

固定装置を用いないモアレカメラによるコンクリート橋の 経年変化検知に関する基礎検討

Feasibility Study on Aging Detection of Concrete Bridge by Moire Camera Without Fixing Device

環境・リニューアル技術部 玉置 一清 KAZUKIYO TAMAKI

環境・リニューアル技術部 湯浅 香織 KAORI YUASA

建設情報技術部 掛橋 孝夫 TAKAO KAKEHASHI

写真から微小変形を検知可能なモアレ法は、写真撮影位置が不動である必要があるため、長期にわたる経年変化の点検には実用的ではない。本研究は、カメラの都度設置を想定し、撮影位置が若干異なる場合においても、モアレ法により、ひび割れ幅の微小変化が検出可能かを検証したものである。検証の結果、0.1mm程度のひび割れ幅変化を検知するには、撮影距離20m程度以内の場合、半径1m以内のカメラ位置の移動であれば、簡易な補正手法で、カメラ固定と同等の精度を有することがわかった。

キーワード：定期点検、画像解析、モアレ法、ひび割れ幅変化

The moire method, which can detect minute deformations from photographs, is not practical for long-term inspection over time, because it is necessary for the photographing position to be immobile. In this study, it was assumed that the inspection camera should be reinstalled in each inspection, and was verified whether the minute deformations of the crack width can be detected by the moire method under the shooting position of slightly different. As a result of that verification, if the difference of the camera position is within a radius of 1 m, crack width change of about 0.1 mm can be detected as the same accuracy as fixing the camera, under the condition of the shooting distance of less than about 20 m and by using the simple correction method.

Key Words: Regular inspection, Image analysis, Moire method, Crack width change

1. はじめに

5年に1回の定期点検の合理化を図ることを目的に、2019年2月、道路橋定期点検要領の見直しが行われた。その方策の一つとして、人が肉眼により部材の変状等の状態を把握し評価が行える距離まで近接して目視を行う、いわゆる近接目視を基本とする方針に変更はないが、その補完または代替手段として、近接目視と同等の診断を行うことができるかと判断した方法も活用することができるよう改訂された¹⁾。これを受け、ドローンや長尺ポール等に高性能カメラを搭載し、カメラを構造物に近接させることで、ひび割れ等の損傷を検出する技術等が続々と開発されている²⁾。構造上や周辺環境等の制約により、橋梁点検車や高所作業車が使用できない場合や、人の立入が困難な狭隘部の点検等、従来の近接目視点検が困難な

箇所での使用に対しては、大いに期待されている。しかし、これらの機器は高価であったり、運用に特殊技術が必要であったりするため、近接目視点検が可能な箇所への使用は、ニーズが高まっていないのが実情である。本研究は、定期点検の効率化、コスト削減を目的とし、定期点検の主要な項目の一つであるひび割れ幅の変化の有無を、近接することなく、また特殊な機器も使用せずに、一般的な市販カメラで撮影した遠景写真から画像解析により検知する手法について検討を行ったものである。

2. 画像解析によるひび割れ幅測定手法

(1) 現状と課題

定期点検により検知が求められているひび割れ幅は、RC構造物では0.2mm以上、PC構造物の場合は0.1mm以

上となる。これらのひび割れを画像から検知するためには、0.1mm/pixel以下の高解像度の画像が必要であり、2400万画素のカメラを使っても、600mm×400mm程度の拡大写真を取得する必要がある。1pixel単位の色要素を解析するサブピクセル法を用いることで、0.2~0.3mm/pixelの画像から、0.1mm程度のひび割れを検知する技術も開発されているが、その場合も1m²/枚程度の拡大写真が必要である。拡大写真は、望遠レンズを用いることで遠方からでも取得可能であるが、風等により微小な振動があると焦点を完全に合わせることが難しい等、撮影条件がシビアとなる課題があった。このため、ドローン等にカメラを搭載し、2~3mに近接させて撮影する方法が現実的となっている。また、拡大写真であるため、従来、人が近接して記録していた場合と同様、損傷図の作成には画像毎に位置情報を持たせる必要があるが、位置情報取得技術が大きな課題となり、撮影装置が複雑化、高額化してしまうケースも多い。

