

論文 修正圧縮場理論とひび割れ幅分布特性を用いた RC 造壁部材の簡易損傷量推定手法

耳塚 友貴*1・王 一哲*1・高橋 典之*2・櫻井 真人*3

要旨：近年，経済的な観点から修復性能評価に資する RC 造部材のひび割れ進展解析手法や評価手法に関する研究が進められている。本研究では，せん断変形が卓越する RC 造壁部材のひび割れ間隔，ひび割れ幅，ひび割れ長さに着目した簡便なひび割れ進展推定手法の構築を目的として，Collins らによって提案された修正圧縮場理論と，ひび割れ進展に伴う剛性低下メカニズム，および，ひび割れ幅分布特性を用いた損傷量推定を行い，実験結果との比較検討を行った。検討結果より，壁部材の最大耐力，ひび割れ間隔・幅・長さの変動傾向を概ね推定可能であることを確認した。

キーワード：修正圧縮場理論，ひび割れ，壁部材，損傷量推定手法

1. はじめに

近年，環境問題や建築構造物の供用期間の長期化に伴う経済的な観点から，建築構造物の安全性能のみならず，地震等の外力に対する修復性能や損傷量推定手法および評価手法に関する検討が進められている^{例え1)}。特に RC 造部材におけるひび割れ進展解析・評価手法に関する研究が精力的に進められ，様々な解析・評価手法が提案されている^{例え2)}。しかし，RC 造壁部材については実験における正確な損傷量の計測にかかる労力が大きいことから損傷量推定・評価手法に関する実験的研究は柱梁部材ほど多くはない。一方，壁部材に関する解析手法の一例として，非線形 FEM を用いた解析により履歴特性，ひび割れ形状がある程度再現可能であることが報告されている³⁾。しかし一般建築物の構造設計に修復性能評価を普及させるためには簡便な損傷量推定手法の確立が不可欠であると考えられる。本研究では Collins ら⁴⁾が提案したせん断解析手法である修正圧縮場理論とひび割れ幅分布特性を用いて各変形状態における損傷量（ひび割れ幅，間隔，長さ）を推定する簡便手法を提案した。

2. 検討対象

2.1 対象試験体⁵⁾⁶⁾

試験体形状および配筋図を図-1 に，試験体諸元を表-1 にそれぞれ示す。試験体は 3 体で，いずれも壁厚 100mm のウェブ壁両端を，部材せい 150mm 幅 700mm のフランジ壁が挟む H 型断面で，せん断スパン比が 0.67 となるように壁内法長さを 780mm，壁長を 1650mm とした。フランジ壁の曲げ降伏先行を防ぐため，フランジ壁の縦筋比は 2.8%とした。材料特性は文献 6)，7)によるものとする。また対象試験体は乾燥収縮が壁部材の構造的

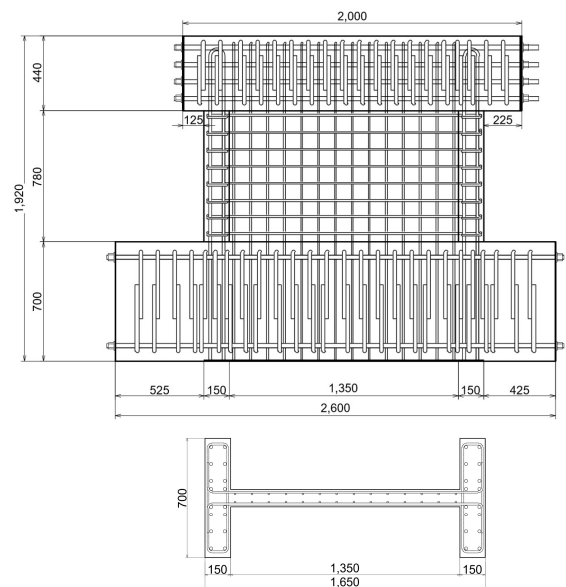


図-1 試験体形状および配筋図（単位：mm）

表-1 試験体諸元

試験体	WM 試験体	WD2 試験体	WD1 試験体
内法高さ	780mm		
フランジ	B×D 700×150mm		
主筋	16-D16($p_t=2.8\%$)		
帯筋	2-D10@100($p_w=0.95\%$)		
ウェブ	壁厚 100mm		
全長	1650mm		
壁筋	D10@100 ダブル（縦横）		
M/QD	0.67		
N/BD σ_B	0（軸力なし）		
養生方法	シールド	暴露（ウェブ壁表面のみ）	
養生期間	3 ヶ月		8 ヶ月
σ_B (N/mm ²)	35.5	34.3	38.7

