

# RC造耐震壁の損傷が耐震性能低下に及ぼす影響と損傷量評価法に関する実験的研究

## EXPERIMENTAL STUDY ON THE INFLUENCE OF DAMAGE TO SEISMIC PERFORMANCE OF RC SHEAR WALL AND THE EVALUATION METHOD OF DAMAGE LEVEL.

半沢 守 (性能制御システム学分野)  
Mamoru HANZAWA

### Abstract

In this study, different levels of damage are induced to RC shear wall specimen, "pre-loading", then the specimens are loaded again until failure. The purpose of tests was to clarify the influence of the induced damage on the residual seismic capacity. In addition, a method is proposed to quantitatively evaluate the level of damage corresponding to deformation experienced during earthquake for RC shear walls, RC beams, and RC columns. The main results of this study are summarized as following:

1. The previous damage due to pre-loading is unlikely to affect the maximum strength and deformation capacity of shear walls at their ultimate state. However, in the range of the experienced deformation during preloading stage, the stiffness and energy dissipation were significantly reduced.
2. A method is proposed to estimate the experienced deformation after an earthquake based on the total residual crack width in each member. Then, damage level evaluation of each structural member is judged based the proposed method. The applicability of the proposed method was investigated by its application on actual damaged buildings due to Great East Japan Earthquake 2011

**Keywords** : Residual seismic capacity, Shear wall, flexure wall, Damage class, Damage level evaluation,  
残存耐震性能, せん断壁, 曲げ壁, 損傷度, 損傷量評価

### 1. はじめに

地震によって被災した鉄筋コンクリート（以下、RC）造建築物の残存耐震性能は、被災後の残留ひび割れ幅などの損傷状況から分類する損傷度に基づいて、被災度区分判定基準<sup>1)</sup>（以下、現行基準）により定量的に評価する方法が提案されている。しかし、耐震壁を主要な耐震要素とするRC構造物や、近年の性能設計に基づく靱性型の梁部材の残存耐震性能に関しては、損傷と性能低下に着目した実験データが少ないことから、評価基準が十分には検討されていない。そこで本研究では、曲げ破壊先行型側柱付き耐震壁、およびせん断破壊先行型フランジ壁付き耐震壁に関して繰り返し載荷実験を実施し、異なる変形レベルを経験した際、各応答変形に対する損傷の大きさが、耐力や変形能力、エネルギー吸収能力といった各構造性能低下に及ぼす影響を明らかにする。また、耐震壁、梁部材、柱部材のひび割れ幅などの損傷の観測結果を用いて、応答変形に対応した損傷量を定量的に評価する方法を提案し、被災度区分判定等に利用可能な実用的損傷量評価指標の構築を目的とする。

### 2. 耐震壁の静的加力実験

#### 2.1 実験概要及び試験体概要

表-1に試験体諸元を示す。試験体は曲げ破壊先行型側柱付き耐震壁（FC-series）、せん断破壊先行型フランジ壁付き耐震壁（SF-series）とし、実験変数は後述の「事前加力」によって与える損傷の有無（及び大きさ）である。各シリーズの無損傷の試験体1体（FC-06-D0, SF-13-D0）に対し、損傷度Ⅰ～Ⅳとなるように、「事前加力」を加えた4体（Ⅰ～Ⅳ）

表-1 試験体諸元

試験体諸元		FC-06 series	SF-13 series
壁高さ×内包長さ	mm×mm	1000×1400	1000×1560
壁厚	mm	120	120
壁配筋	縦・横	D6@40 Double	D6@80 Double
鉄筋比	Fs (%)	0.66	1.32
b×D	mm×mm	200×200	600×120
主筋		12-D16	D6@80 Double
帯筋		2-D10@60	D6@80 Double
コンクリート強度	Fc N/mm <sup>2</sup>	27	

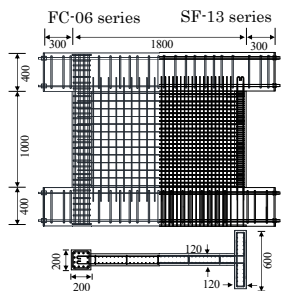


図-1 試験体配筋図 (単位: mm)