(2) モアレカメラの概要と経年変化検知への課題

低解像度の画像、例えば遠景写真から、微細な変状を検出する手法の一つとしてモアレ法が注目されている³⁾。

モアレ(干渉縞)法とは、図-1に示す等間隔の格子模様を対象構造物に設置し、設置直後に取得した初期画像と、変形後に取得した画像を重ね合わせることで発生するモアレ縞が、実際の移動量より拡大して表示されることを利用した変位測定手法である。その精度は、設置する格子サイズ(図-2参照)の1/100程度であり、理論上、解析が可能となる画像の最大解像度は、格子サイズの1/4以下である。表-1に、格子サイズと、変位検知精度および1枚の画像の撮影範囲の例を示す。

格子は、撮影範囲すべてに設置する必要はなく、変位情報を得たい領域ごとに設置することができる。変位情報は、格子領域の画像ピクセル単位で得ることができ、面的にXY方向の変位が検知可能となる。本手法は、ひび割れ幅の絶対量を得るものではなく、格子設置時からの変化量を測定する技術である。このため、すでにひび割れが発生している箇所に適用する場合は、格子設置時に、ひび割れ幅の絶対量を別途、測定、記録しておく必要がある。本手法により、0.1mm精度のひび割れ幅変化を検知するのであれば、格子10mmサイズで、15m程度の範囲を一度に撮影できるため、撮影画像から、ひび割れ位置の特定は比較的容易になるものとする。

本手法はカメラを固定していることが条件であるが、長年にわたって屋外現場にカメラを固定設置することは困難であり、これを実現するには、設備投資面からも実用的ではない。

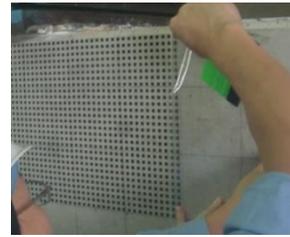


図-1 モアレ法による格子設置状況

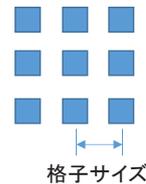


図-2 格子サイズの定義

表-1 格子サイズと必要解像度および撮影範囲の関係

格子サイズ	精度	解析可能な 限界解像度	2400万画素カメラを 使用した場合の 最大撮影範囲
mm	mm	mm/pixel	
10	0.1	2.5	15m×10m
20	0.2	5	30m×20m
50	0.5	12.5	75m×50m
100	1	25	150m×100m

3. ひび割れ幅変化検知に関する基礎実験

(1) 実験概要

カメラを現場に固定することなく、都度現場に持参して遠方から撮影することで、微細なひび割れ幅変化が検知可能かを検証する。ただし、初期画像撮影の際のカメラ位置を記録または現場にマーキングすることで、毎回、半径1m程度以内の範囲には設置できるものと想定した。格子画像は正面から撮影することが望ましいが、実構造物を対象とする場合、その環境によっては正面からの撮影が困難であり、斜めからの撮影となる場合がある。これらを考慮し、図-3に示す4つのケースを想定した。

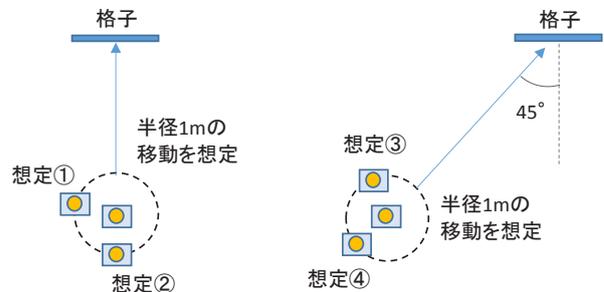


図-3 カメラ撮影位置の移動範囲の想定

本実験では、微小なひび割れ幅の変化を正確に再現するため、格子をモニター画面に表示し、中央にひび割れが生じたことを、右半分の格子を1ドット単位(0.18mm)でずらしていく方法で模擬した(図-4)。なお、紙に印刷した

格子とモニターに表示した格子では、解析結果に相違がないことを事前に確認している。使用したカメラ仕様を表-2に示す。実験は、基本的に屋外において実施した。実験状況を図-5に示す。