能に及ぼす影響を検討するための試験体として養生条件が実験変数となっており，紙面の都合上詳細は割愛するが載荷開始前のひび割れ性状に差異がある⁶⁾。

*1 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻（学生会員）

*2 東北大学大学院 工学研究科 都市・建築学専攻 准教授 博(工)（正会員）

*3 秋田県立大学 システム科学技術学部建築環境システム学科 助教 博(工)（正会員）

2.2 荷重計画⁷⁾

実験は試験体上部スタブ中央の水平変位 δ を計測高さ $H = 1000\text{mm}$ で除した部材角 $R = \delta/H$ で荷重制御した。

初期荷重として $R=1/1000\text{rad}$ および $1/500\text{rad}$ で2サイクルの繰り返し荷重を実施した後、 $1/333\text{rad}$ ～ $1/1250\text{rad}$ までを5サイクル繰り返しの漸増荷重、 $1/1000\text{rad}$ および $1/500\text{rad}$ は2サイクルの繰り返し荷重、 $1/333\text{rad}$ 以降は1サイクルの正負交番荷重を実施した。なお、本実験では軸力は加えていない。

2.3 損傷量計測手法

本実験では、5060万画素の有効画素数を有するデジタルカメラを設置し、各荷重状態のピーク時および除荷時に試験体ウェブ壁面の損傷状態の撮影を行った。同時に、クラックスケールによる壁面の最大ひび割れ幅の計測を行った。その後、撮影したひび割れ画像の収差補正を行い、CAD上でひび割れ図の作成および計測ツールを用いてひび割れ長さ、ひび割れ間隔の計測を行った。なお、計測面には試験体背面を用い、ウェブ壁面のコンクリート表面に剥落が生じるまでを計測範囲とした。

また、収差補正後の画像解像度は $1\text{pixel} \approx 0.16\text{mm}$ である。すなわち本研究においては、ひび割れ幅が約 0.2mm 以上のひび割れが評価対象となる。

2.4 ひび割れ幅分布の特定

実験より得られたひび割れ画像からひび割れ以外のノイズ（コンクリート表面の汚れなど）を除去した後、二値化処理を施し、計測プログラムを用いて 0.05mm ごとに階級分けされたひび割れ幅に対応するひび割れ長さの計測を行った。図-2に計測プログラムの概要を示す。

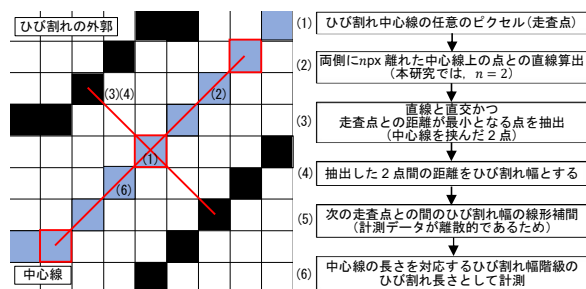


図-2 ひび割れ幅分布の自動計測手法概要

3. 実験結果

3.1 荷重 - 変位関係および損傷量測定結果

荷重 - 変位関係は紙面の都合上、文献5)、文献6)によるものとする。また、損傷量計測結果は5章の推定結果と併せて記載する。

3.2 ひび割れ幅分布

図-3に地震時せん断ひび割れが卓越するWM試験体（シールド養生試験体、 $+1/200\text{rad}$ 時）のひび割れ幅分布を示す。横軸は 0.05mm ごとに階級分けされたひび割れ

幅、縦軸はひび割れ総長さに対する各ひび割れ幅階級の対応ひび割れ長さの比である。平均値は 0.4415mm 、分散は 0.0263 であった。平均ひび割れ幅を示す階級が総ひび割れ長さの20%以上を占めており、その階級をピークとしてひび割れ幅が分布していることが確認された。