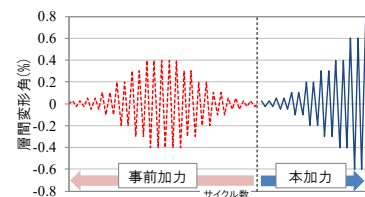
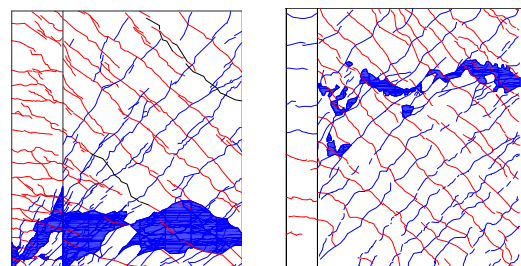


図-2 加力履歴図 (SF-13-DIII)



(a) FC-06-D0

(b) SF-13-D0

図-3 無損傷試験体荷重-変形関係及び最終破壊図

の計5体とした。図-1に試験体配筋図を併せて示す。試験体は、せん断スパン比が1/4程度となるような形状とした。壁の厚さは120mmとし、壁筋比がFC-seriesは0.66%、SF-seriesは1.32%となるように配筋をした。

## 2.2 加力計画

加力は軸応力度0.5N/mm<sup>2</sup>の一定軸力を両側柱あるいは直交壁に加え、反曲点高さをFC-seriesは下スタブから1750mmの位置に、SF-seriesは壁高さ中央の位置に維持しながら、正負交番繰り返し静的漸増増荷を行った。加力は前述の通り事前加力と本加力に分けて行っており、代表してSF-13-DIII試験体の加力履歴図を図-2に示す。同図に示すように事前加力終了時に小変形の増荷を繰り返すことで、残留変形をほぼ0にし、その後本加力を行った。

## 2.3 実験結果

図-3に無損傷試験体FC-06-D0, SF-13-D0の最終破壊写真を、図-4に全試験体の荷重-変形関係包絡線を示す。FC-seriesは1.0%付近で最大耐力を迎え、その後1.5%付近で急激に耐力が低下し、壁板の滑り破壊により終局を迎えた。SF-seriesは0.6%付近で最大耐力を迎え、その後コンクリートが圧壊、急激に耐力が低下し、壁板のせん断圧縮破壊により終局を迎えた。図-4を見ると、各シリーズとも事前加力の大きさによらず同程度の最大耐力を發揮していることが分かる。小変形時を比較してみると、各シリーズとも事前加力で経験した小変形時には無損傷試験体に比べ剛性低下しているが、未経験変形に達すると剛性耐力が回復した。

## 3. 破壊形式を分けた部材の残存耐震性能評価

### 3.1 既往実験概要

表-2に、本研究の検討に用いた既往実験<sup>2), 3)</sup>の試験体諸元を示す。既往実験は、1998年～2018年に実施された部材実験及び架構実験であり、曲げ梁11体、曲げ柱6体、曲げ壁8体、せん断柱8体、せん断壁13体である。なお、せん断壁の部材実験は試験体が経験した事前損傷（無損傷～損傷度□）の大きさをパラメータとした実験である。

### 3.2 各部材の性能低下の評価

図-4に各性能低減係数の概念図を示す。まず耐力低減係数は、無損傷の最大耐力に対する損傷ありの最大耐力の比とする。続いて、変形性能低減係数は、伊藤ら<sup>2)</sup>が定義した、Park&AngのD指標に基づき、損傷後の終局変形を求め、損傷前後における終局変形の比率から算出する方法とする。上記の2つの低減係数は、終局に関わる低減係数である。

また、減衰低減係数は、損傷前後の履歴ループ面積比として、安全限界以前の変形を評価する際にも損傷度I～IVに応じて低減係数を定義する。最後に剛性低下係数は、初期剛性に対する各変形時の割線剛性と定義する。