表-3に、実験ケースを示す。case1~3は、撮影距離をパラメータとし、レンズ焦点距離および記録画素数を変化させて、画像の解像度をモアレ法の設定限界値の約1/2に固定したものである。case4,5は、モアレ法の基本的な精度検証用に、解像度を極端に変化させたものである。斜め45度の位置にカメラを設置したcase6のみは、設備等の都合により室内実験とした。

(2) カメラ固定によるひび割れ幅変化の検知精度検証

カメラを固定した標準的なモアレ法によるひび割れ幅変化検知精度の結果を示す。格子領域のうち、ひび割れを想定した中心部を跨ぐ横 224mm×縦 112mm の領域を解析対象とすることで、200×100ピクセル分、2万点の変位情報が得られる(図-6参照)。図-7に、右半分を0.18mm変位させた際の水平方向変位分布(200点)を、縦方向ピクセル(100点)の本数分重ねた全データを示す。距離を変化させたcase1から3は、同一解像度としているため基本的に同じ画像のはずであるが、距離が長くなるにつれ、解析値のばらつきが大きくなる傾向となった。距離20mまでであれば、おおよそ0.2mm程度の変化を判別することができるが、距離40mの解析値からは読み取ることができない。また、解像度を解析可能限界値まで大きくしたcase5も、ばらつきが大きく、0.2mmの変化を読み取ることが困難である。次に、領域の縦方向ピクセルのばらつきの平均値を算出した水平方向変位分布を図-8に示す。あわせて、変位量を0.18~1.05mmまで変化させたケースも示している。実線は、変化量の設定値である。平均値をとることで、ひび割れ幅の変化は、より明確になるが、距離が増大するにつれ、水平変位一定区間(ひび割れが無い区間)にも0.1~0.2mm程度の揺らぎが生じていることがわかる。これは、大気の揺らぎの影響を受けているものと推

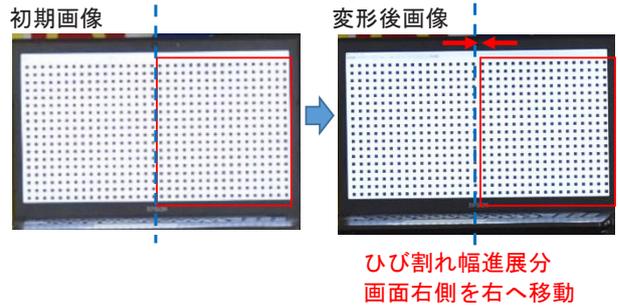


図-4 モニターに表示した格子

表-2 検証に使用したカメラの仕様

機種	Nikon D5600
型式	レンズ交換式一眼レフレックスタイプデジタルカメラ
有効画素数	2416万画素
撮影素子	23.5×15.6mmサイズCMOSセンサー

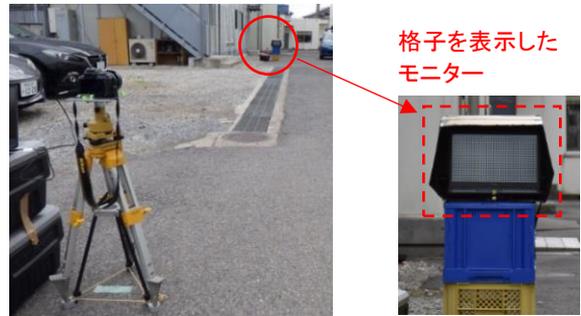


図-5 検証実験状況

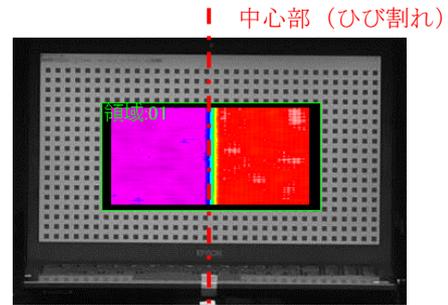


図-6 解析領域と解析結果カウンター図

表-3 実験ケース

			正面					45度
			case1	case2	case3	case4	case5	case6
カメラ移動			想定①②	-	想定①②	-	-	想定③④
撮影条件	環境		屋外					室内
	距離	m	10	20	40	10	20	10
モアレ格子	格子サイズ	mm	10					
カメラ設定	焦点距離	mm	70	140	140	70	70	70
	記録画素数	万画素	598	598	2400	2400	598	598
画像	解像度	mm/pixel	1.12	1.12	1.12	0.56	2.24	1.12
	1格子あたりのピクセル数	pixel	8.9	8.9	8.9	17.9	4.5	8.9