図-4に実験結果を累積表示したものと、式(1)に表される対数正規分布関数との関係を示す。

$$F(x) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right] dx \quad (1)$$

ここに、 λ : 確率変数 X の自然対数の平均値、 ζ : X の自然対数の標準偏差である。図-4より試験体に発生したひび割れは対数正規分布とよく対応することが確認された。よって、本研究ではひび割れ幅分布は対数正規分布に従う確率現象として扱うこととする。

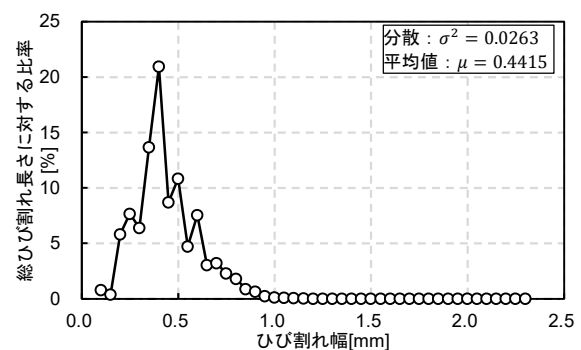


図-3 ひび割れ幅分布

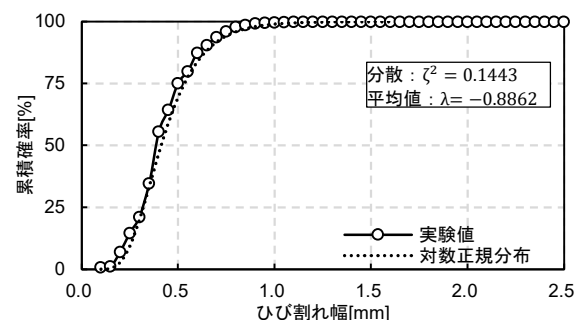


図-4 対数正規分布との対応

4. 推定手法の概要

4.1 修正圧縮場理論⁴⁾

修正圧縮場理論（The Modified Compression Field Theory）は、Collinsらによって提案されたせん断解析手法である。この理論は、RC平板に発生する地震時せん断ひび割れを面内に平均的に分布する斜めひび割れとみなし、斜めひび割れが生じたRC要素内に働く応力・ひずみを平均化して取り扱い、要素内のひずみの適合条件、材料構成則および力のつり合い条件を用いることにより、地震時せん断ひび割れ発生以前から破壊（コンクリートの圧壊）に至るまでの力学的挙動を算出するものである。

4.2 推定フロー

修正圧縮場理論を用いた解析から得られる各変形状態における剛性および各方向のひずみからひび割れ幅、間隔を推定し、それらとひび割れ幅分布特性を用いてひび割れ長さの推定を行う。ただし、ひび割れ進展は不可逆性を有するもの（一度開いたひび割れはそのまま）とする。

4.2.1 ひび割れ間隔推定

一般にひび割れ間隔は一定値ではなく部材の変形状態に応じて変動することが実験等により確認されている。文献 8) に示されている平均ひび割れ間隔 S_{av} (式(2)) はひび割れ定常状態到達後におけるひび割れを扱うものであり、定常状態以前のひび割れ間隔を評価しているものではない。

$$S_{av} = \frac{3\sigma_t b_e t_w \{2.6 - 0.93 \log[0.5(S_x + S_y)]\}}{[n\tau_{max}(\phi_x + \phi_y)] \cos \theta_{cr}} \quad (2)$$

ここに、 σ_t : コンクリートの引張強度、 t_w : 壁厚、 τ_{max} : 鉄筋とコンクリートの付着強度、 ϕ_x , ϕ_y : 横筋および縦筋の鉄筋周長、 n : 鉄筋段数、 S_x , S_y : 横筋および縦筋の鉄筋間隔、 θ_{cr} : ひび割れの角度である。本研究では、定常状態到達以前のひび割れ挙動も推定することを目的として、ひび割れが発生および拡幅・進展する過程で剛性が低下することを考慮し、解析における初期剛性に対する剛性低下率をひび割れ進展のパラメータとした。すなわち、新規ひび割れの発生に伴い剛性低下し、ひび割れ定常状態到達時には剛性が初期剛性の β 倍となることを、解析上のひび割れ進展判定基準に反映させた。式(2)により算出されたひび割れ間隔を定常状態時の平均ひび割れ間隔とする。この間隔の $\alpha (= 2^{n-1})$ 倍で発生するひび割れを一次ひび割れとし、平均ひび割れ間隔ごとに発生するひび割れを n 次ひび割れとする。ここで、本研究における定常状態到達以前のひび割れ間隔の変動を式(3)のように仮定する。定常状態到達以後は $S_{cr} = S_{av}$ とした。

$$S_{cr} = \left\{ (\alpha - 1) \frac{G - \beta G_0}{G_{cr} - \beta G_0} + 1 \right\} \cdot S_{av} \quad (3)$$

