について，建設マネジメント技術，2014.9
- 18) 奥野昇，嶋津幸一，伊藤哲男，馬場弘二，吉武勇，中川浩二：レーザー光線による覆工コンクリートのひび割れ調査法の高性能化，土木学会論文集，No.788/V-67，pp.195-200，2005.5
- 19) 半田兼一，大西有三，西山哲，小山倫史，西川啓一，下澤正道：デジタル画像計測を用いた道路トンネルの健全性評価に関する研究，岩盤力学に関するシンポジウム，2009.1
- 20) 小山哲，丸屋剛，堀口賢一，澤健男：ガボールウェーブレット変換を用いたコンクリートのひび割れ画像解析技術の開発，土木学会論文集 E2，Vol.68，No.3，pp.178-194，2012.
- 21) 石森章之，佐田達典，塩崎正人：投光器の照射角度と陰影の幅を利用したコンクリート壁面の段差高計測に関する研究，土木学会論文集 F3，Vol.70，No.2，pp.1_249-1_256，2014.
- 22) 前田穰，中庭和秀，石澤徹，小山幸則，朝倉俊弘：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，土木情報利用技術論文集，Vol.16，pp.167-174，2007.
- 23) 瀧口純一：高精度 GPS 移動計測装置三菱モービルマッピングシステム，情報処理学会研究報告，Vol.2011-CVIM-176，No.20，2011.3
- 24) 道路トンネルの健全性評価技術に関する研究成果報告書，新都市社会技術融合創造研究会 道路トンネル健全性評価技術研究プロジェクト，2010.10
- 25) 竹内啓五，和田孝史，泉谷泰志，宮下国一郎，厨川弘樹：画像を利用したトンネル内空変位自動視準計測システムの開発，トンネル工学研究論文・報告集，第 9 巻，1991.11
- 26) 遠山貞則，小沼浩，篠崎昌浩，兼平信蔵，大貫薫，幸田信則：路面性状測定車の開発，三菱重工技報，Vol.34，No.2，1997.3
- 27) 2012 年制定コンクリート標準示方書，設計編，土木学会
- 28) コンクリートのひび割れ調査，補修・補強指針 2013，日本コンクリート工学会，2013.
- 29) 橋梁定期点検要領，国土交通省 道路局 国道・防災課，2014.6
- 30) 道路橋定期点検要領，国土交通省 道路局 国道・防災課，2015.6
- 31) 鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編），コンクリート構造物，2007.1
- 32) Bridge Inspector's Reference Manual, FHWA, 2012.2
- 33) ACI Committee 224 : Control of Cracking in Concrete Structures, American Concrete Institute (ACI224-R01), 2001.5
- 34) 道路トンネル定期点検要領，国土交通省 道路局 国道・防災課，2014.6
- 35) 総点検実施要領（案）【道路トンネル編】，国土交通省 道路局，2013.2
- 36) 道路トンネル点検・補修の手引き：近畿地方整備局版 国土交通省近畿地方整備局監修 道路保全技術センター編，2001.7
- 37) 保全点検要領 構造物編，東日本高速道路株式会社，中日本高速道路株式会社，西日本高速道路株式会社，2015.4
- 38) 鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編），トンネル，2007.1
- 39) 宮川豊章：コンクリート品質問題 美田ならぬものへの信頼と疑問，コンクリート工学，Vol.43，No.9，