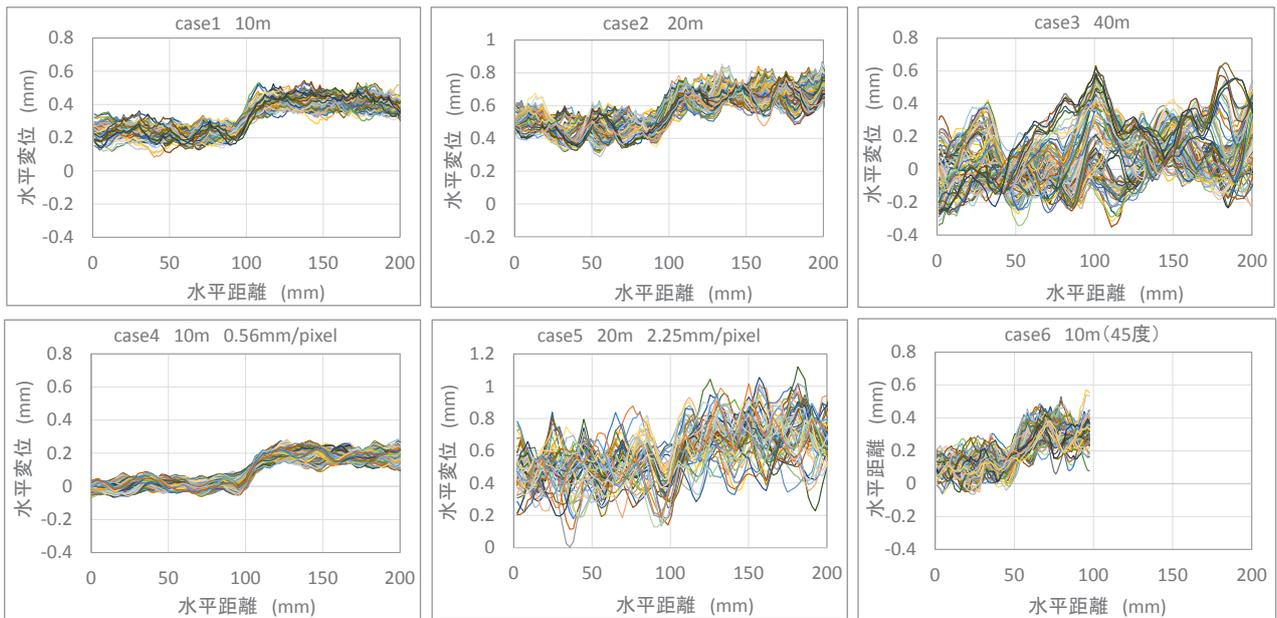


図-7 解析領域内の水平方向変位分布

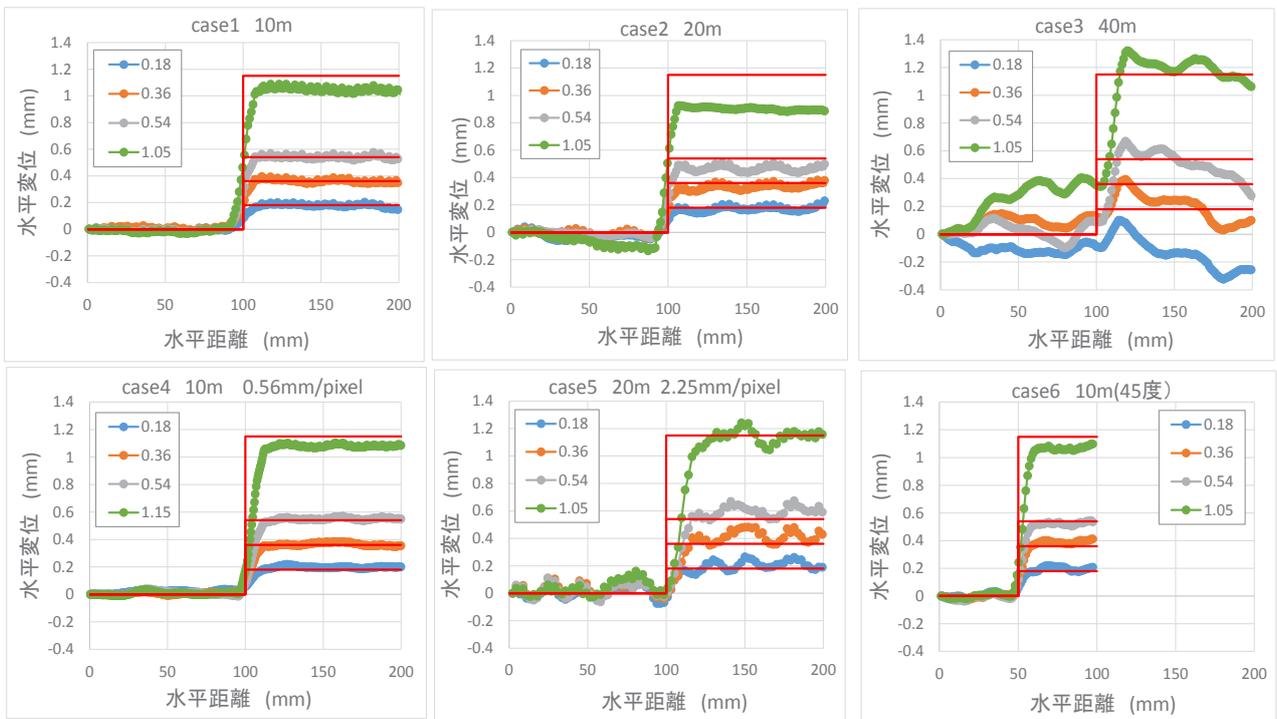


図-8 水平方向変位の平均値分布

測される。距離 10m ではほとんど揺らぎがなく、距離 20m までの揺らぎならば、0.1~0.2mm 程度の変位量を十分に読み取ることができるが、撮影距離が 40m になると、0.2mm 以下の変化量を検知するのは難しくなる。

次に、case5 より、解像度の設定を解析可能限界値まで大きくした場合も、揺らぎの影響が大きくなり、平均値をとることで 0.2mm 程度以上の変化ならば読み取り可能であるが、0.1mm の変化を検知するのは困難である。逆に、最も高解像度である case4 は、case1 とほぼ差異はなかった。

