

日本における被災建築物の 被災度判定と復旧



東北大学 Tohoku Univ.
前田匡樹 Masaki Maeda

2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

1

1968年十勝沖地震による被害



函館大学

2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

2

1978年宮城県沖地震による被害



まるはビル

2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

3

1995年兵庫県南部地震による被害



1層崩壊した集合住宅



2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

4

日本の耐震設計基準

- ◆日本の建築物の耐震設計基準は、地震被害の経験に基づき強化されてきた。
 - 1923 関東大震災
 - 1924 耐震設計の法規への導入
 - 1950 許容応力度設計 $C_0=0.2$ (建築基準法)
 - 1968 十勝沖地震
 - 1971 せん断補強筋の規定の強化
 - 1978 宮城県沖地震
 - 1981 終局強度設計 $C_0=1.0$

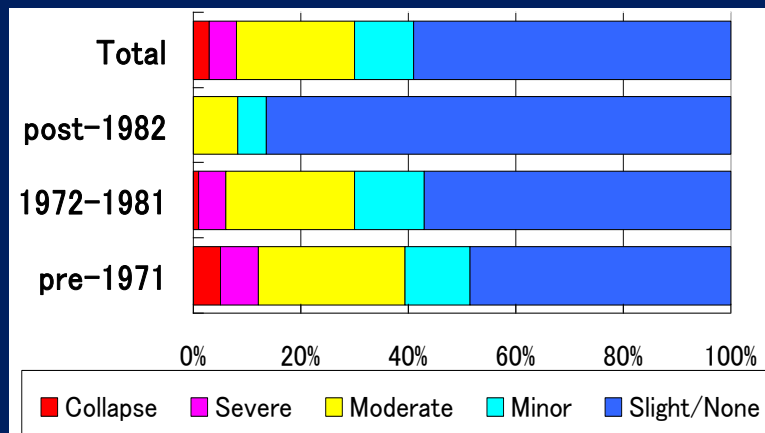
2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

5

これまでの経験1

- ◆1995年阪神淡路大震災のRC造建物の被害調査と復旧支援

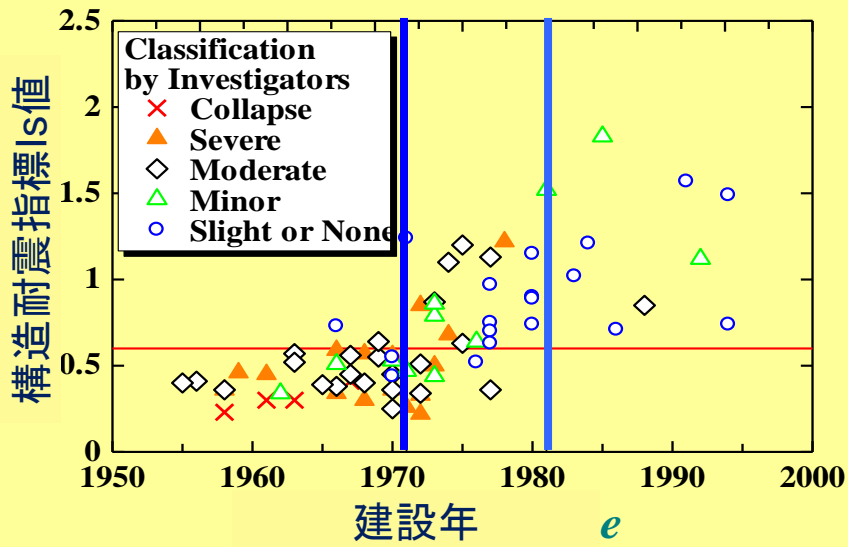


2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

6

RC造建物の耐震性能と建設年の関係



2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

7

既存RC造建物の耐震診断

日本の「耐震診断基準」の概要

2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

8

構造耐震指標 I_s 値

建築物の耐震性能を構造耐震指標 I_s 値で評価する。

$$I_s = E_0 \times S_D \times T$$

E_0 : 保有性能基本指標

= 強度 × 変形能力

S_D : 形状指標 (0.4 - 1.0)

平面・立面の不整形性を考慮

T : 経年指標 (0.5 - 1.0)

