明るさの異なる高解像度画像を用いた柱部材のひび割れ幅評価

CRACK WIDTH EVALUATION OF COLUMN MEMBERS USING HIGH RESOLUTION IMAGES WITH DIFFERENT BRIGHTNESS

山本 慎 ——— *1 向井智久 ——— *2
衣笠秀行 ——— *3

Shin YAMAMOTO ——— *1 Tomohisa MUKAI ——— *2
Hideyuki KINUGASA ——— *3

キーワード：
鉄筋コンクリート, 高解像度写真, ひび割れ幅, 輝度, 画像処理

Keywords:
Reinforced concrete, High resolution photograph, Crack width, Brightness, Image processing

The purpose of this study is to establish an efficient method for investigating the damage state of concrete. To achieve this purpose, a basic study on the measurement method of concrete crack width using high-resolution photographs was conducted on a damaged RC column specimen. We then examined the effect of shutter speed, which makes the difference in the light intensity that affects image quality. For cracks with a visual measurement value of 0.30mm or more, the average accuracy of the image measurement value was 1.13, which was generally good.

1. はじめに

わが国では近い将来南海トラフ地震, 首都直下地震といった大規模地震の発生が予想されており, 膨大な数の被災建物の発生が予想される。一般に地震で建物に被害が発生すると様々な目的で被害調査が実施されるが, 特に大地震後は被災建物の調査件数が膨大になることが予想され, 現場での目視による調査では時間がかかりかかることや立入りが危険な建物での計測が行えないなどの問題があり, 早期の被害復興を実現するための迅速な被災建物の調査方法を構築することが望まれている。

近年実験室の試験体に対して解像度 200 万画素程度のカメラを用い, 接写撮影することにより分解能を確保した画像を用いたひび割れ幅分析¹⁾や解像度 5000 万画素程度のカメラで近距離から撮影することにより分解能を確保した画像を用いた分析²⁾は画像分析に関する基礎研究として実施されつつあるが, これらは画角が狭く実建物へ適用する場合に大量の撮影画像が必要となる。これらに対し実建物を対象とした環境下で, 高解像度カメラを用い遠距離から撮影した画像を用いた分析はほとんど行われていない。その中で若松らは, 熊本地震で被害を受けたピロティ柱³⁾を模擬した試験体を対象に, 高解像度カメラを用いて実際の環境下において想定される距離から撮影した画像を用いた損傷計測を行い, 適正露出時でのひび割れ幅の評価精度を明らかにしている⁴⁾。

しかし, 実際の被災建物調査では必ずしも適正な明るさで撮影できる保証はなく, 撮影される画質の違いが結果に与える影響について検討がされていない。

そこで本論では上記と同じ試験体を対象に, カメラのシャッタースピードを変更することで明るさを変化させた場合, その違いがひ

び割れ幅の推定結果に与える影響を明らかにすることを目的とする。

2. 実験概要と計測計画

2.1. 実験概要

本検討での対象は熊本地震で被害を受けたピロティ形式建物の 1 階柱¹⁾を縮小したものであり, 本論ではそのうちの 1 体を対象に高解像度写真を活用したひび割れ幅計測を行った。変位制御による正負交番漸増載荷を行い, 加力サイクルは部材角 $R=1/3200(\text{rad})$ を 1 サイクル行い, その後 $R=1/1600, 1/800, 1/400, 1/200, 1/100(\text{rad})$ をそれぞれ 2 サイクルずつ行った。軸力は上下のスタブを平行に保つように鉛直ジャッキを制御し, 正載荷時には圧縮軸力を, 負載荷時には引張軸力を作用させた。図-1 に載荷装置, 表-1 に試験体概要, 図-2 に試験体断面, 図-3 に試験体立面をそれぞれ示す。

2.2. ひび割れ幅計測計画

ひび割れ幅の目視計測は各部材角の 2 サイクル目の後 ($R=1/3200(\text{rad})$ の時は 1 サイクル目の後) にクラックスケールを用いて行った。その際ひび割れ幅を目視計測した位置を示すシールを貼り付け, 高解像度写真を用いた算定位置が特定できるようにした。図-4 にその例を示す。