斜めから撮影した case6 は、正面から撮影した場合に比べ、若干ばらつきが大きくなるが、平均値をとることで、精度はほぼ同等となった。

図-8 のグラフから、揺らぎとは異なる大きな変化があった個所をひび割れ幅変化と特定し、その前後の相対差分を読み取った値と、モニター設定値の比較を図-9 に示す。撮影距離 20m 以内であれば、0.1~0.2mm 程度の微小ひび割れ検知が十分に可能であるものと考えられる。撮影距離が 40m 程度になる場合、検知可能なひび割れ幅変化量は 0.4mm 以上となり、±0.1mm 程度の誤差が生じる。

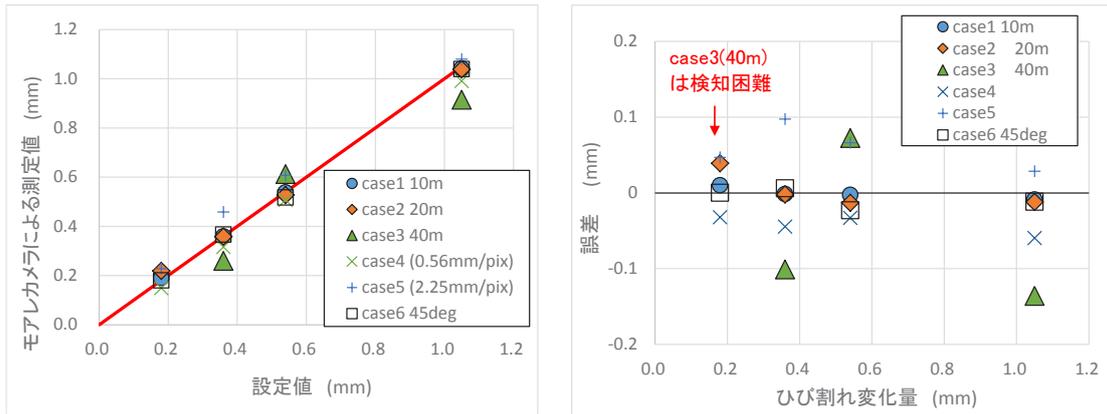


図-9 ひび割れ幅変化検知の精度 (カメラ撮影位置固定)