経年劣化の影響

2006/10/13

JCI-KCI Committee

9

保有性能基本指標 E_0

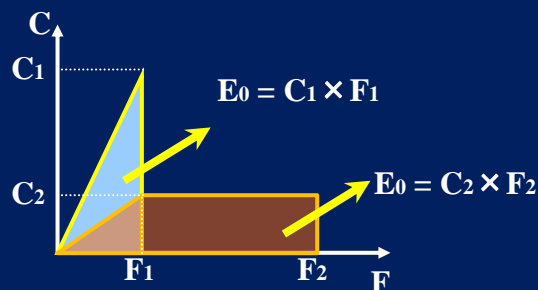
$$E_0 = \varphi \times C \times F$$

φ : 振動モードによる階の補正係数(1階は1.0)

C : 強度指標 (層せん断力係数)

= 保有水平耐力 / 建物重量

F : 靱性指標



2006/10/13

JCI-KCI Committee

10

強度指標 C

◆柱の終局耐力

– 曲げ耐力 ${}_cQ_{mu}$

$${}_cQ_{mu} = \frac{{}_cM_{u上} + {}_cM_{u下}}{h_0}$$

$$M_u = 0.8 \cdot a_t \cdot \sigma_y \cdot D + 0.5N \cdot D \left(1 - \frac{N}{bDF_c} \right)$$

– せん断耐力 ${}_cQ_{su}$

$$Q_{su} = \left\{ \frac{0.053 p_t^{0.23} (18 + F_c)}{M / (Q \cdot d) + 0.12} + 0.85 \sqrt{p_w \cdot s \cdot \sigma_{wy}} + 0.1 \sigma_o \right\} b \cdot (0.8D)$$

2008/6/28

耐震診断

11

靱性指標 F

せん断耐力 < 曲げ耐力 → せん断破壊、 $F=1.0$ (0.8)

せん断耐力 > 曲げ耐力 → 曲げ破壊、

部材の変形能力が大きくなるほど靱性指標 F は大きい

部材	破壊モード	靱性指標 F
柱	極脆性	0.8
	せん断	1.0
	曲げ	1.27 - 3.2
Wall	せん断	1.0
	曲げ	1.0 - 2.0

2006/10/13

JCI-KCI Committee

12

耐震性の判定

$$I_s \geq I_{so}$$

$$C_{Tu} \cdot S_D \geq 0.3$$

判定指標値 I_{so} :

その地域の地震活動度(予測される地震の大きさ)
 法律で要求される地震力のレベル
 建物の要求性能(用途係数、重要度係数)
 等を考慮して決める。

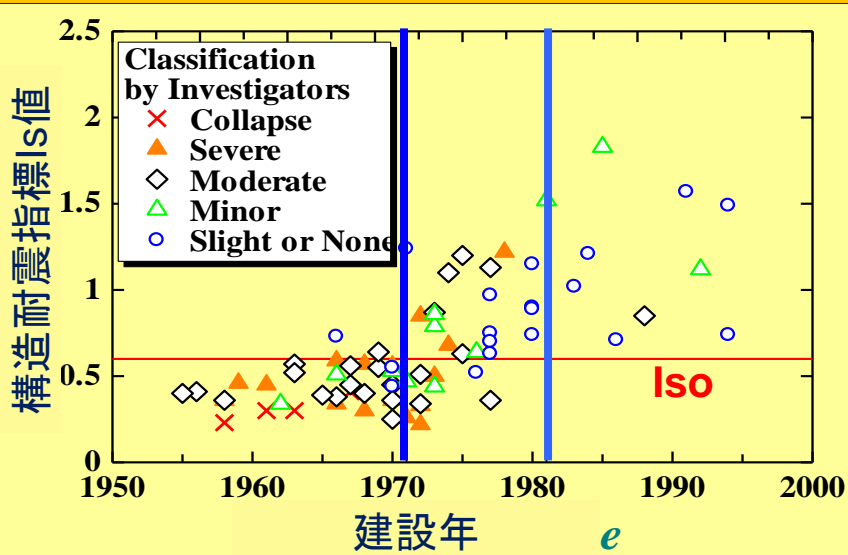
日本では基本的に0.6

2008/6/28

耐震診断

13

RC造建物の耐震性能と建設年の関係



2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

14

これまでの経験2

◆1999年台湾・集集地震によるRC造建物の被害調査と応急復旧技術資料

1999年台湾・集集地震
第II編 鉄筋コンクリート造学校校舎の
応急復旧技術資料

Report on the Technical Cooperation
for Temporary Restoration of Damaged RC School
Buildings due to the 1999 Chi-Chi Earthquake