上記の定義により、各性能低減係数を求めることを基本とするが、せん断壁は事前損傷をパラメータとした実験結果であるため、直接その結果（無損傷試験体に対する事前損傷試験体の各性能低減率）を用いて求める。

表-4に上記の定義に基づいて定めた各性能低減係数の値を示す。値は、安全側の評価とするために、各損傷度範囲内

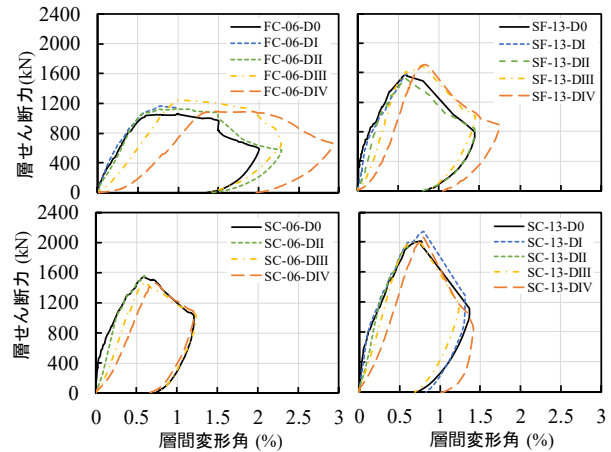


図-4 荷重-変形関係包絡線

表-2 既往実験の試験体諸元

部材種	実験年	試験体名	幅or壁厚	せい	スパン	主筋(壁縦筋)	p <sub>r</sub>	せん断補強筋(壁横筋)		p <sub>w</sub>	σ <sub>b</sub>		
								%	%				
曲げ梁	1998	L-100	300	450	900	4-D19	SD345	1.21	4-D10@75	SD345	1.27		
		L-400											
		2-100			1800				2-D10@100			0.48	
		2-400											
	2016	L-Cyc	320	720	2580	8-D22	SD295	0.55	4-R10@120	SD345	0.743		
		LD-μ5							2-R10@145			0.307	
曲げ柱	2000	F-75	400	500	1500	10-D19	SD345	0.57	2-12φ@75	SR235	1.27		
		F-45							2-12φ@125			0.45	
		H-45							2-6φ@37.5				0.75
		S2-1							2-D6@160				
	2002	S2-2	400	400	1600	10-D16	SD390	0.5	2-D6@80	SD390	0.2		
		S2-4							2-D6@80			0.4	
曲げ壁	2010	HFD-WR	60	1750	1500	D4@100 single	SD295	0.2	D4@100 single	SD295	0.2		
		HF-WR				D4@50 Double			0.8			D4@50 Double	0.8
	2016	F-06-D0	120	1800	1000	D6@80 Double	SD295	0.6		D6@80 Double	SD295	0.6	
		F-06-DI							D6@80 Double	0.6			
せん断柱	2000	F-19	400	500	1500	12-9φ	SD345	0.71	2-12φ@300		SR235	0.19	
		H-19							2-6φ@300	0.64			
		S1-4							4-D6@80				0.4
		101							16-D22				
	2010	109	300	300	600	16-D22	SD345	1.21	2-D6@150		SD295	0.09	
		102							12-D19	1.27			
2012	103	300	300	600	12-D16	SD345	0.88	2-D4@100	SD295		0.09		
	203							2-D4@40		0.23			
せん断壁	2015	S-13-D0	120	1800	1000	D6@40 Double	SD295	1.32	D6@40 Double		SD295	1.32	
		S-13-DI											
		S-13-DII											
		S-13-DIII											
	2016	S-13-DIV	120	1800	1000	D6@80 Double	SD295	0.66	D6@80 Double	SD295	0.66		
		S-06-D0											
2018	S-06-DII	120	1800	1000	D6@40 Double	SD295	1.32	D6@40 Double	SD295	1.32			
	S-06-DIII												
	S-06-DIV												
	S-13-D0												

