

地震により生じる損傷の評価・推定の現状 Past, present and future of evaluation and estimation of seismic damage for R/C building structures

高橋 典之¹⁾

Noriyuki TAKAHASHI

1) 東北大学, 准教授, 博士 (工学) (ntaka@archi.tohoku.ac.jp)
Tohoku University, Associate Professor, Dr. Eng.

本稿では、はじめに現行のひび割れ幅に関する制限および設計式についての概要を紹介するとともに、地震時ひび割れ幅評価に関する近年の知見を紹介する。続いて、地震時のひび割れ幅だけでなく、ひび割れ長さや剥落面積、それらの組み合わせ量を評価する地震時損傷量評価に関する近年の研究動向について紹介する。地震時損傷量評価に関する知見を踏まえた地震時損傷量推定手法（なかでも等価線形化手法を用いた耐震設計で得られる工学応答レベルで評価可能な簡便手法）の事例を紹介し、最後に、地震により生じる損傷量の評価・推定に関する今後の展望について、私見をまとめた。

ひび割れ幅, ひび割れ長さ, 損傷量評価, 修復性能
Crack width, Crack length, Damage evaluation, Reparability

1. ひび割れ幅制限に関する現状

鉄筋コンクリート造建築物のひび割れに関する制限は、使用性能に対して（防水性能, 耐久性, 美観維持を目的として）定められているものが殆どである（表1）。構造性能への影響を踏まえた RC 造部材のひび割れ幅制限値については、平成12年建設省告示1653号に住宅を対象にひび割れ幅と耐力上主要な部分における瑕疵の可能性に関する関係が記されており、ひび割れ幅0.5mm以上、あるいは、さび汁を伴うひび割れである場合、耐力上主要な部分に瑕疵が存在する可能性が高いとされているが（表2）、構造性能にどのような問題が現れるかを示しているわけではない。鉄筋コンクリート造のひび割れ対策（設計・施工）指針・解説¹⁾では、防水性能に対しては許容ひび割れ幅0.15mm（設計ひび割れ幅0.1mm）、耐久性に対しては屋外で許容ひび割れ幅0.3mm（設計ひび割れ幅0.2mm）以下に制限することが示されている。

表1 許容最大ひび割れ幅の規格値の例²⁾

規準	環境条件あるいは対象構造物	許容ひび割れ幅(mm)
土木学会 RC示方書 (1974)	海洋コンクリート干潮部	0.15
	海洋コンクリート海水中	0.20
日本産業規格	設計荷重作用時	0.25
	設計荷重開放時	0.05
ACI Building Code 318-83	屋外部材	0.33
	屋内部材	0.41
CEB	相当浸食作用を受ける構造物	0.1
	防護工の無い普通の構造物	0.2
	防護工のある普通の構造物	0.3

表2 告示1653号におけるひび割れ幅と瑕疵の可能性

仕上げ種別	レベル	ひび割れの状況	耐力上主要な部分に瑕疵が存在する可能性
構造材	1	レベル2およびレベル3に該当しないひび割れ	低い
	2	幅0.3mm以上0.5mm未満のひび割れ	一定程度ある
	3	(1) 幅0.5mm以上のひび割れ (2) さび汁を伴うひび割れ	高い

2. ひび割れ幅制御のための設計式の現状

鉄筋コンクリート造計算規準・同解説³⁾では、長期荷重に対して、梁およびスラブの曲げひび割れ幅制御を目的とした鉄筋の引張応力度を規定する方法（算定図表等）を定めている（図1）。また、短期荷重に対して、柱および梁の残留せん断ひび割れ幅が0.3mm以下になることを（過去の実験結果を踏まえて）間接的に満たすように短期許容せん断力の計算式を定めている。

$$Q_{AS} = bj \left\{ \frac{2}{3} \alpha f_s + 0.5_w f_t (p_w - 0.002) \right\} \quad (1)$$

ただし、 $\alpha = \frac{4}{\frac{M}{Qd} + 1}$ かつ $1 \leq \alpha \leq 2$

ここに、 b ：梁、柱の幅、T形梁の場合はウェブ幅、 j ：梁、柱の応力中心間距離で $(7/8)d$ とすることができる、 d ：梁、柱の有効せい、 p_w ：梁、柱のせん断補強筋比、 f_s ：コンクリートの短期せん断応力度、 f_t ：せん断補強筋の短期許容引張応力度（390N/mm²以上の場合は390N/mm²）、 α ：梁、柱のせん断スパン比による割増係数、 M ：設計する梁、柱の最大曲げモーメント、 Q ：設計する梁、柱の最大せん断力である。