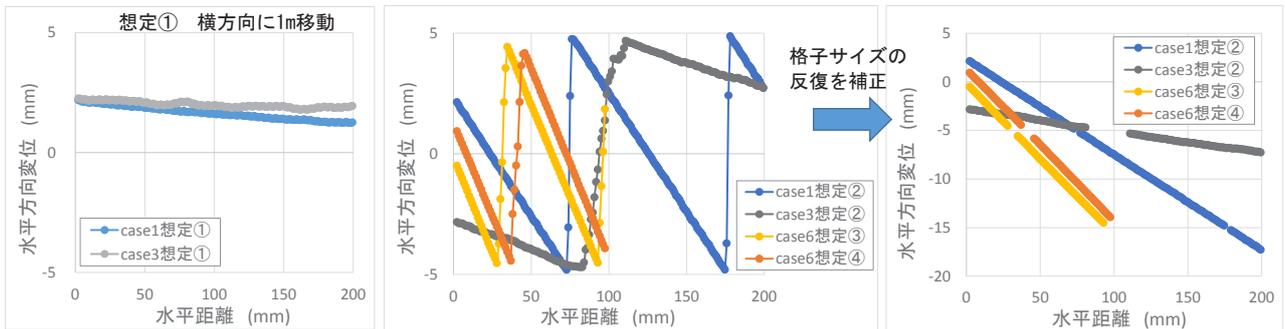


図-10 見かけ上の水平方向変位の平均値分布 (カメラ撮影位置移動)

(3) カメラ移動により生じる見かけ上の変位

本手法では、カメラの撮影位置が変化すると、画像の大きさが変化し、見かけ上、大変形が生じたものと認識される。

図-10 に、図-3 に示す想定で撮影位置を移動し取得した2枚の格子画像を解析した、見かけ上の水平方向変位分布を示す。カメラ移動により、画像中の格子範囲が初期画像の格子範囲から大きく外れてしまった場合、それぞれの画像から格子領域のみをトリミング加工(図-11)することで解析は可能となる。たとえば、撮影距離が10mから11mに変化するcase1 想定②では、撮影範囲は1.1倍となり、格子領域は、見かけ上、 $1/1.1=0.91$ 倍に縮小する。この場合、横幅224mmの領域は20mm縮小したと認識される。モアレ法では、格子サイズ(本実験では10mm)以上の変位が生じた場合、変位が元に戻ったものと認識され、変位分布は反転を繰り返す。反転位置を特定し、格子サイズ分を累加することで連続した変位分布とすることができる。補正した図-10 右より、格子領域内に変化がなければ、カメラ移動による変位はほぼ単純な直線変化となる。

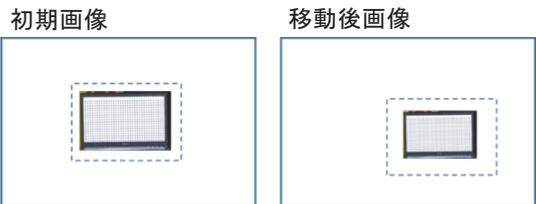


図-11 画像トリミングによる位置あわせ

合の変位解析結果を図-12 に示す。前項で示したように、カメラ移動に伴い、変位は全体に一定勾配を示すが、ひび割れ幅変化位置には特異勾配が生じる。0.5mm 程度の変化があれば、この特異勾配を確実に検出することができるが、0.1mm 程度の微小変化の場合、この特異勾配を検出することは難しい。しかし、一定勾配領域、つまり、格子領域のうち、ひび割れが生じていない範囲の勾配を検出し、これをシフト補正することで、カメラ固定で撮影した場合と、ほぼ同じグラフを得ることができる。この簡単な補正方法により、0.1~0.2mm 程度のひび割れ幅変化を検知できる可能性がある。なお、解析生値は、風の影響により、全体的な変位が上下にばらついているため、勾配補正をする際に、領域の左端がゼロとなるよう、補正している。このように、風の影響を受けると全体変位はばらつくが、領域内の変位分布は安定しており、局所的なひび割れ幅検知には特に影響ないものとする。