日本建築学会

2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

15

1999台湾集集地震



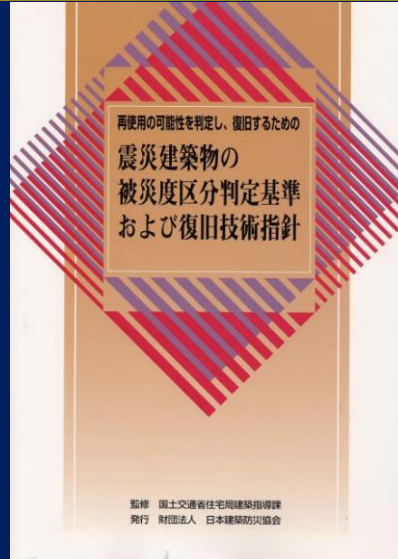
2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

16

これまでの経験3

- ◆1995年、1999年の経験に基づいて、被災度区分判定基準および復旧技術指針の改訂

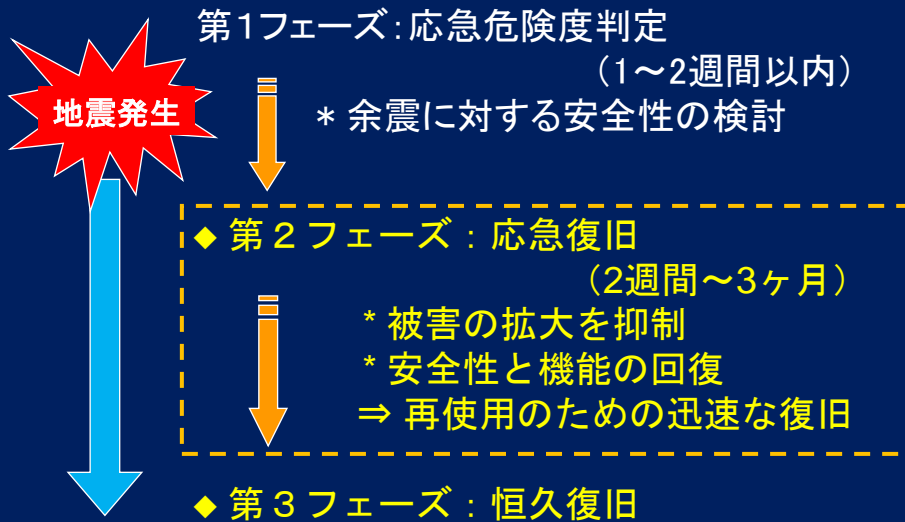


2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

17

震災復旧の方法と流れ

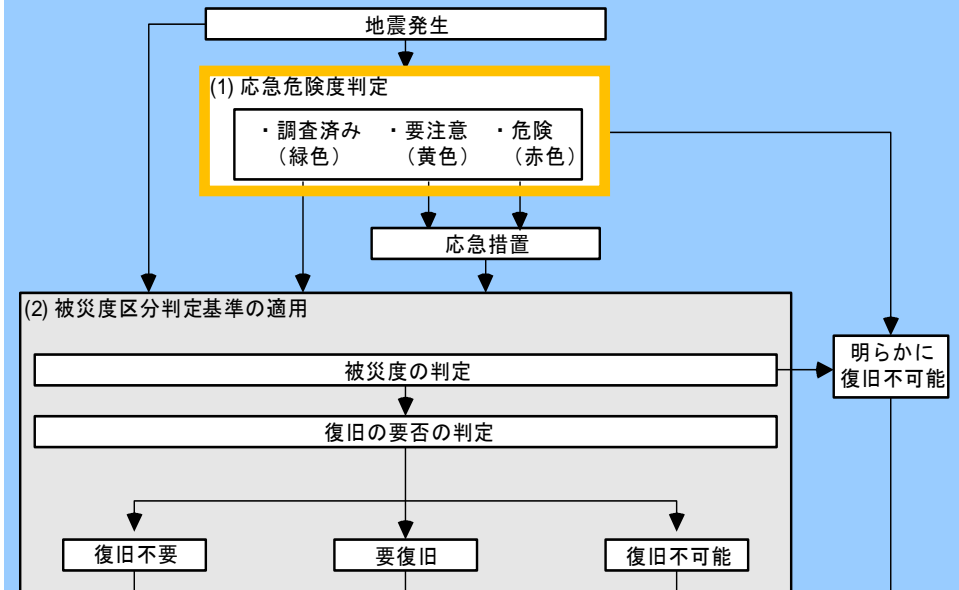