ここに、 S_{cr} : ひび割れ間隔、 G : せん断剛性、 G_0 : 初期

剛性、 G_{cr} : ひび割れ発生時の剛性、 α : 拡大係数で 2^{n-1} (文献 1) より $n=2$)、 β : 定常状態到達時剛性低下係数 (本研究では 0.10 とした) である。なお、ここでの剛性は解析上の各ステップにおけるせん断力増加分をせん断変形角増加分で除したものとする。

また、解析で初期条件として与えた主引張ひずみ ε_1 から適合条件と材料構成則を用いて各変形状態におけるせん断力を算出する過程において、主応力角度 (ひび割れ角度) θ が収束計算される。平均ひび割れ間隔 S_{av} は式(2)で表現されるように、ひび割れ角度 θ_{cr} に依存する値である。解析フローでは力 (軸力) のつり合い条件を満たすために主応力角度 θ は収束計算時に変動するが、一般に実現象において既発ひび割れ角度 θ_{cr} が変形状態に応じて変動することはない。そこで、解析フロー上で主引張ひずみ ε_1 がひび割れ発生ひずみ ε_{cr} に達した時の主応力角度 θ をひび割れ角度 θ_{cr} と設定し、式(2)によって、平均ひび割れ間隔 S_{av} を算出する。なお、本研究では 2 次ひび割れ以降のひび割れ角度についても 1 次ひび割れ角度と同値と仮定する。

4.2.2 ひび割れ幅推定

図-5 にひび割れ方向、各方向ひずみを定義した。ここに、 ε_1 : 主引張ひずみ、 ε_2 : 主圧縮ひずみ、 ε_v : 材軸方向ひずみ、 ε_h : 材軸直交方向ひずみ、 $\varepsilon_\perp$: ひび割れ直交ひずみ、 θ : 主応力角度、 θ_{cr} : ひび割れ角度である。また、平均ひび割れ間隔 S_{cr} にモールのひずみ円 (図-6) を用いて算出されたひび割れ直交方向ひずみ $\varepsilon_\perp$ を乗じたものを平均ひび割れ幅 w_{ave} とした (式(4)、式(5))。

$$\varepsilon_\perp = \frac{\varepsilon_1 - \varepsilon_2}{2} + \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{2} \sin 2(\theta_{cr} - \theta) \quad (4)$$