図-13 に、図-3 の想定内のカメラ移動を伴ったモアレ

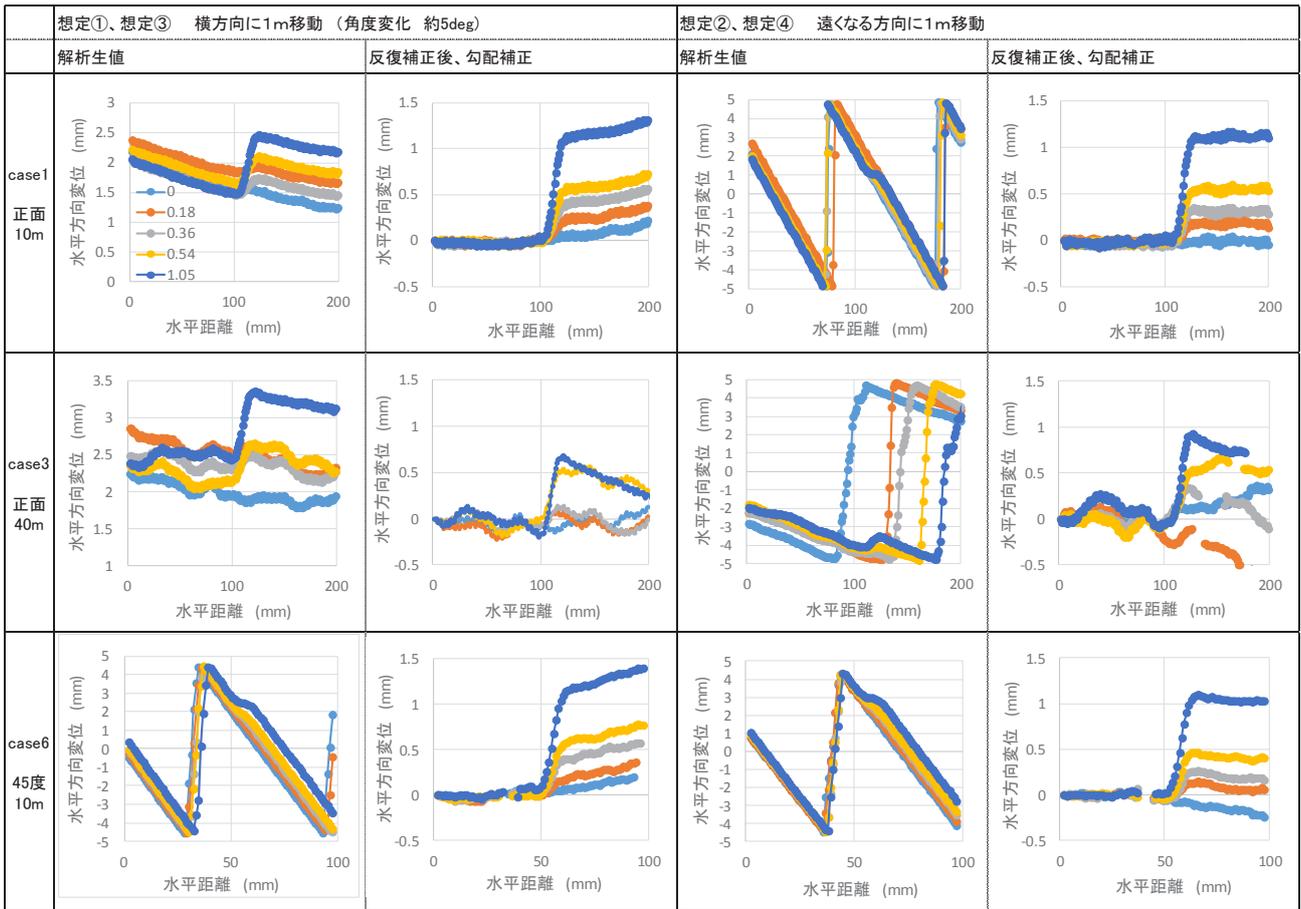


図-12 水平方向変位の平均値分布 (カメラ撮影位置移動)