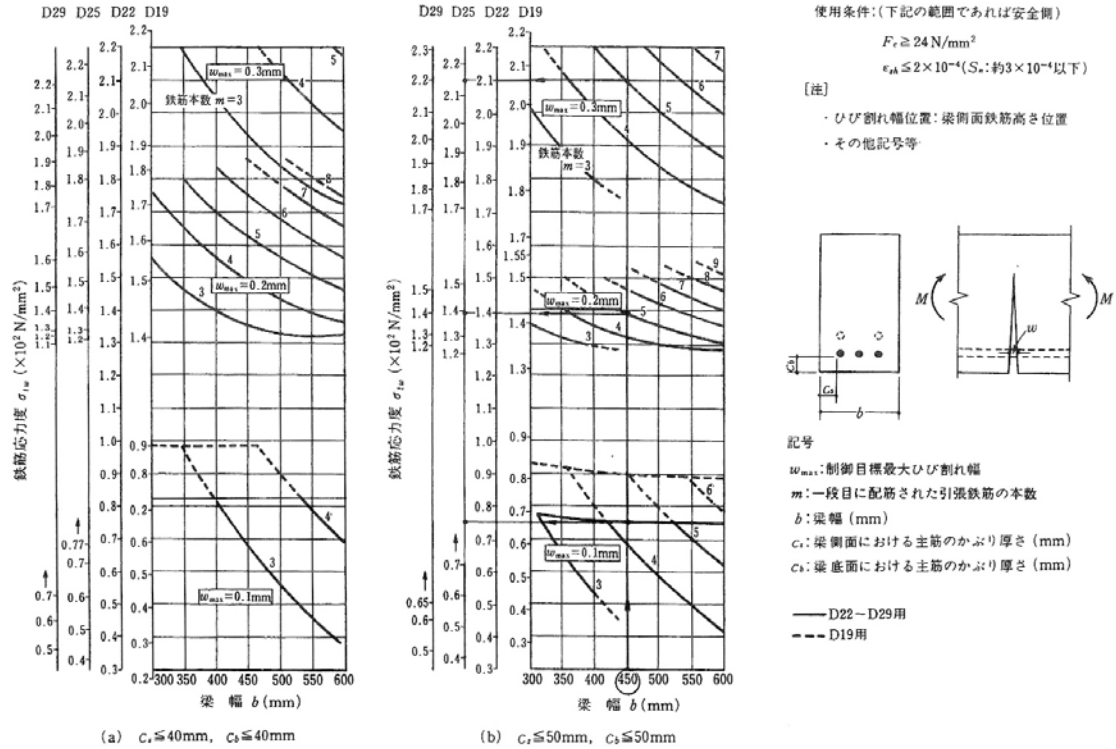


図1 梁曲げひび割れ幅制御のための鉄筋引張応力算定図表³⁾

また、日本建築防災協会の被災度区分判定基準⁴⁾では、構造部材の損傷度を区分する目安としてひび割れ幅が記されており(表3)、損傷度と物理状態変化(ひび割れ発生で損傷度I、主筋降伏で損傷度II、かぶりコンクリート圧壊で損傷度IVなど)の対応が概念として併記されている。

表3 構造部材の損傷度の定義(一部抜粋)⁴⁾

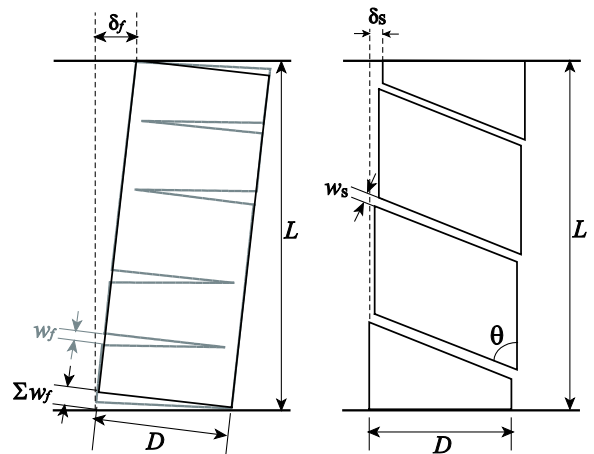
部材の損傷度	損傷の内容
I	近寄らないと見えにくい程度のひび割れ(ひび割れ幅0.2mm程度以下)が発生している
II	肉眼ではっきりと見える程度のひび割れが生じている(ひび割れ幅0.2~1mm程度)
III	比較的大きなひび割れが生じているが、かぶりコンクリートの剥落は極くわずか。(ひび割れ幅1~2mm程度)
IV	大きなひび割れが多数生じ、かぶりコンクリートの剥落や圧縮破壊が著しく、鉄筋がかなり露出している。
V	鉄筋が曲がり、内部のコンクリートも崩れ落ち、一見して柱に高さ方向や水平方向に変形が生じていることがわかるもの。沈下や傾斜が見られるのが特徴。鉄筋の破断が生じている場合もある。

物理状態変化とひび割れ幅目安との関係のように、部材角とひび割れ幅との関係をモデルとして表現しているのが「鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説」⁵⁾である。鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針(案)・同解説では、部材角とひび割れ幅の合計値が幾何学的に対応するモデルを導入している。具体的には、部材の曲げ変形成分 R_f とせん断変形成分 R_s の合計で表される部材角 R を、図2の幾何学的関係を

用いて、曲げひび割れ幅の合計値 Σw_f 、および、せん断ひび割れ幅の合計値 Σw_s に換算する。

$$R = R_f + R_s = \frac{\Sigma w_f}{D - x_n} + \frac{a \Sigma w_s \cdot \cos \theta}{L} \quad (2)$$