2008/6/24

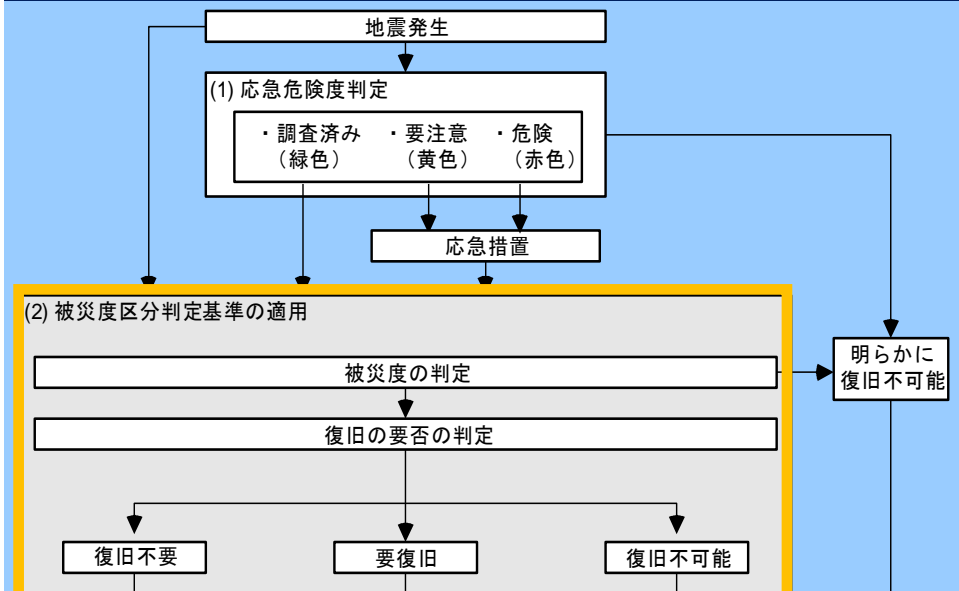
四川地震 災害修復技術講座

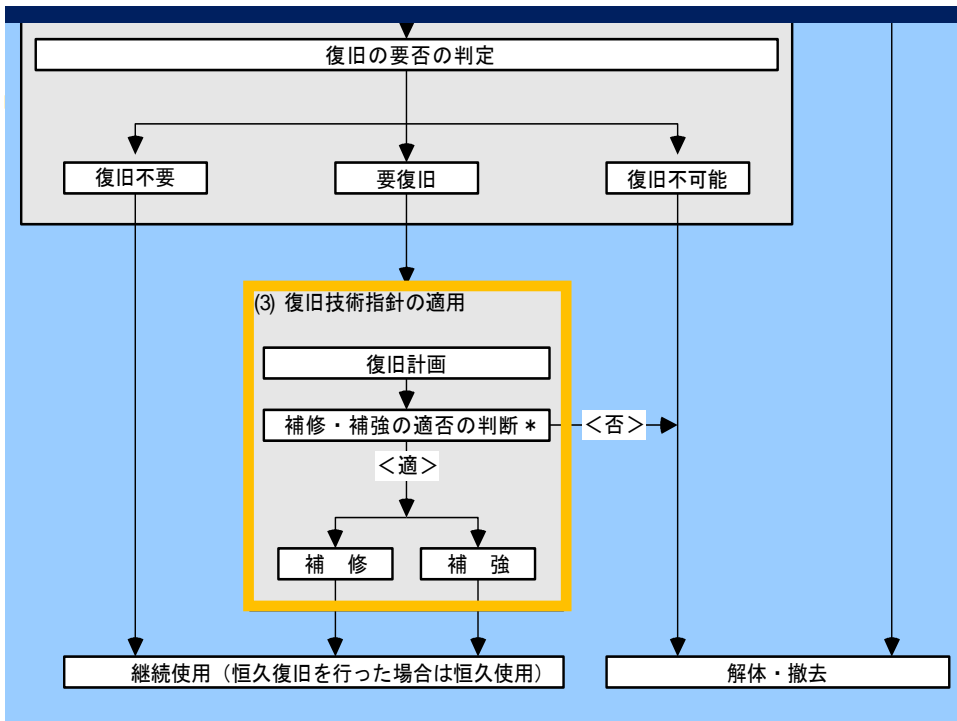
18

震災復旧のフロー例



震災復旧のフロー例





RC造の被災度区分判定

◆目的

- 被災度の定量化 **耐震性能残存率R指標**
➡ 応急復旧の要否の判定

◆調査・判定項目

- 基礎構造

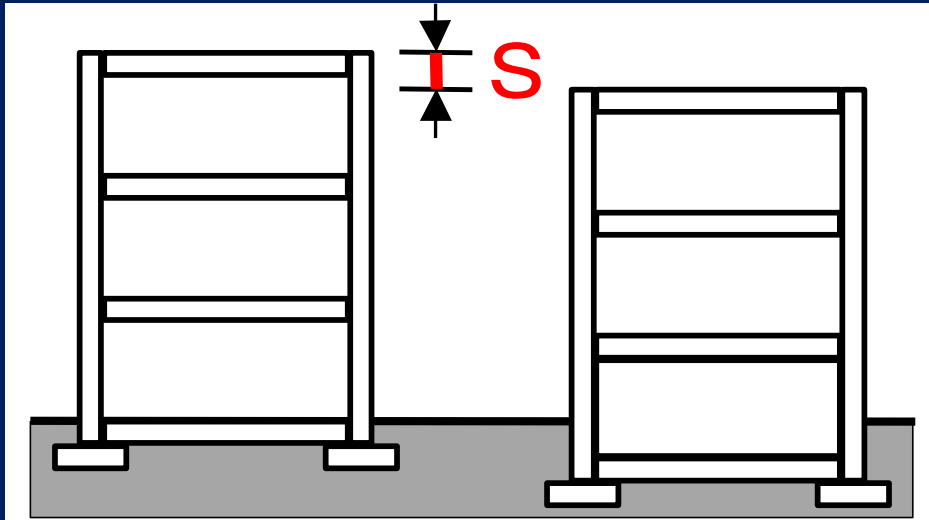
- ・ 全体沈下
- ・ 全体傾斜

➡ 組み合わせで判定

- 上部構造

- ・ 部材の損傷度 (O, I, II, III, IV, V)

建築物の全体沈下

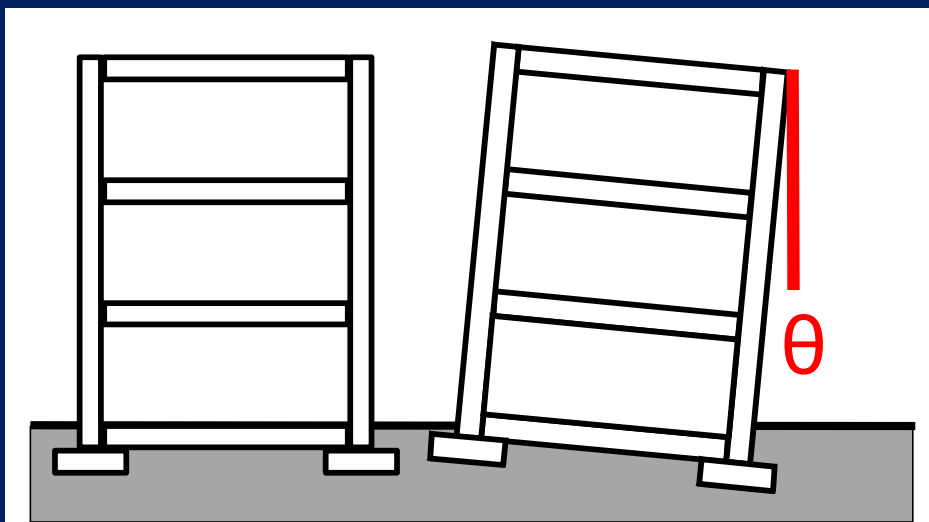


2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

23

建築物の全体傾斜



2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

24

基礎構造の被災度区分

- ◆ 基礎の沈下量(最大値)と傾斜(建物傾斜)に基づき評価

表 II.2.2-1 杭基礎建物の基礎の傾斜と沈下量または露出量による被災度区分

		基礎の沈下量 (m)			
		0	0.1	0.3	大被害
基礎の傾斜	1/300	[無被害]	[小 破]	[中 破]	※
	1/150	[小 破]	[中 破]	[中 破]	[大 破]
	1/75 (radian)	[中 破]	[中 破]	[大 破]	[大 破]
		[大 破]	[大 破]	[大 破]	[大 破]