2.3. 高解像度写真撮影概要

2.1. で説明した柱試験体を対象に, 約 1.5 億画素の高解像度カメラを用いて, 撮影距離 12m (正対) と 15m (斜め) の 2 地点から各部材角の 2 サイクル目の後 ($R=1/3200(\text{rad})$ の時は 1 サイクル目の後) に撮影を行った。図-5 に各地点から撮影された試験体の写真を, カメラスペックおよび撮影条件を表-2 に示す。カメラスペックおよび撮影条件を表-2 に示すひび割れ幅評価を行うために正

¹⁾ 東京理科大学大学院理工学研究科建築学専攻
(〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641)

²⁾ 国立研究開発法人建築研究所構造研究グループ 主任研究員・博士 (工学)

³⁾ 東京理科大学理工学部建築学科 教授・工博

¹⁾ Graduate Student, Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science

²⁾ Senior Research Engineer, Dept. of Structural Engineering, Building Research Institute, Dr.Eng.

³⁾ Prof., Dept. of Architecture, Tokyo Univ. of Science, Dr.Eng.

図-1 荷装置置 (単位: mm)

図-2 柱断面 (単位: mm)

(a) 面内方向 (b) 面外方向
図-3 立面 (単位: mm)

表-1 試験体概要

B: 柱幅 (mm)	475
D: 柱せい (mm)	475
ho: 内法高さ (mm)	1025
柱主筋	16-D13 (SD345)
柱主筋比 (%)	0.898
柱帯筋 (面内)	2-D6@40 (SD295A) (帯筋比 0.333%)
柱帯筋 (面外)	4-D6@40 (SD295A) (帯筋比 0.667%)
Fc: コンクリート 設計基準強度 (mm)	27
せん断スパン比	1.17
軸力比 (N/BDFc)	-0.06, 0.40

図-4 ひび割れ目視計測位置を示すシール

表-2 カメラスペックおよび撮影条件

名称	メーカー	機種名	センササイズ	画素数	撮影距離	ISO感度	シャッタースピード	焦点距離	分解能
カメラ1	Phase One	iXM-RS150F	53.4×40mm	14,204×10,652px	12.0m	ISO200	1/2s, 1/4s, 1/8s, 1/15s, 1/30s	150mm	0.30mm/px
カメラ2		XF IQ4 150MP			15.0m			240mm	0.24mm/px

正対で撮影した試験体

斜めから撮影した試験体

図-5 2地点から撮影された写真

体状態へと変換した際の柱面の分解能は 0.34mm/px と低下したことから、結果としてカメラ 1 の分解能の方が約 1.1 倍高く、本検討ではカメラ 1 のみのデータを用いた検討を示す。

また、本実験では同じ写真を異なる 5 つのシャッタースピード ($1/2\text{s}$, $1/4\text{s}$, $1/8\text{s}$, $1/15\text{s}$, $1/30\text{s}$) で撮影した。一般にシャッタースピードが遅いとその分光をより取り込むため写真は明るくなる。なお前記の若松ら⁴⁾が検討を行ったのはシャッタースピードが $1/8\text{s}$ の時のみで、目視に一番近い光量、すなわち適正露出時のデータを用いている。図-6 に撮影された各写真と試験体中心部の輝度値 (cd/m^2) を示す。図より、シャッタースピードの違いで画像の明るさが大きく異なることが分かる。

3. ひび割れ幅算定手法とその結果

3.1 ひび割れ幅算定手法

若松ら⁴⁾はひび割れ幅を明るさ数値によるものと輝度分布によるものの 2 種類の手法で算定した。その結果として、明るさ数値を用いた算定手法の方がひび割れ幅の推定精度はやや高かったが、この手法はキャリブレーションとして計測のたびにクラックスケールを試験体に貼り付ける必要があり、計測作業にやや手間がかかることから、本論では実際の撮影時間を排除することを重視し、輝度分布を用いたひび割れ幅算定手法のみを用いた検討を行った。具体的な手順を以下に記す。

[STEP1]

撮影した写真ファイル (raw データ) を tiff ファイルへと変換する。この際画像の明るさの調整は行っていない。

[STEP2]