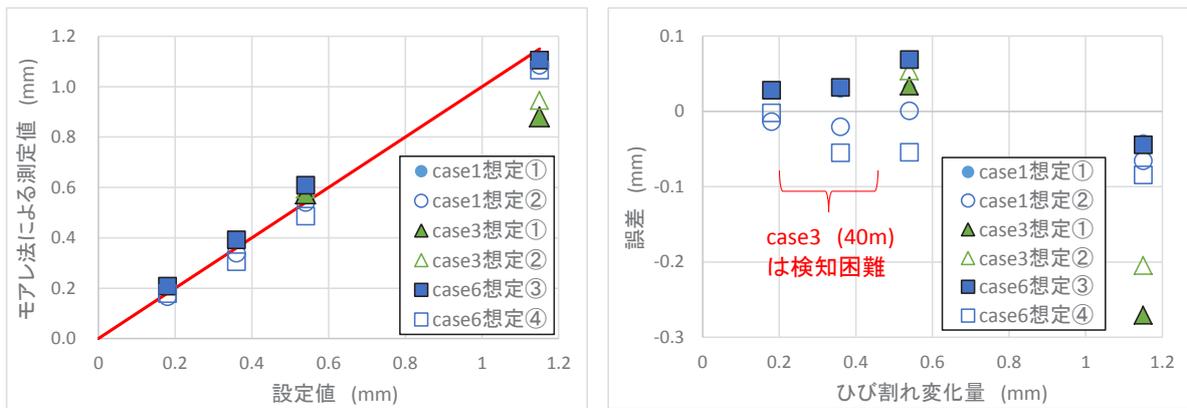


図-13 ひび割れ幅変化検知の精度 (カメラ撮影位置移動)

法により測定した、ひび割れ幅変化量およびその精度を示す。斜め45度から撮影した case 6 では、カメラ移動による見かけ上の変位が大きく、若干、精度は悪化しているが、本検討の範囲では、 $\pm 0.1\text{mm}$ の範囲内であり、十分な精度は確保できているものと考えられる。

4. まとめ

カメラを固定して撮影する標準的なモアレ法による基本精度の検証において、以下の知見が得られた。

- (1)本検証の範囲では、モアレ法により 0.1mm 程度のひび割れ幅変化を検知するためには、対象構造物に格子サイズ 10mm のマーカ領域を設置し、撮影距離を 20m 程度以内、解像度を、 $1\text{mm}/\text{pixel}$ 程度とすれば、定期点検における要求精度は得られる。逆に、これ以上の高解像度としても、ほとんど精度は向上しない。
- (2)撮影距離が 40m の場合、大気の影響と推測される揺らぎが顕著となるため、検知可能なひび割れ幅変化量は 0.4mm 以上となり、 $\pm 0.1\text{mm}$ 程度の誤差が生じる。

- (3)撮影場所は、必ずしも正面とする必要はなく、斜め方向からでも十分に精度は確保できるものと考えられる。
- (4)局所的なひび割れ幅変化検知では、風の振動は特に結果に影響しないと考えられる。

実際の定期点検実務で想定される、カメラを都度持参し、カメラ撮影位置が若干異なる場合の検証において、以下の知見が得られた。

- (1)格子領域内の、ひび割れが生じていない範囲における一定勾配変位をシフト補正する簡易な方法で、カメラを固定した場合と、ほぼ同じ解析結果を得ることができ、0.1～0.2mmのひび割れ幅変化検知に対し、十分な精度が得られるものと推定される。
- (2)今回の検証は、ひび割れ幅の変化を同一日で行ったものであり、季節による気温変動や、日照が変化した

場合の影響について、今後、検証をすすめていく。

謝辞:本実験を実施するにあたり、株式会社共和電業の関係者様各位に多大なるご協力、ご助言を頂いた。ここに記して深甚な謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省 道路局：道路橋定期点検要領，平成 31 年 2 月
- 2) 六郷恵哲，羽田野英明：ロボット技術による橋梁定期点検の効率化・高度化と交通規制の大幅短縮，建設マネジメント技術，2018.8
- 3) 藤垣元治，村田頼信，栗林健一，武内宣夫，前田芳巳，津田仁，榎谷明大，森本吉春：位相解析手法を用いたインフラ構造物用画像計測システムの研究開発，NEDO インフラ維持管理技術シンポジウム，2018.10