表-3 各部材の損傷度区分の仮定

損傷度	変形角 (%)					
	曲げ梁	曲げ柱	曲げ壁	せん断梁	せん断柱	せん断壁
I	~0.3	~0.2	~0.2	~0.2	~0.1	~0.1
II	0.3~1.5	0.2~0.6	0.2~0.6	0.2~0.8	0.1~0.3	0.1~0.3
III	1.5~2.5	0.6~1.2	0.6~1.0	0.8~1.5	0.3~0.6	0.3~0.6
IV	2.5~4.0	1.2~1.8	1.0~1.5	1.5~2.0	0.6~1.0	0.6~0.8
V	4.0~	1.8~	1.5~	2.0~	1.0~	0.8~

の下限值とした。結果は、せん断部材は概ね曲げ部材に比べて、耐力・変形・減衰性能の低下が顕著であった。

## 4. ひび割れ幅を用いた損傷量評価法の提案

### 4.1 ひび割れ幅と本数による耐震壁の損傷量評価手法

現行基準では最大残留ひび割れ幅の大きさにより損傷した部材の損傷度を判定する方法が古くから用いられている。一方、耐震壁のように多くのひび割れが発生する部材では全変形量に対して最大ひび割れ幅の占める割合が小さく、同基準

の方法ではばらつきが大きくなる恐れがあり、これらの損傷量評価手法を以下に検討する。

前述の課題から既往の研究<sup>4)</sup>では、耐震壁壁板に45°方向(対角方向?)に引いた線を横切るひび割れ幅の合計(総ひび割れ幅)を測定区間長さで除すことで基準化ひび割れ幅と定義し、損傷度を分ける指標としての有用性について検討している。また、せん断破壊先行型の耐震壁に対し対角45°方向に入る残留せん断ひび割れ幅の合計値(以下、総残留ひび割れ幅)を用いて経験変形を推定するという検討を行っている<sup>5) 6)</sup>。本検討では、基準化ひび割れ幅の検討を柱梁にも適用し、妥当性の検討を行う。また曲げ変形が卓越する部材に対して経験変形の推定を可能にするため、耐震壁部材、柱部材、梁部材に対して曲げひび割れ幅から曲げ変形 $\delta_f$ を、せん断ひび割れ幅からせん断変形 $\delta_s$ を算出し、それらを足し合わせることで部材の変形 $\delta$ ( $=\delta_s+\delta_f$ )を算出し、その有用性の検討を行う。

本手法では、図-8(a)に示す耐震壁におけるせん断変形モデルを用いて壁板の対角方向の変形量( $\delta_1, \delta_2$ )からピーク時層間変形量( $\delta$ )を推定する。対角方向の引張変形量 $\delta_i$ は対角方向のひび割れに起因するため、壁板の対角線を横切る総ひび割れ幅が対角変形量に近似する( $\delta_i=2W_s$ )と仮定し、変形量を算出する。また、式(2)については曲げひび割れが壁板脚部に集中していると仮定し算出した。

$$\delta_s = \frac{1}{\alpha_s} \times \frac{\sqrt{H^2 + L^2}}{2L} \times \frac{\gamma + 1}{\gamma} \sum W_s \quad (1)$$

$$\delta_f = \frac{1}{\alpha_f} \times H \times \sum W_f / x_n \quad (2)$$

ここで $\gamma$ は圧縮歪に対する引張歪の比率、 $\alpha_s$ はピーク時に対する除荷時のせん断ひび割れの残留率、 $\alpha_f$ はピーク時に対する除荷時の曲げひび割れの残留率、 $x_n$ は中立軸位置とする。

柱部材については式(3)、(4)を用いて経験変形を推定する。

$$\delta_s = \frac{h_0}{\alpha_s} \times \frac{1}{D \cdot \cos\theta} \times \sum W_s \quad (3)$$

$$\delta_f = \frac{h_0}{\alpha_f} \times \frac{1}{D \cdot \sin\varphi} \times \sum W_f \quad (4)$$