ここに、 Σw_f : 曲げひび割れ幅の材軸方向への合計、 Σw_s : せん断ひび割れ幅の合計、 D : 部材せい、 x_n : 圧縮縁から中立軸までの距離、 θ : せん断ひび割れと材軸のなす角度、 L : 部材内法スパン、 a : 後述する係数である。せん断ひび割れ幅の拡幅方向と、それに伴う部材のせん断ずり量の関係から、性能評価指針(案)⁵⁾では $a=1$ が仮定しているが、杉ら⁶⁾は実験結果から $a=2$ を仮定した。



(a) 曲げひび割れ変形モデル (b) せん断ひび割れ変形モデル
 図2 部材変形とひび割れ幅合計値の幾何学的関係

性能評価指針（案）⁵⁾では、このひび割れ幅の合計値が最大ひび割れ幅の何倍に相当するかをひび割れの「等価本数」という概念で取りまとめている。曲げひび割れの等価本数 n_f は、十分に主筋が塑性化した後は主筋の引き抜きにより基部の1本のひび割れ幅が支配的に大きくなるという実験結果から $n_f=2$ と固定している。一方、せん断ひび割れの等価本数 n_s は梁部材において、

$$n_s = \frac{D \cos \theta + L \sin \theta}{S_{m\theta}} \quad (3)$$

で表わされるものとしている。ここに、 D : 梁の全せい、 L : 梁の内法スパン、 θ : せん断ひび割れと材軸のなす角度（45度としてもよい）、 $S_{m\theta}$: 梁部材のせん断ひび割れ間隔で、

$$S_{m\theta} = \frac{1}{\frac{\sin \theta}{S_{ml}} + \frac{\cos \theta}{S_{mv}}} \quad (4)$$

である。ここで、 S_{ml} 、 S_{mv} : 主筋あるいはせん断補強筋の各方向のみに引張を受けたときのひび割れ間隔で以下による。

$$S_{ml} = 2 \left(c_l + \frac{S_l}{10} \right) + 0.1 \frac{d_b}{p_l} \quad (5)$$

$$S_{mv} = 2 \left(c_v + \frac{S_v}{10} \right) + 0.1 \frac{d_{bv}}{p_w} \quad (6)$$

ここで、 c_l : 主筋から断面中心までの距離、 S_l : 主筋の間隔、 d_b : 主筋径、 p_l : 引張鉄筋比、 c_v : せん断補強筋から断面中心までの距離、 S_v : せん断補強筋の間隔、 d_{bv} : せん断補強筋径、 p_w : せん断補強筋比である。また、柱部材においては、

$$n_s = \frac{D}{2S} \quad (7)$$

と表されるものとしている。ここで、 D : 柱せいで、特にヒンジ領域を考慮した場合、材軸方向にヒンジ長さ l_H が D と等しくなるものとしている。また、 S : 帯筋間隔である。一般的な部材では $n_s=3\sim4$ とされている。

しかしこのような目安があるといっても、通常の耐震設計においては定められた外力に対して建築構造物の耐力が上回ることを評価することが主目的となっており、地震応答を評価するとしても地震により生じるひび割れ幅を1mmに抑えるとか2mmに抑えることを主目的とした性能評価型の耐震設計が陽な形でなされているわけではないのが現状である。

3. 地震時ひび割れ幅評価に関する近年の知見

長期荷重を想定した等曲げモーメント区間に対するひび割れ幅算定式については古くから多くの研究がなされ一定程度の設計式が確立しているが、地震荷重を想定したひび割れ幅算定式については上述した評価手法では部材角によって各ひび割れ幅が正しく評価できない可能性

があることが近年の研究で分かっている。

例えば、性能評価指針（案）⁵⁾の手法では、ひび割れ定常状態以前の状態を考慮しておらず、定常状態以降は部材角とひび割れ幅の幾何学的関係が成り立つ限り、部材角と平均ひび割れ幅は比例関係になる。一方、「等価本数」が一定である限り、部材角と最大ひび割れ幅も比例関係になる。すなわち、平均ひび割れ幅の最大ひび割れ幅に対する比が一定になる。しかし実際には、部材角が大きくなるにつれ平均ひび割れ幅の最大ひび割れ幅に対する比は小さくなる（最大のひび割れ幅の拡幅が卓越する）ことが分かっている²⁾（図3）。

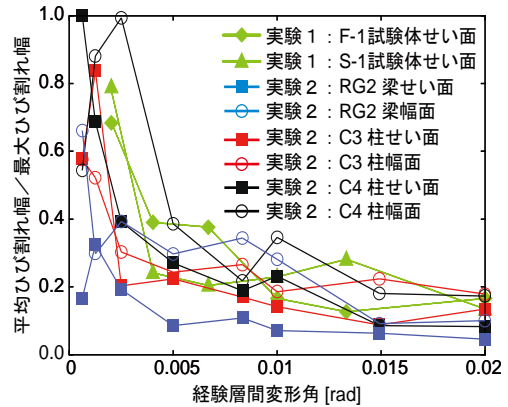
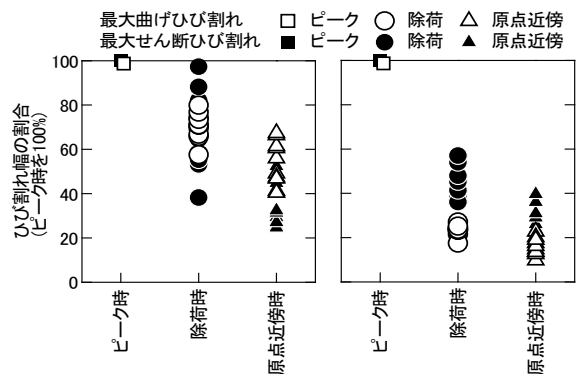