$$w_{ave} = \varepsilon_\perp S_{cr} \quad (5)$$

なお、最大ひび割れ幅 w_{max} は解析で得られる平均ひび割れ幅を文献 8) の指針式を変形することで得られる式 (6) を用いて算出した。

$$w_{max} = \left(\frac{29.2}{S_{cr}} + 1.53 \right) \cdot w_{ave} \quad (6)$$

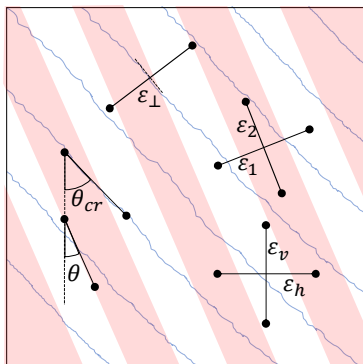


図-5 ひび割れ方向・ひずみ方向

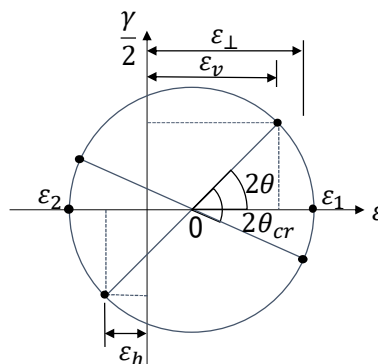


図-6 モールのひずみ円

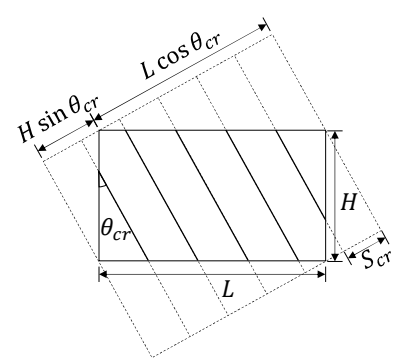


図-7 ひび割れ総長さ

4.2.3 ひび割れ長さ推定

ここでは文献9)を参考に本手法で得られるひび割れ間隔、幅とひび割れ幅分布モデルを用いてひび割れ幅の階級ごとにひび割れ長さを求める。

まず、ひび割れ幅分布が対数正規分布に従うことから、解析から得られる平均ひび割れ幅と式(7)を用いて平均値 λ (ひび割れ幅の自然対数をとったものの平均値) が推定できる。

$$\lambda = \ln\left(\frac{\mu}{\sqrt{1 + \nu^2}}\right) \quad (7)$$

ここに、 μ : 確率変数 X (ここではひび割れ幅 w) の平均値、 σ : X の標準偏差、 ν : 変動係数である。なお、文献10)より、ひび割れの進展により標準偏差が大きく変動することがないことが確認されていることから、本研究では実験により得られた標準偏差 ($\sigma = 0.16$, $\zeta = 0.38$) を用いた。また、実験により確認された乾燥収縮ひび割れの進展は微小であることから、本研究では地震時せん断ひび割れの進展にのみ着目することにした。

次に、上限のない確率密度関数として表現されるひび割れ幅分布を、 w_{max} を上限とする n_{class} 個のひび割れ幅階級として扱うことによりひび割れ幅階級ごとのひび割れ長さを推定する。

ここでまず、図-7 より幾何学的にひび割れ総長さ l_{av1} (式(8)) を定める。

$$l_{av1} = \frac{H}{\cos \theta_{cr}} \left(\frac{H \sin \theta_{cr} + L \cos \theta_{cr}}{S_{cr}} - 2q \right) + \frac{q(q+1)S_{cr}}{\sin \theta_{cr} \cos \theta_{cr}} \quad (8)$$

$$q = \frac{H \sin \theta_{cr}}{S_{cr}} \quad (9)$$

ここに、 L : 壁長、 H : 内法高さである。ただし、 $q < 1$ のとき、 $q = 0$ とする。

最大ひび割れ幅を含むひび割れ長さを l_{max} (式(10)) とおくと、ひび割れ幅分布から推定される n_{class} 個の階級に分割されたひび割れ長さの合計値は式(11)で示される。

$$l_{max} = \frac{H}{\cos \theta} \quad (10)$$

$$l_{av2} = \sum_{i=1}^{n_{class}} \left\{ \frac{f\left(\frac{2i-1}{2n_{class}} w_{max}\right)}{f\left(\frac{2n_{class}-1}{2n_{class}} w_{max}\right)} \right\} l_{max} \quad (11)$$

ここで、確率密度関数 $f(x)$ は式(12)で表される。

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\zeta x} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \lambda}{\zeta}\right)^2\right] \quad (12)$$

本研究では式(8)と式(11)が等しくなる (近似する) ように、すなわち幾何学的に表現されるひび割れとひび割れ幅分布から推定されるひび割れのそれぞれの本数が等価となるようにひび割れ幅階級 n_{class} を定めるものとした。

最後に、任意のひび割れ幅階級ごとのひび割れ長さ l_i について確率分布関数を用いて、最大ひび割れ幅を含むひび割れ長さ l_{max} との比から式(13)で算出する。

$$l_i = \frac{F\left(\frac{w_{max}}{n_{class}} i\right) - F\left(\frac{w_{max}}{n_{class}} (i-1)\right)}{F(w_{max}) - F\left(\frac{n_{class}-1}{n_{class}} w_{max}\right)} \cdot l_{max} \quad (13)$$

なお、本研究ではひび割れ総長さ l_{total} は式(14)の条件を満たすように求めた。

$$l_{total} = \sum_{i=1}^{n_{class}} l_i \leq l_{av1} \quad (14)$$

以上の平均ひび割れ間隔 S_{cr} 、最大ひび割れ幅 w_{max} 、ひび割れ長さ l_{total} を実験値との比較対象とした。また、モールのひずみ円を用いて算出されるせん断ひずみ γ を用いて実験値との比較を行った。

$$\gamma = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) \cdot \sin 2\theta \quad (15)$$