現像した写真データを元の解像度より細かい 0.05mm/px に変換し、その際に各画素のスムージング加工を行っている。それ以降のステップで必要となる輝度分布表示を行うために、RGB の統一された白黒画像に変換する (図-7 (a))。

[STEP3]

ステップ 2 で変換した画像に対し図-4 で示したひび割れ幅計測位置を拡大し、輝度分布を表示する線を引く。この線は上記の計測位置を示すシールの先端部分に引き、本検討では水平からおおよそ 45 度以下の場合は鉛直線、 45 度以上のときは水平線を引いた (図-7 (b))。

[STEP4]

ステップ 3 で得られる線上の輝度分布を構成する画素ごとに求める。次に上記の輝度分布の曲線の変曲点を求め、その点を当該線上のひび割れ幅境界値とし、その値以下の画素の連続体が評価対象のひび割れ領域とする (図-7 (c))。

[STEP5]

ステップ 4 で得たひび割れ境界値を用いて、ひび割れ長さ方向にひび割れ境界点を求め、得られた境界点間距離のうち最小距離をひび割れ幅とし、そのひび割れ幅の中で最も大きな値を最大ひび割れ幅

図-6 各シャッタースピードによる明るさの違い

図-7 計測手順

とする（図-7（d））。

3.2 ひび割れ幅の算定結果

前述のステップ 1 で画像を現像する際に適したファイル形式を決定するため異なるファイル形式で数点ひびわれ幅の算定を行った。図-8 にファイル形式ごとの評価精度の差を示す。なお、本論で用いる精度を以下の式で表し、以降本論における精度も同じものを指す。

$$\text{精度} = \text{画像算定値 (mm)} / \text{目視計測値 (mm)} \quad \cdots (1)$$

図より元のカメラの分解能（0.30mm/px）以上のひび割れ幅算定精度について、非圧縮 tiff の精度の平均値が 1.13 と最も高かったことから、本検討では非圧縮 tiff を採用した。非圧縮 tiff の評価精度が最も高かった要因として非圧縮 tiff は現像する際にデータを圧縮する必要がないためと推察される。

図-9 に各シャッタースピードの算定結果を示す。図より 0.30mm

図-8 ファイル形式の違いによる評価の違い

(a) 1/2

(b) 1/4

(c) 1/8

(d) 1/15

(e) 1/30

図-9 目視計測値と高解像度算定値の関係

以上のひび割れはどのシャッタースピードにおいても概ね精度良く評価できていることが分かる。また 1/30s（図中 e）では、0.30mm 未満のひび割れはいずれもその算定が行えなかった。これは写真の明るさが暗く正常な輝度分布が得られなかったためである。例として図-10 に目視計測値 0.25 mm のひび割れ幅を有するひび割れに対して、評価可能であったシャッタースピード 1/8s の輝度分布と評価不可であった 1/30s の輝度分布をそれぞれ示す。図より 1/8s の時の輝度分布は変曲点を求めひび割れ領域を得られるのに対し、1/30s の時の輝度分布は変曲点が得られず、ひび割れ領域を特定できていないことが分かる。

また、シャッタースピード 1/2s、1/4s、1/15s において、0.30mm 未満の小さい幅を有するひび割れは目視計測値との相関性が見られなかったが、1/8s（適正露出）のものだけ目視計測値の傾向に沿っていることが分かる。これは、目視計測は人の目で行うものであり、適正露出が人の目に入る光量に最も近いことが関係することに加え、輝度分布による明暗が他と比べ明確であるためと思われる。例として図-11 に目視計測値 0.05mm の最大幅を有するひび割れの各シャッタースピードにおける輝度分布を示す。シャッタースピード 1/2、1/4s、1/15s のものはそれぞれ輝度差が 14.5、11.6、6.2 (cd/m²) であるのに対し、シャッタースピード 1/8s のものは 20.1 (cd/m²) と大きく、明暗の差が明確であることが確認できた。したがって、ひび割れ領域を他に比べ大きく評価することが他に比べ抑制的であることが分かる。なお、ここで言う輝度差とはひび割れ幅を算定する際に用いる輝度分布曲線の変曲点の輝度値（左右で異なる場合はその平均）から、そのひび割れ上の最低輝度値を引いたものを指す。