図3 平均ひび割れ幅／最大ひび割れ幅の比

従来、長期荷重を念頭においた関係式として提案されてきた平均ひび割れ幅と最大ひび割れ幅の比を一定とするモデルは、地震荷重に対して成り立つわけではないことに注意が必要である。

また残留ひび割れ幅について、通常の静的荷重実験ではピークからの除荷時変位における残留ひび割れ幅が計測されるが、実際の地震応答終了後の残留ひび割れ幅は地震応答履歴によるが除荷時ひび割れ幅ほど大きくならない。高橋らは⁷⁾、残留変位がピークからの除荷後に小変形荷重を追加し、ピークからの除荷時より、地震応答終了を模擬した小振幅経験後のほうが、残留ひび割れ幅が小さくなること、および、曲げひび割れとせん断ひび割れでその傾向が異なることを実験的に示した（図4）。



(a) 曲げ破壊型試験体 (b) せん断破壊型試験体

図4 除荷時および原点近傍変位時のひび割れ幅

今後、地震応答履歴（残留変位）と損傷量の関係、残留変位制御設計の適用により見かけ上低減された損傷量と力学性状・構造性能との関係を明らかにする実験データ蓄積や、地震応答終了時の残留変位のばらつき評価を可能する手法を検討することで、損傷量制御設計の効果やその信頼性（ばらつき）の向上を図る必要がある。

4. 地震時損傷量評価・推定の現状

現行の規準および指針では、ひび割れ幅の制御を目的とした設計式の提案がなされているが、ひび割れ長さや剥落面積については考慮していない。

性能評価型設計の本来の主旨に立ち返れば、修復性能評価において最終的に検討すべきなのは、ひび割れ幅といった一次情報ではなく、そこから（技術者と有識者の間で何を評価すべきかの価値観を共有できるまでにコンセンサスがはかられ）導き出される指標、例えば、修復費用（cost）、修復時間（downtime）などの統合情報である。すなわち、ひび割れ幅のみを評価できたからといって、修復性能を満たす本来の性能評価型設計がなされたことにはならない。そこで重要になるのが、修復費用や修復時間の積算に直結する、ひび割れ幅以外の、ひび割れ長さや剥落面積などを含む「損傷量評価」⁸⁾である。

(1) ひび割れ長さの評価（とひび割れ幅評価との統合）

損傷量評価に着目した研究は 1980 年代にその先駆けが見られるが、デジタルカメラや画像処理技術の進化・普及により 2000 年代後半以降に急速に進んだ研究テーマである。

RC 造構造物のひび割れ幅以外の事象を損傷として定量的に計測する試みの端緒は、高橋・柴田ら⁹⁾によるひび割れ長さ評価に関する研究である（図5）。

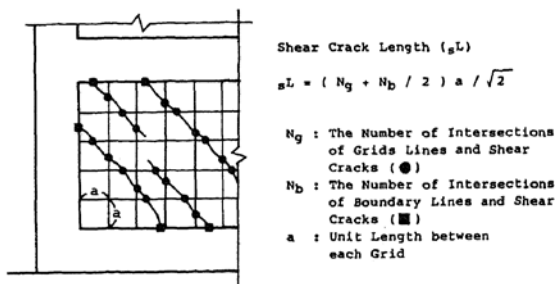


図5 ひび割れ長さを実験的に評価する方法の提案⁹⁾

その後 2000 年代に入ると、デジタルカメラの普及に伴い計測が容易になってきた事象として、ひび割れ長さだけでなく「ひび割れ密度」¹⁰⁾に着目した研究が進められ、「ひび割れ幅と角度の分布」「ひび割れ面積」といった損傷量についても分析された¹¹⁾。ただしこれらの研究についても、基本的には上述の高橋・柴田らが用いた「グリッド線上を通過するひび割れ」を計測対象とする手法に準じることで、データ処理におけるメモリ容量制限を回

避する方法が採用されている。

また、ひび割れ長さとしひび割れ幅を統合的に評価する試みとして「ひび割れ幅分布モデル」（あるひび割れ幅を有するひび割れ長さが、全ひび割れ（長さ）に対してどれくらいの割合を占めるかを表すモデル）が検討されるようになった¹¹⁾。

滝本ら¹¹⁾による RC 造梁部材を対象としたひび割れ幅分布モデル（横軸にひび割れ幅、縦軸に該当ひび割れ幅となるひび割れの長さの総ひび割れ長さに対する比をとった確率密度関数）の分析では、標準偏差 $\sigma=1.1$ の対数正規分布に従うと報告されている。その後、RC 造柱および梁部材についての近年の実験結果から、経験部材角が大きくなるにつれ標準偏差 σ が大きくなる傾向が見られることが分かっている²⁾（図6）。