4.3 材料構成則¹¹⁾

コンクリート圧縮特性として式(16)を用いた。また、コンクリートの2軸効果を考慮し、1軸圧縮強度を低減させた (式(17))。引張特性は、ひび割れが生じるまでは線形 (式(18)) とし、ひび割れ発生後の tension stiffening 効果を考慮した Vecchio&Collins 式 (式(19)) を用いた。

$$f_{c2} = f_{c2max} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon'_c} \right) - \left(\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon'_c} \right)^2 \right] \quad (16)$$

$$\frac{f_{c2max}}{f'_c} = \frac{1}{0.8 - 0.34 \varepsilon_1 / \varepsilon'_c} \leq 1.0 \quad (17)$$

$$f_{c1} = \frac{2f'_c}{\varepsilon'_c} \varepsilon_1 \quad (\varepsilon_1 \leq \varepsilon_{cr}) \quad (18)$$

$$f_{c1} = \frac{\alpha_1 \alpha_2 f_{cr}}{1 + \sqrt{500 \varepsilon_1}} \quad (\varepsilon_{cr} < \varepsilon_1) \quad (19)$$

ここに、 f_{c2} : 主圧縮応力、 f_{c2max} : 低減された1軸圧縮強度、 f'_c : 圧縮強度、 f_{c1} : 主引張応力、 f_{cr} : 引張強度、 ε_{cr} : ひび割れ発生ひずみ、 ε'_c : 圧縮強度時のひずみ、 α_1 : 鉄筋の付着特性による係数、 α_2 : 作用荷重の特性を表す係数 (繰返し載荷: $\alpha_2 = 0.7$) である。

鉄筋の応力-ひずみ関係は、完全弾塑性とし、計算処理の簡便性を考慮してひずみ硬化領域を無視した。

4.4 壁部材の矩形置換

解析におけるせん断力算定において、側柱の影響について全断面積は考慮せず文献12)を参考に側柱の有効断面積による効果を壁長さの増分に換算して、アーチまたはトラス機構に有効な壁長さとして算出し、側柱を含めた壁部材を長方形断面に置換して解析を行った。

5. 推定結果

図-8、表-2 に解析によって得られた荷重-せん断部材角関係と文献13)に示される手法を用いて抽出した荷

重一せん断変形成分との比較を、図-9、図-10、図-11にひび割れ間隔とひび割れ幅、ひび割れ長さそれぞれについて実験値との比較を示す。

図-8、表-2よりWM試験体では最大耐力、剛性ともに実験結果を概ね近似したが、WD2試験体およびWD1試験体については最大耐力、剛性ともに過大評価した。これは乾燥収縮による影響を解析で考慮していないこと、繰り返し载荷による物性変化（剛性低下、鉄筋の

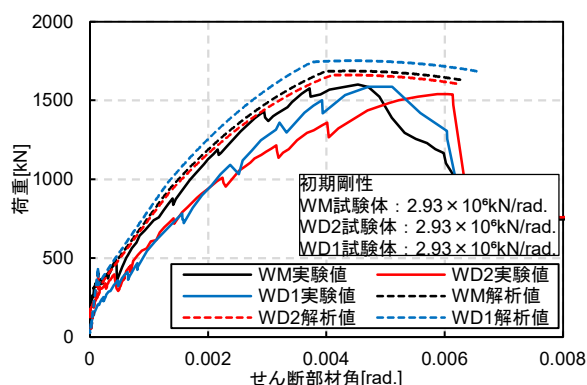


図-8 荷重一せん断部材角関係

表-2 最大耐力点

	WM 試験体	WD2 試験体	WD1 試験体
実験値	1604kN 4.5×10^{-3} rad.	1541kN 6.1×10^{-3} rad.	1588kN 5.1×10^{-3} rad.
解析値	1687kN 4.4×10^{-3} rad.	1661kN 4.4×10^{-3} rad.	1752kN 4.4×10^{-3} rad.