表-3 に各シャッタースピードにおいて、ひび割れの目視計測値に対する本論で示した輝度分布から求めるひび割れ幅の算定値の精度

図-10 計測可能、不能な輝度分布例

図-11 目視計測値 0.05mm 時の輝度分布

を示す。表-3 よりシャッタースピード 1/2s, 1/4s, 1/8s においては分解能以上のひび割れの精度に大きな差がなかったことが確認できた。これよりこの3つのシャッタースピード程度の明るさの違いでは精度に影響を与えないことが分かった。0.30mm 以上のひび割れに関して、全シャッタースピードの精度の平均値は 1.13 と概ね精度よく評価できた。特に適正露出以上であるシャッタースピード 1/8s および 1/2s, 1/4s で撮影した画像を用いたものの精度の平均値は 1.08 であるのに対し、適正露出未満であるシャッタースピード 1/15s と 1/30s で撮影された画像によるひび割れ幅算定精度の平均値

表-3 精度とばらつき

	ひび割れ幅				
	ひび割れ幅 $x < 0.30\text{mm}$ (計5箇所)				
シャッタースピード(s)	1/2	1/4	1/8	1/15	1/30
精度	4.47	4.45	3.70	4.68	
$0.30\text{mm} \leq x < 0.60\text{mm}$ (計7箇所)					
シャッタースピード(s)	1/2	1/4	1/8	1/15	1/30
精度	1.20	1.20	1.23	1.32	1.33
$0.60\text{mm} \leq x$ (計7箇所)					
シャッタースピード(s)	1/2	1/4	1/8	1/15	1/30
精度	0.98	0.92	0.95	1.02	1.12
$0.30\text{mm} \leq x$ (計14箇所)					
シャッタースピード(s)	1/2	1/4	1/8	1/15	1/30
精度	1.09	1.06	1.09	1.17	1.22
全体 (計19箇所)					
シャッタースピード(s)	1/2	1/4	1/8	1/15	1/30
精度	1.98	1.95	1.78	2.09	

は 1.20 と前者より低下していることが確認できる。

また、この評価方法ではひび割れの境界部の輝度差はひび割れ幅が変化しても大きく変化しないことから、ある一定の分解能以上であれば幅の大きいひび割れの評価精度が向上する傾向にあることが表-3 より分かる。具体的には表中の 0.60mm 以上のひび割れ幅の算定精度が 0.30mm から 0.60mm のひび割れ幅のそれより 1.0 に近いことである。

図-12 に各シャッタースピードにおける精度と頻度の関係を示す。なお、図-12 では目視計測値 0.30mm 未満の全てのひび割れはどのシャッタースピードにおいても精度が 1.5 以上または評価不能であったため図では省略している。また、ひび割れ計測の精度は 1.0 を基準に 1 割となる範囲 (0.9~1.1) を定め、それに合わせ同間隔で他の範囲も示す。この範囲としたのは、目視計測でもその程度のばらつきが生じることを考慮したものであり、ここではおおよその傾向をとらえることに着目しているためである。

この評価方法を用いると実際の誤差は小さくても、ひび割れ幅が小さいほど精度が悪くなる傾向が見られるが、最も評価精度が高かった適正露出であるシャッタースピード 1/8s においても、目視計測値 0.30mm 未満のひび割れに関しては評価精度は 3.70 と極端に悪く、高解像度カメラによる分解能未満のひび割れ幅を本論の手法で計測することは現時点ではできないことが分かる。

図-12 評価精度と頻度の関係 (0.30mm 以上)

0.30mm 以上のひび割れに関して、表よりシャッタースピード 1/15s と 1/30s のひび割れ幅算定精度がやや低下していることが確認できる。これは写真が暗いと評価に使用する輝度分布が緩やかな分布となり、本来のひび割れ幅より過大にひび割れ幅を算出するためと考えられる。例として図-13 では目視計測値 1.00mm の幅を有する同一のひび割れに対して、シャッタースピード 1/8s と 1/30s でそれぞれ算定した際に用いられた輝度分布の比較を示している。