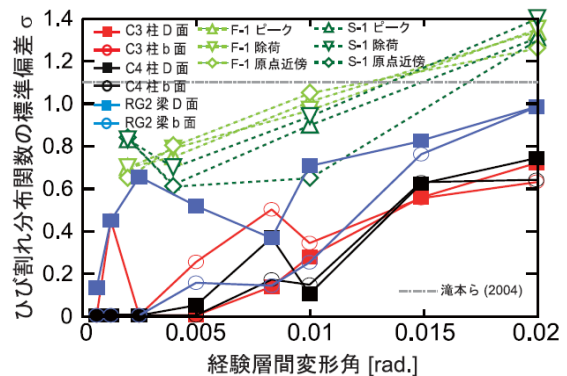


図6 ひび割れ幅分布における標準偏差の推移

また、RC 造壁部材についても、ひび割れ幅だけでなくひび割れ長さがどのように推移するかを検討した研究が進められるようになり¹²⁾、近年の研究ではひび割れ幅分布としての分析^{13), 14)}において（図7）、梁部材や柱部材同様、対数正規分布に従うこと、経験部材角が大きくなるにつれ標準偏差 σ が大きくなる傾向が見られることが分かっている。

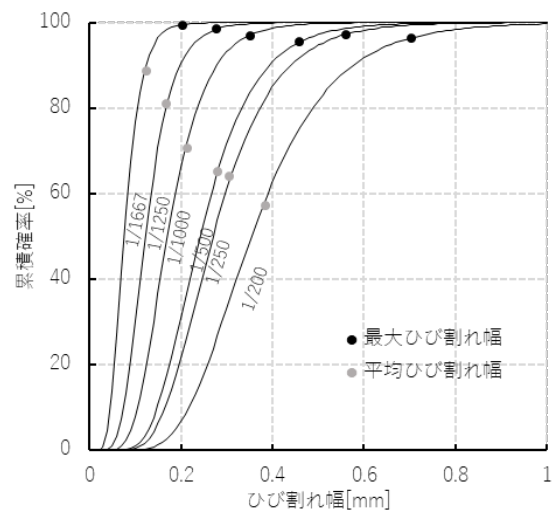


図7 RC 壁部材のひび割れ幅分布の例¹⁴⁾

(2) 剥落面積の評価（とひび割れ量評価との統合）

剥落面積についてもデジタル画像処理を利用した分析が進められるようになった。一例として、高橋ら¹⁵⁾は、ひび割れ図が記録されている既往の実験データ（16体の試験体データ）に基づき、欠損部分として認められるピクセル数を計測することで欠損面積を測定した。図8は、ひび割れ図における欠損面積の総和を単位面積あたりの欠損面積に換算した欠損率[m²/m²]の進展を示している。各試験体の破壊モード別に試験体を分類して、部材角に対する欠損率の進展状況を分析した結果、最小二乗法による近似式から、曲げ破壊試験体では欠損開始部材角が0.009rad、欠損率増加係数(グラフの傾き)が2.60、せん断破壊（曲げ降伏後にせん断破壊を除く）試験体では欠損開始部材角 0.011rad、欠損率増加係数(グラフの傾き)が6.24 となったことを報告している。

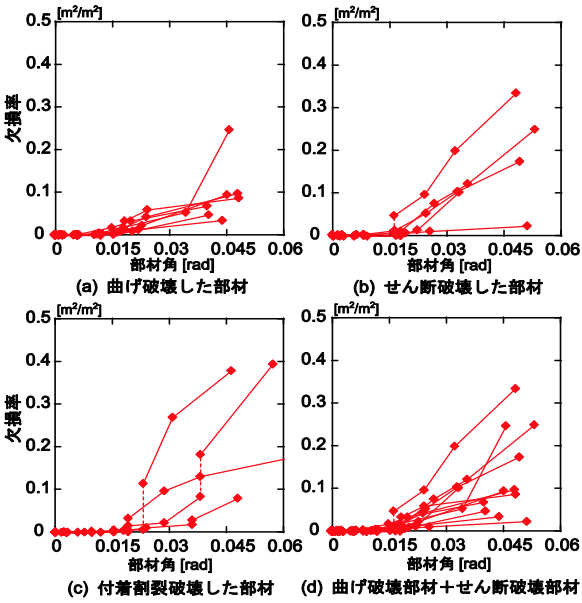


図8 部材角一次損率関係¹⁵⁾

また、ひび割れと剥落面積を統合的に評価する試みとして、鉄筋コンクリート柱梁接合部の損傷を対象に、フラクタル次元を算出する方法も提案された¹⁶⁾。フラクタル次元を求める際は、ボックスカウンティング法が用いられている。ボックスカウンティング法とは、一辺の長さ r の正方形と、フラクタル次元を求めたい図形（デジタル画像）とを重ね合わせ、対象となる物体が少しでも含まれている場合（ひび割れや圧壊で黒塗りされたピクセルが含まれている場合）、その正方形の数を数えていき、カウントされたセルの数を $N(r)$ とすると、 r の対数を横軸に、 $N(r)$ の対数を縦軸にとったプロットの傾き $1-D$ が得られ、 D がフラクタル次元となる。ここで、ひび割れのみでの線分状態だと 1（次元）、全面剥落状態になると 2（次元）であり、ひび割れと剥落の混在状態を 1~2（次元）の数値で表すことになる。