梁部材については式(5)、(6)を用いて経験変形を推定する。

$$\delta_s = \frac{h_0}{\alpha_s} \times \frac{1}{D \cdot \cos\varphi} \times \sum W_s \quad (5)$$

$$\delta_f = \frac{h_0 - 1.5D}{\alpha_f \cdot D} \times \sum W_f \quad (6)$$

ここで $\theta$ はせん断ひび割れの角度、 $\varphi$ は曲げせん断ひび割れの角度とする。

#### 4.2 総ひび割れ幅による損傷量評価手法の検証

図-7に基準化ひび割れ幅の推移を、図-9に推定変形と経験変形の関係を示す。基準化ひび割れ幅については、ひび割れと変形の傾向はとらえられているものの、試験体間のばらつきが大きいことが分かる。推定変形と経験変形の関係については、概ね評価できており基準化ひび割れ幅より試験体間のばらつきが小さく評価精度が高いと考えられる。

#### 5. 損傷量評価手法の被害建物への適用

4章までにて検討した損傷量評価手法を実際の被災建物

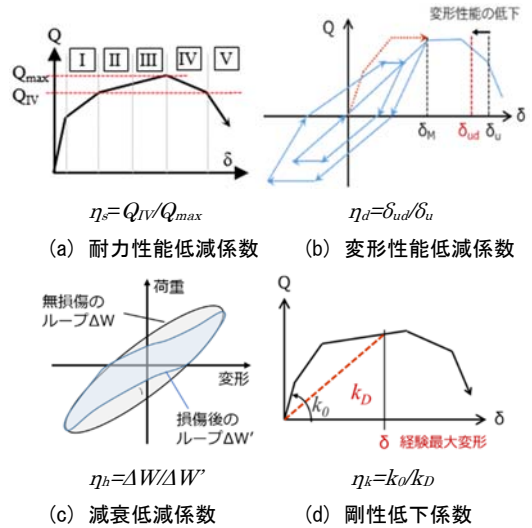


図-5 各性能低減係数の概念図

表-4 各性能低減係数(耐力・変形・剛性)

損傷度	曲げ梁			曲げ柱			曲げ壁			せん断柱			せん断壁※		
	耐力	変形	剛性	耐力	変形	剛性	耐力	変形	剛性	耐力	変形	剛性	耐力	変形	剛性
I	1	1	0.7	1	1	0.6	1	1	0.6	1	1	0.60	1	1	0.6
II	1	0.9	0.3	1	0.85	0.3	1	0.9	0.3	1	0.7	0.3	1	1	0.3
III	1	0.7	0.2	1	0.8	0.2	1	0.7	0.2	1	0.5	0.2	0.9	1	0.2
IV	0.5	0.3	0.1	0.8	0.7	0.1	0.6	0.3	0.1	0.6	0.3	0.1	0.8	1	0.1
V	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0