図-14 に精度と輝度差の関係を示す。図の白抜きの点はひび割れ幅 0.30mm 未満のものを指し、塗りつぶされている点はひび割れ幅 0.30mm 以上のものを指す。図より、幅が 0.30mm 以上のひび割れに対しては、輝度差が精度に与える影響は小さいが、幅が小さいひび割れに対しては輝度差の低下と評価精度に大きな影響を与えることが分かる。したがって、ある一定以上の輝度差が出るような環境によって写真を撮影することが、本評価精度を確保するために必要であり、そのためには露出計等を用いその環境に応じた適正露出を算定し、そのシャッタースピードで撮影することが有効である。一方で、輝度差がある程度あるにも関わらず精度が悪いものは、全て小さいひび割れ幅の結果であり、これらのひび割れの境界部が不鮮明になることが原因であることから、撮影距離を近づけて撮影した元画質の解像度の改善が必要であると考えられる。

図-13 明るさの異なる輝度分布の比較

図-14 精度と輝度差の関係

4. まとめ

静的加力実験により損傷した鉄筋コンクリート柱試験体に対し、高解像度カメラにより撮影された画像上のひび割れの輝度分布を用いてひび割れ幅算定を行った。具体的には、写真を現像する際のファイル形式としてデータ圧縮されてない非圧縮 tiff ファイルを用いることとし、シャッタースピードの違いによる写真の明るさの差が算定精度に与える影響を検討した結果、以下に示す知見を得た。

- ①目視計測値 0.30mm 以上のひび割れに関して、本報で示した画像計測値の精度の平均値が 1.13 と概ね精度良く評価できた。特に適正露出であるシャッタースピード 1/8s および 1/2s, 1/4s の画像を用いたものは精度の平均値が 1.08, 1/15s, 1/30s のものは精度の平均値が 1.20 となり前者のほうが後者と比較し精度が良かった。
- ②目視計測値 0.30mm/未満のひび割れに対しては解像度を強制的に引き上げ算定を行うことは可能であったが、算定精度の平均値が 4.33 と分解能以上の算定精度と比較し著しく低下し、過大評価となった。これはカメラの分解能を超えるひび割れ画像において、当該ひび割れの境界部が不鮮明になることが原因であると考えられる。その中で、シャッタースピード 1/2s, 1/4s, 1/15s においては目視計測値との相関性が見られなかったが、1/8s (適正露出) のものだけ目視計測値に沿って分布していることを確認した。これはシャッタースピード 1/8s のものはひび割れ幅を算定する際に用いる輝度分布の変曲点での輝度とひび割れ領域の輝度の差が明確であったことが要因と考えられる。なお、シャッタースピード 1/30s においては、適切な輝度分布が得られず算定そのものが出来なかった。

目視計測値 0.30mm 未満のひび割れ幅に対しては、輝度分布の輝度差が小さいほど算定精度が低下する傾向が見られた。撮影環境を考慮した上で適切なシャッタースピードを決定し、輝度差がある程度得られる画像を得ることにより安定した精度を確保できるものと考えているが、その検証については今後の課題にしたい。

謝辞：

本研究は、官民研究開発投資拡大プログラム (PRISM) 革新的建設・インフラ維持管理技術／革新的防災・減災技術 (統括：田代民治) における「仮設・復興住宅の早期整備による応急対応促進 (PD：緑川光正)」および建築研究所指定研究課題「既存建築物の地震後継続使用のための耐震性評価技術の開発」の一環として実施した。ここに関係各位に謝意を示します。

参考文献

- 1) 箕浦慎太郎, 渡辺勉, 後藤恵一：画像計測によるコンクリート構造物のひび割れ検知手法の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp1297-1302, 2017
- 2) 高橋賢作, 高橋典之, 千田紘之：RC 部材の地震損傷画像計測のための撮影環境に関する考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.2, pp.895-900, 2020
- 3) 建築研究所：平成 28 年 (2016 年) 熊本地震建築物被害調査報告 (速報), 建築研究資料 No.173, 2016.9
- 4) 若松諒, 向井智久, 渡邊秀和, 衣笠秀行：計測画像を活用した RC 部材の損傷状態調査法の基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.2, pp.709-714, 2020

[2021 年 2 月 4 日原稿受理 2021 年 4 月 13 日採用決定]