疲労)を考慮できていないことが原因として考えられる。

図-9より、解析値は部材角 $0.0024 \sim 0.0025$ rad.程度で定常状態に達したことが確認された。また、ひび割れ角度は各試験体ともに 0.79 rad.が記録され、これらの値を用いて平均ひび割れ間隔の算定を行った。これにより定常状態に達する以前の平均ひび割れ間隔は試験体・载荷方向によりばらつきが大きいものの、ひび割れ間隔の減少傾向、定常状態に達した時（ひび割れ間隔が一定値をとり始める点）の部材角や定常状態到達後の平均ひび割れ間隔は概ね推定可能であることが確認された。

図-10より、最大ひび割れ幅について変形が増大するにつれ解析値が実験値を過大評価する傾向が見られたが、ひび割れ幅傾向を概ねとらえていることが確認された。本研究では、定常状態到達時剛性低下係数 β を 0.10 と仮定し、定常状態到達判定の基準、ひび割れ進展の指標としているが、今後この妥当性の検証が必要である。

図-11より、実験値についてWM試験体、WD2試験体、WD1試験体の順に乾燥収縮の影響により初期ひび割れが多く発生していることが確認された。本推定手法により、乾燥収縮ひび割れの影響が小さいWM試験体は、ひび割れ長さの進展傾向を概ねとらえているが、WD2試験体およびWD1試験体については、解析では材齢による材料強度上昇分のみ考慮し、乾燥収縮による初期ひび割れによる影響を考慮していないことで、解析結果は実験結果を過大評価した。これは、乾燥収縮ひび割れ部の