(3) 損傷量推定に関する検討事例

地震時損傷量を評価・推定するにあたり、これまでのように耐力を基準に耐震設計がなされる限りにおいては、ある許容応力度を守っておけば間接的にあるひび割れ幅以内になることを担保するといった従来の方法が受け入れやすいものだったと考えられる。一方、性能評価型設計の普及・促進を考えた場合、等価線形化法を用いた限界耐力計算法が本来目的としていた変形（部材変形角）を評価する設計への移行とセットで、ひび割れ幅、ひび割れ長さ、剥落面積といった損傷量がどのように評価・推定できるかのモデルを構築する必要がある。

もちろん損傷量を評価・推定する方法として、FEM, AEM, RBSM などの高度な解析手法を導入することも十分考えられる。ただし高度な解析手法には、それに見合うだけの精緻なモデル化とモデルの妥当性担保が重要であり、損傷評価・推定の普及・促進においては、むしろ（モデル自体の評価が）足枷になる可能性も考えられる。その意味では、等価線形化法を用いた解析で得られる工学量（層間変形角、部材変形角など）のレベルに見合った損傷量評価・推定モデルを構築するとともに、その限界を明確にしておくことが重要になる。

そういった観点からの研究の一例として、簡易な手法に基づく損傷量推定手法に関する検討事例を紹介する。

周らは¹⁷⁾、梁、柱部材の作用モーメントの大小（ひび割れモーメントを超えているか否か）だけでは表せない、ひび割れ定常状態に至る前後でのひび割れ発生状況に着目した簡易なひび割れ進展解析手法を考案した。この手法では、ひび割れモーメントを超えて暫くは1次ひび割れのみが進展し（長期荷重に対して数多く検討されてきた平均ひび割れ幅間でひび割れが発生するのではなく、その数倍の間隔で1次ひび割れが生じるものとし）、ひび割れモーメント時ひずみの β 倍のひずみに至ったときにひび割れ定常状態（既発ひび割れ間に新規のひび割れが発生せず、従来から数多く提案されている平均ひび割れ間隔ごとにひび割れが発生している状態）に至るモデルとしている。また、ひずみ分布のモデル化にあたっては静的載荷実験と動的載荷実験とでことなるひずみ分布になることを考慮するモデルを導入している（図9）。

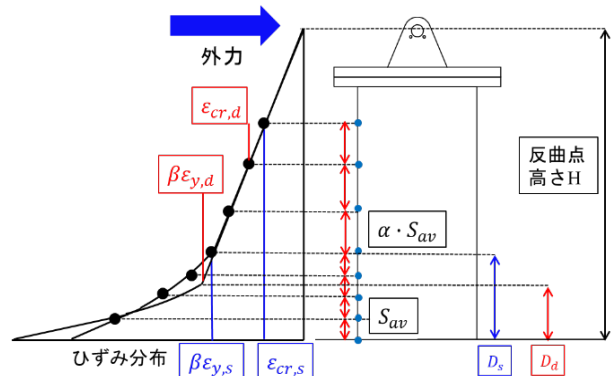


図9 ひび割れ発生とひずみ分布のモデル¹⁷⁾

図 9 において、 ϵ_{cr} ：ひび割れ強度時のひずみ、 ϵ_y ：主筋の降伏ひずみである。部材軸ひずみ ϵ が ϵ_{cr} を超過すると一次ひび割れが平均ひび割れ間隔 S_{av} の α 倍ごとに発生、 ϵ が主筋の降伏ひずみを ϵ_y の β 倍を超えた区間が生じると二次ひび割れが平均ひび割れ間隔 S_{av} ごとに発生する。このとき、 β ：塑性化進展域長さ係数、 D ：二次ひび割れが発生する塑性化進展域の長さである。

周らはこの簡易モデルを用いて、実大 4 階建 RC 造架構試験体の振動台実験結果¹⁸⁾のひび割れ進展状況を推定した(図 10)。簡便法であることから完全にひび割れ図を再現できるものではないが、ひび割れ定常状態に至る前後でのひび割れ発生状況を大まかに再現したと判断している。

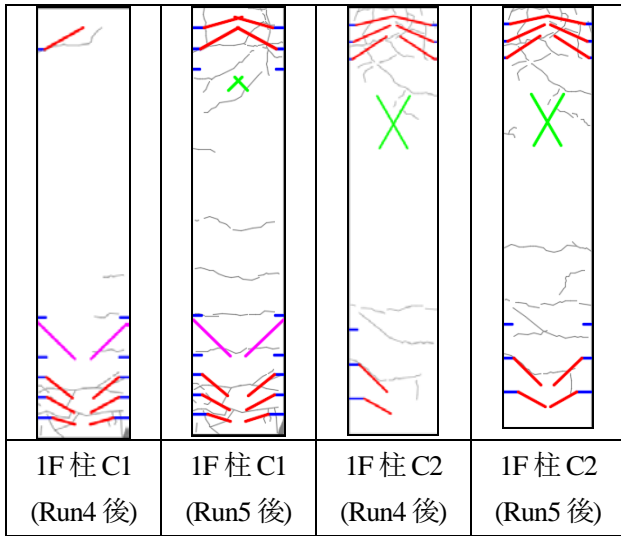


図 10 損傷量推定結果の比較(ひび割れ図)¹⁷⁾

耳塚ら¹⁷⁾は、壁部材に対して、ひび割れ定常状態に至る前後でのひび割れ発生状況に着目した簡易なひび割れ進展解析手法を考案した。評価手法の簡単なフローを図 11 に示す。