※せん断壁は、損傷をパラメータとした実験をもとに係数を決めた。

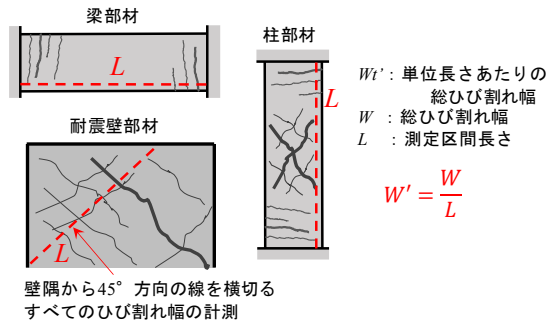


図-6 基準化ひび割れ幅概念図

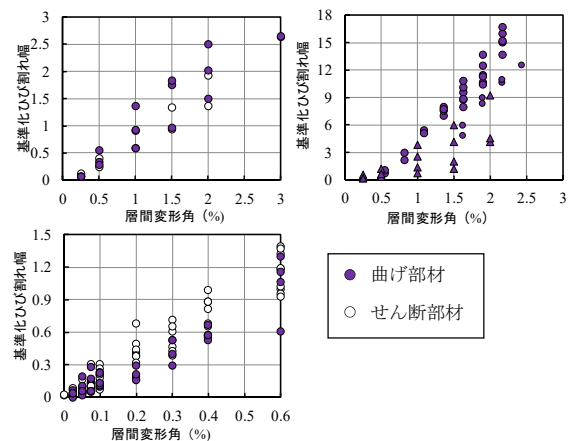
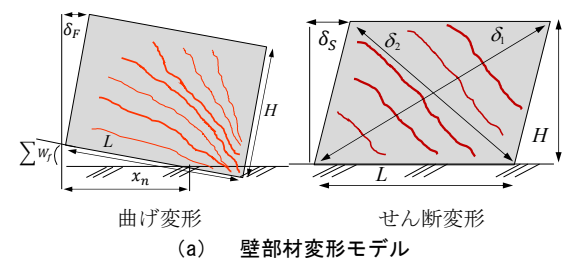


図-7 基準化ひび割れ幅の推移



(a) 壁部材変形モデル

(表-5, 図-11 参照)に適用して, その妥当性及び検討すべき課題を検証した。損傷量評価手法のフローチャートについては図-10を参照されたい。図-11に示すように, 耐震壁の評価手法は現行基準による評価に対して, 1, 2本のひび割れが入った壁の損傷度を小さめに判断し, 多数のひび割れが入った壁の損傷度を大きめに判定した。また, 柱, 梁部材に関しては接する耐震壁の入り方により損傷度を大きめに判定する傾向が見られた。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- 耐震壁の加力実験において, 損傷の大きさに関わらず, 最大耐力や変形性能などの終局性能に大きな影響は見られなかった。しかし経験変形領域内では, 剛性や減衰性能が損傷の度合いに応じて低下し, 地震応答を大きくする可能性がある。
- 既往の部材実験・架構実験をもとに, 耐力・変形性能・減衰性能・初期剛性の低下を評価した。結果として, せん断部材は概ね曲げ部材に比べ耐力・変形・減衰性能の低下が顕著であった。
- 各部材において総残留ひび割れ幅から経験変形を推定する損傷量評価手法を提案し, 実際の部材変形を概ね推定できた。これらの評価法を実際の被災建物に適用した結果, 損傷度の判定が可能であることが確認できた。今後, 更なる精度向上への検討をすることでよりの確かな損傷度区分が可能になると考えられる。

参考文献

- 日本建築防災協会: 震災建築物の被災区分判定基準および復旧技術指針 2015
- 伊藤淑純, 高橋香菜子, 前田匡樹: せん断破壊する鉄筋コンクリート造柱・壁部材の残存耐震性能の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.2, pp859-864, 2013
- 伊藤衛, 三本菅良太, 富田真希, 前田匡樹, 古野雄大: SRC造架構に増設した補強 RC造せん断壁の耐震性能, 日本建築学会大会学術講演梗概集 2013(構造IV), pp333-340
- 柳下和男, 福沢六郎, 千葉脩, 羽島敏明, 金子治: 建屋の復元力特性に関する研究 その61 耐震壁のせん断ひび割れ本数およびひび割れ幅の検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 1986, pp1121-1122
- 小池拓矢: RC造耐震壁を含む架構の損傷量評価に基づく残存耐震性能評価に関する研究, 東北大学修士論文
- 文野正裕, 永山憲二, 前田匡樹, 田才晃: RC柱の損傷状況に基づく残余耐震性能の評価, コンクリート工学論文集, Vol.23, No.3, pp.259-264, 2001