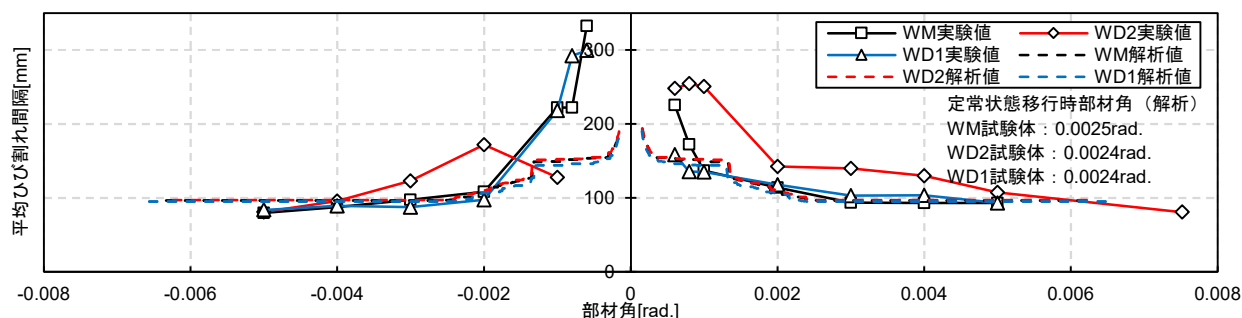


図-9 部材角一平均ひび割れ間隔関係

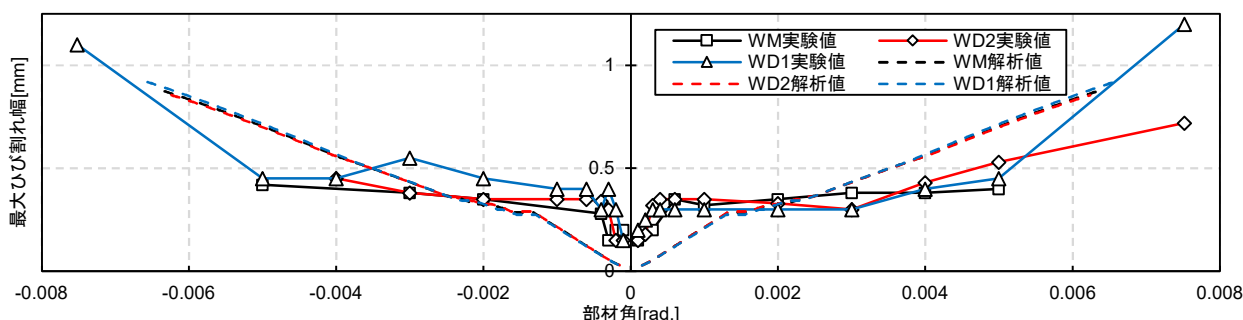


図-10 部材角一最大ひび割れ幅関係

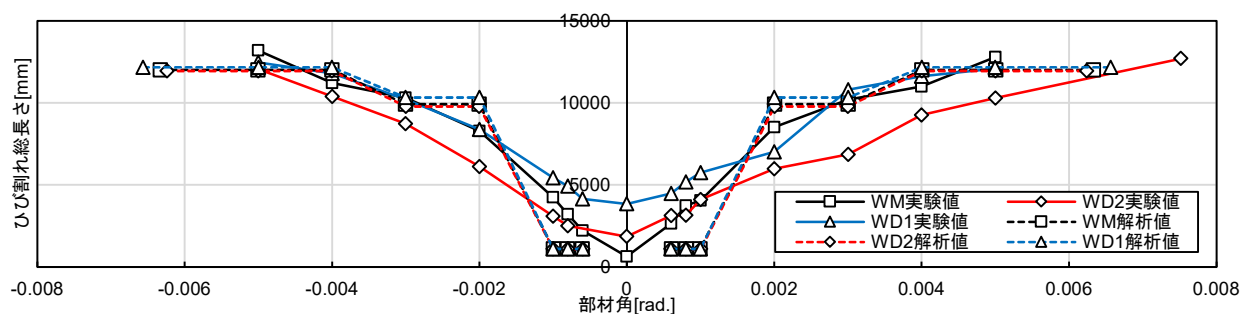


図-11 部材角－平均ひび割れ総長さ関係

拡幅・変形がせん断変形を幾らか負担し、地震時せん断ひび割れの発生・進展が低減されたものと考えられる。但し WD1 試験体と WD2 試験体の解析および実験結果の差の定量評価については今後分析を進める予定である。

6. まとめ

提案手法を用いて、せん断変形が卓越する RC 造壁部材のひび割れ進展の推定を行い、実験値との比較を行った。以下に得られた知見を示す。

- 1) 修正圧縮場理論を壁部材に適用した解析によるせん断耐力計算により、やや大きめに評価する傾向はあるものの最大耐力は概ね推定可能であることが確認された。最大耐力が大きめに評価された要因として乾燥収縮の影響を考慮していないこと、繰り返し載荷による物性変化（剛性低下、鉄筋の疲労）を十分に考慮していないことなどが考えられる。
- 2) 初期剛性に対する剛性低下率をひび割れ進展の判断基準としたひび割れ進展解析により、ひび割れ定常状態に達するときの部材角、ひび割れ角度およびそれに付随する平均ひび割れ間隔の減少傾向を概ね推定可能であることを確認した。
- 3) ひび割れ幅について、ひび割れの拡幅し始める部材角（定常状態に達する部材角）の推定結果は概ね一致しており、ひび割れの拡幅傾向も概ね推定可能であることが確認された。
- 4) ひび割れ幅分布形状を用いたひび割れ長さ推定により、ひび割れ長さの増加傾向および実験値と解析値でひび割れ長さが概ね一致していることが確認された。

参考文献

- 1) 周焜，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.853-858，2018.7
- 2) 日本コンクリート工学会：コンクリート構造物のひび割れ進展評価手法に関する研究委員会報告書，2013.7

- 3) 櫻井真人，松井智哉，倉本洋：複数開口を有する RC 造耐震壁の非線形 FEM 解析，日本建築学会構造系論文集，第 74 巻 第 639 号，pp.915-923，2009.5
- 4) Vecchio, F. J., Collins, M. P.: The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear, ACI JOURNAL, Vol.83, No. 2, pp.219-231, 1986
- 5) 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会梗概集，pp.1157-1158，2018.9
- 6) 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.1259-1260，2019.9
- 7) 櫻井真人ほか：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 17）乾燥収縮の有無を変数とした耐震壁試験体の構造実験概要，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1153-1154，2018.9
- 8) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の耐震性能評価指針（案）・同解説，2004
- 9) 長澤保紀，滝本和志：鉄筋コンクリート平板のひび割れ画像の考察，土木学会第 46 回年次学術講演会，pp.518-519，1991.9
- 10) 高橋典之，高橋絵里，中埜良昭：鉄筋コンクリート部材のひび割れ量推定モデルの検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.2，pp.859-864，2009.7
- 11) Collins, M. P., Mitchell, D., Canadian Prestressed Concrete Institute : PRESTRESSED CONCRETE BASICS, 1987
- 12) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針・同解説，1999
- 13) 尾形芳博ほか：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 5）変形成分の分析，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1289-1290，2016.8