このモデルでは、1 次ひび割れ発生領域は圧縮ストラット上にあるとみなして、せん断剛性 G がひび割れ発生時の剛性 G_{cr} に達した時に一次ひび割れ間隔で初期ひび割れが発生し、ひび割れ定常状態時剛性 βG_0 に至ると、

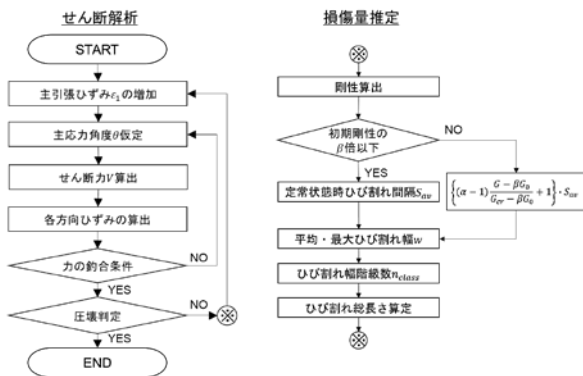


図 11 RC 壁部材のひび割れ幅分布関数¹⁴⁾

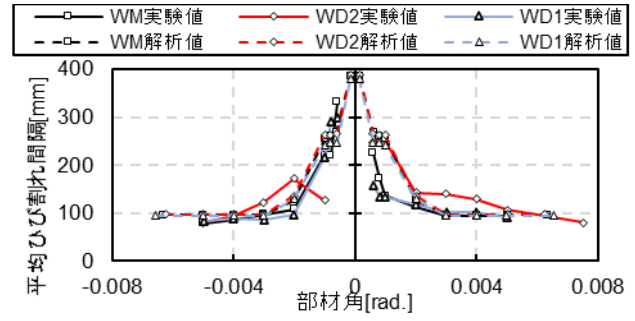


図 12 部材角—平均ひび割れ間隔関係¹⁴⁾

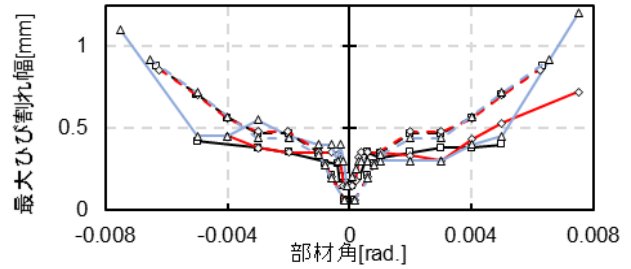


図 13 部材角—最大ひび割れ幅関係¹⁴⁾

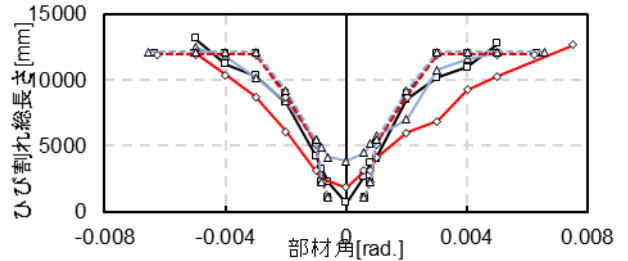


図 14 部材角—ひび割れ総長さ関係¹⁴⁾

ひび割れ定常状態になるものとしている。また、ひび割れの幅と長さの関係として前述の「ひび割れ幅分布モデル」を導入することで、ひび割れ幅と長さの両者について推定できるようにしている。この簡易モデルを用いて、3 体の壁試験体の静的載荷実験^{19), 20)}のひび割れ進展状況を推定した結果(図 12, 図 13, 図 14)、ひび割れ幅傾向、ひび割れ長さの増加傾向が概ね実験を再現したことが確認されている。

5. 地震時損傷量評価・推定のこれから

前述したように、性能評価型設計の本来の主旨に立ち返れば、修復性能評価において最終的に検討すべきなのは、ひび割れ幅、ひび割れ長さ、剥落面積といった一次情報ではなく、そこから(技術者と有識者の間で何を評価すべきかの価値観を共有できるまでにコンセンサスははかられ)導き出される指標、修復費用(cost)、修復時間(downtime)などの統合情報である。ただし、ひび割れ幅(補修工法単価の選定)、ひび割れ長さ(補修総量の算定)、剥落面積(補修単価の選定および補修総量の算定)は、修復費用および修復時間の試算に役立つことが期待されるほか、地震後の損傷状況を映像としてユーザーに伝達する際にも(「地震でどのような見た目まで損傷することが許容されるか」を伝えることが設計目標となるコ