- pp.57-59, 2005.
- 40)長瀧重義：コンクリート構造物の劣化と維持管理技術，愛知工業大学総合技術研究所研究報告，第6号，2004.
 - 41)鎌田敏郎，内田慎哉：コンクリート構造物の診断における非破壊検査の適用の現状と今後の展望，物理探査，第60巻，第3号，2007.
 - 42)土木研究所，日本構造物診断技術協会編：非破壊試験を用いた土木コンクリート構造物の健全度診断マニュアル，技報堂出版，2003.10
 - 43)小笠原保，持丸修一，田中義光：トンネル覆工打音点検システムの開発，建設の機械化，2002.10
 - 44)笠博義，小泉和広，稲垣正晴：トンネル覆工の自動打音システムの開発，トンネル工学研究論文報告集，第13巻，2003.11
 - 45)浅野雅則，鎌田敏郎，六郷恵哲，遠藤友紀雄：コンクリート打撃音の周波数特性とその欠陥評価への適用，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，2002.
 - 46)戸島敦嗣，鳥取誠一，宮田信裕，菅原孝男，井上正雄，栗田耕一：遠赤外線照射を用いた赤外線法によるRC構造物の変状検知，鉄道総研報告，Vol.17，No.3，2003.3
 - 47)鎌田卓司，鳥取誠一，中村圭二郎，栗田耕一：遠隔加熱によるアクティブ赤外線法を用いたコンクリート高架橋の検査，コンクリート年次論文集，Vol.25，No.1，2003.
 - 48)江澤一明，土井恭二，森島弘吉，星島一輝：トンネル覆工コンクリート検査用3次元映像化レーザーを開発，三井造船技報，No.184，2005.2
 - 49)安田亨，山本秀樹，北澤隆一：時速50kmでトンネル空洞探査，建設機械施工，Vol.66，No.12，2014.12
 - 50)篠田昌弘，大村寛和，御崎哲一，島田義則，内田成明：レーザー加振によるコンクリート部材の非破壊検査，鉄道総研報告，Vol.23，No.12，2009.12
 - 51)鉄道構造物における剥落事象の報告一覧
http://www.mlit.go.jp/report/press/tet-sudo09_hh_000048.html
 - 52)佐野信夫，伊藤哲男，馬場弘二，西村和夫，吉武勇，中川浩二：連続印刷画像を用いたトンネル覆工コンクリートのひび割れ評価におよぼす技術者資格の影響，土木学会論文集F，Vol.62，No.3，pp.558-556，2006.9
 - 53)山田隆昭，佐野信夫，馬場弘二，吉武勇，中川浩二，西村和夫：トンネル覆工コンクリートの定量的な健全度評価基準，土木学会論文集F，Vol.63，No.1，pp.86-96，2007.3
 - 54)山田隆昭，佐野信夫，馬場弘二，重田佳幸，吉武勇，西村和夫：ひび割れ指数を用いたトンネル覆工コンクリートの健全度評価法の構築，土木学会論文集F，Vol.65，No.1，pp.11-16，2009.1
 - 55)津野究，吉川和行，西山達也，小島芳之，岸田潔：トンネル覆工コンクリート片の剥落に関する基礎的研究，土木学会論文集F，Vol.65，No.2，pp.196-208，2009.
 - 56)点検実施基準および資格に関する検討委員会，2015.3
 - 57)阿部雅人，杉崎光一，石井秀和，阿部允：鉄道構造物における予防保全型検査・供用保全体系，鋼構造年次論文報告集，No.21，2013.
 - 58)道路トンネル定期点検業務積算資料（暫定版），国土交通省 道路局，2014.8
 - 59)道路橋定期点検業務積算資料（暫定版），国土交通省 道路局，2014.8
 - 60)松沼政明，鈴木尊：電磁波レーダを用いたトンネル覆工検査車の検証，建設の施工企画，2011.6
 - 61)Balaguer, C., Montero, R., Victores, J. G., Martínez, S. and Jardón, A.: Towards fully automated tunnel inspection: a survey and future trends, *The 31st International Symposium on Automation and Robotics in Construction and Mining*, ISARC, 2014.
 - 62)Mashimo, H. and Ishimura, T.: State of the art and future prospect of maintenance and operation of road tunnel, *23th International Symposium on Automation and Robotics in Construction*, ISARC, pp. 299-302, 2006.

(2016. 2. 8 受付)

PERFORMANCE EVALUATION FOR INSPECTION EQUIPMENT OF CONCRETE CRACKS AND EXFOLIATION

Ryuji MATSUMURA, Koichi SUGISAKI, Toshiro KAMADA
and Hiroshi MATSUDA

This paper proposes an evaluation method for performance of automated inspection equipment for detecting concrete cracks and exfoliation. For evaluation of performance of new equipment, quantitative indices are more beneficial than to determine whether it can be applied to the inspection or not, since it becomes possible performance comparison of the testing equipments. To construct the evaluation criteria, literature survey was carried out for the domestic and foreign technical standards such as guidelines and maintenance of visual inspection for concrete bridge and tunnel. As specific evaluation indices, detection rates and the false positive rate when developed equipment is applied to the inspection and the work efficiency of the equipment are introduced. For development of new inspection equipment to satisfy explicit required specification, an reliable inspection system is expected to be established by cooperative works of the users and manufacturers.