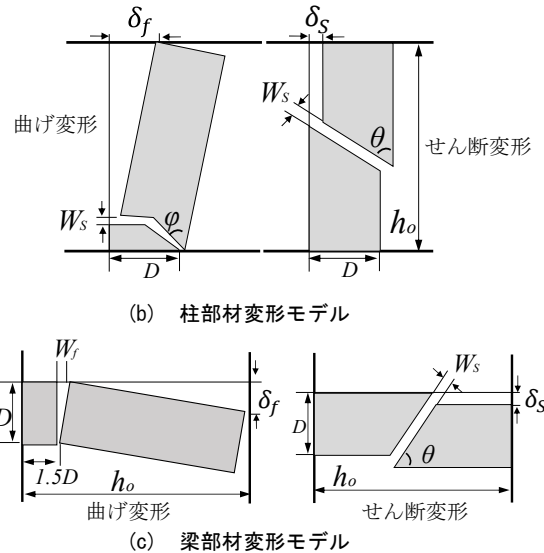


図-8 各部材における変形モデルの提案

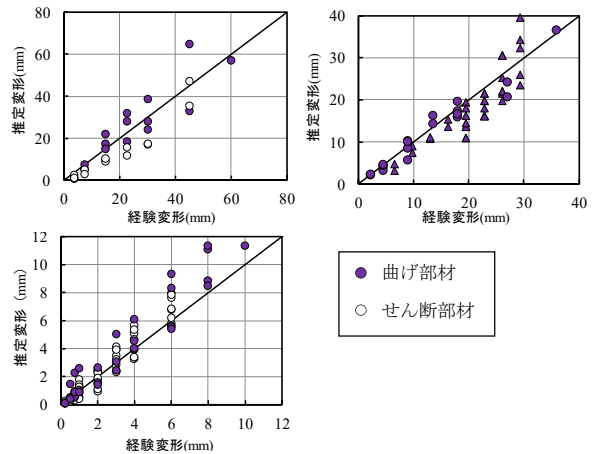


図-9 推定層間変形と実際の経験変形の関係

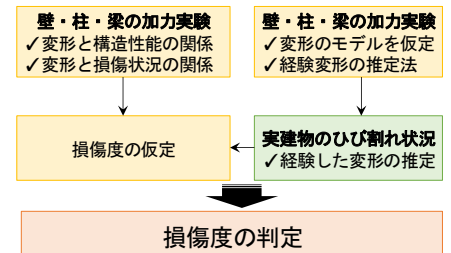
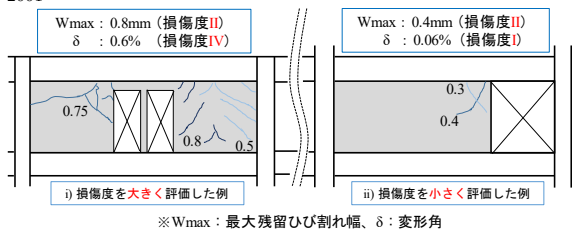
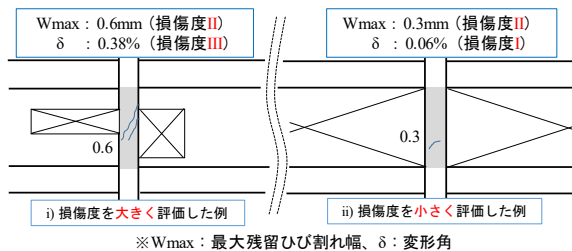


図-10 損傷度損傷量評価手法のフローチャート

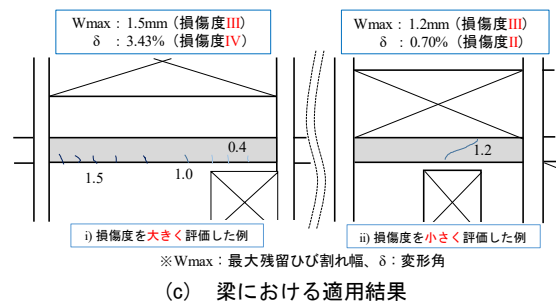


(a) 耐震壁における適用結果



(b) 柱における適用結果

図-11 損傷度判定(東北大学マテリアル棟)



(c) 梁における適用結果

表-5 損傷度判定の適用結果(東北大学マテリアル棟)

		損傷度				
		I	II	III	IV	V
壁	既往	1.4	70.3	20.3	8.0	0.0
	提案	19.0	48.2	23.4	6.6	2.9
柱	既往	10.1	67.4	7.2	2.9	0.0
	提案	51.1	29.2	5.8	2.2	0.0
梁	既往	2.2	54.3	14.5	17.4	2.9
	提案	8.8	43.8	21.2	5.8	12.4