ンセンサスが形成された場合に) 有用な情報たり得るものと考えられる。もちろん、ひび割れ幅、ひび割れ長さ、剥落面積を算出しただけでは、修復費用や修復時間といった指標にならず、部材変形を計算する手法の精度(地震動の設定や等価線形化法の精度)、損傷量推定手法の精度、修復費用などの損失計算における精度とのバランスを設計に際して考慮する必要がある。そしてこの問題は、つまるところ、性能評価型設計の普及・促進を阻害しかねない非常に複雑な問題(専門分野が広範に渡る問題)でもある。

一方で近年精力的に展開されているモニタリング技術を用いた研究や画像処理を用いた研究において、設計時応答評価が孕んでいたばらつきや誤差を地震時に補正する方法や、リアルタイム損傷量評価に基づいて損失評価手法にベイズ更新を適用する方法が提案されている。これらは、前述の精度問題に対して、難しい問題だからと諦めるのではなく、フィードバック型の現実的な対応を模索しているとも考えられる。言い換えれば、耐震設計にアジャイル開発的なエッセンスを導入することで、性能評価の理念を何かしらの形で達成しようとする試みの一環と思われる。

2000年代後半以降デジタルカメラの普及に伴い計測が容易になった損傷量に対して損傷量評価に関する研究が進展したように、2010年代以降のセンサ技術の普及(スマートフォンやドローンの普及に付随)および画像処理手法(深層学習を用いた画像処理を含む)の進歩によるモニタリングを通して、性能評価型設計における修復性能の扱いが(ただの掛け声倒れに終わることなく)アジャイル開発的に普及展開していくことを期待しながら本稿を閉じたいと思う。

参考文献

- 1) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造のひび割れ対策(設計・施工)指針・解説, 2002
- 2) 日本建築学会：鉄筋コンクリート部材の構造性能評価の現状と将来, 2019
- 3) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造計算規準・同解説 2018, 2018
- 4) 日本建築防災協会：再使用の可能性を判定し、復旧するための震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, 日本建築防災協会, 2016
- 5) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建築物の耐震性能評価指針(案)・同解説, 日本建築学会, 2004
- 6) 杉大地, 石森明行, 田嶋和樹, 白井伸明：スキヤンを用いた変位およびひび割れ幅計測結果に基づくRC部材の損傷評価(その2)せん断ひび割れ幅-せん断変形関係の定量的評価モデルの提案, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造IV, pp. 373-374, 2007
- 7) 高橋絵里, 高橋典之, 中埜良昭：鉄筋コンクリート部材の損傷量進展過程に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, No. 2, pp. 931-936, 2009
- 8) 高橋典之, 塩原等：鉄筋コンクリート構造物の耐震修復性能評価における損傷評価手法, 日本地震工学会大会 2004 梗概集, pp.110-111, 2005
- 9) Jun-ichi TAKAHASHI, Akenori SHIBATA and Toshio SHIGA: Crack Indices of Reinforced Concrete Shear Walls for Seismic Damage Evaluation, *Proc. of 9th World Conference on Earthquake Engineering*, Vol.4, pp.547-552, 1988
- 10) 伊藤幸恒, 伊藤哲男, 原昌信, 吉武勇, 中川浩二：トンネル覆工コンクリートのひび割れ変状とその点検評価, 土木学会論文集, No.714, VI-56, pp.233-238, 2002
- 11) 滝本和志, 石井清：ひび割れデータを用いたRC部材の損傷度評価に関する実験的研究, 清水建設研究報告, No.79, 2004
- 12) 向井智久, 斉藤大樹, 衣笠秀行, 福山洋：非耐力壁を有する実大RC造架構の修復性能評価に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.3, pp.1051-1056, 2008
- 13) 王一哲, 高橋典之：画像処理を用いたRC壁部材のひび割れ幅分布特性の評価, 日本建築学会構造系論文集, Vol.86, No.781, pp.481-489, 2021
- 14) 耳塚友貴, 高橋典之, 櫻井真人：RC造壁部材を対象とした簡易損傷量推定手法に関する研究, 構造工学論文集, Vol. 67B, pp.31-38, 2021
- 15) 高橋典之, 塩原等, 楠原文雄：鉄筋コンクリート構造物の耐震修復性能評価における修復費用関数, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 2, pp. 1543-1548, 2005
- 16) 寺岡勝, 林和也, 佐々木聡, 高森直樹：フラクタル幾何学を応用した鉄筋コンクリート造柱・梁接合部の損傷評価, コンクリート工学, Vol.42, No.8, pp.14-21, 2004
- 17) 周原, 高橋典之：実大RC造架構の地震時部材損傷量簡易推定手法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.40, No.2, pp.853-858, 2018
- 18) 長江拓也, 田原健一, 福山國夫, 松森泰造, 塩原等, 壁谷澤寿海, 河野進, 西山峰広, 西山功：4階建て鉄筋コンクリート造建物を対象とした大型振動台実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol.76, No.669, pp.1961-1970, 2011
- 19) 千葉幸大ほか：微小変形領域におけるRC造耐震壁の非線形性に関する検討(その19)乾燥収縮ひび割れを変数とした耐震壁の静的載荷試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1157-1158, 2018
- 20) 佐藤真俊ほか：微小変形領域におけるRC造耐震壁の非線形性に関する検討(その23)養生期間の異なる試験体の静的載荷実験結果, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.1259-1260, 2019