※：想定外、要詳細調査

2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

25

液状化により傾



2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

都江堰の建設中のマンション

擁壁が損傷・傾斜し地盤の移動により基礎が沈下



2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

27

基礎構造の復旧の程度および要否の判定

◆「小さな地震で被害」or「大きな被害」

解表 II.2.2-1 復旧の程度および要否の判定

被災度区分 地震動の強さ (気象庁震度階)	小破	中破	大破
V弱以下	×	×	×
V強	△	×	×
VI弱	○	△	×
VI強以上	○	○	△

○: 補修
△: 補修または補強
×: 要詳細調査

2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

28

上部構造の判定

応急復旧の要否の判定

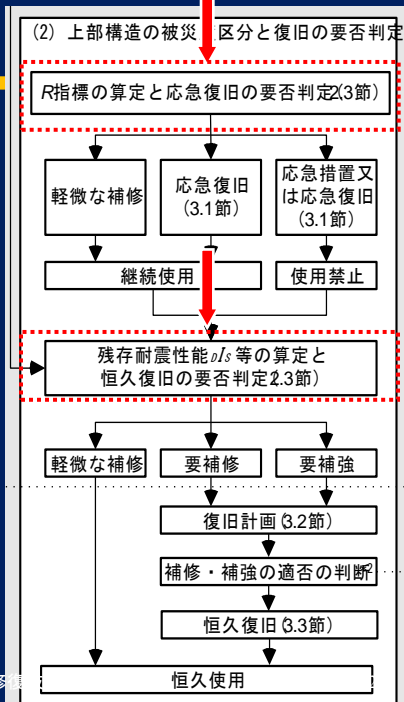
- できるだけ早く行なう
- 構造計算なし、部材損傷度からRを略算
- 継続使用 / 使用禁止

恒久復旧の要否の判定

- 構造計算して、法規の目標性能を満足させる
- 耐震診断が原則

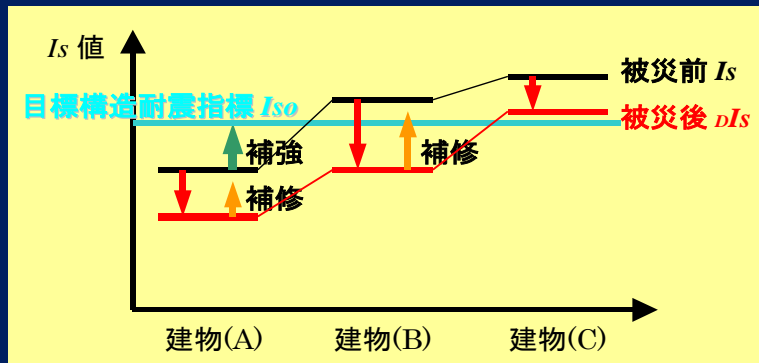
2008/6/24

四川地震 災害修繕



応急復旧と恒久復旧

- ◆ **応急復旧**: 補修や補強等の対策を講じ、恒久復旧するまで、一時的に使用すること
- ◆ **恒久復旧**: 法規の耐震規定を満足するように復旧(安全性と機能性の確保・向上)を行った後に長期間使用すること



上部構造の被災度区分と復旧の要否判定

1. 損傷度の判定(損傷度 I, II, …… V) 被災度の区分
2. 耐震性能残存率 R の算定
⇒ 被災度の区分
[軽微], [小破], ……[大破]([倒壊])
3. 応急復旧の要否の判定 復旧の要否判定
– 被災度 vs. 震度階
4. 恒久復旧の要否の判定
– 耐震性能の比較:被災前 vs. 被災後 vs. 目標値

2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

31

1. 部材の損傷度の判定

- ◆主として鉛直部材の損傷度を調査
 - 柱(せん断柱, 曲げ柱)
 - 柱無し壁
 - 片側柱付壁
 - 両側柱付壁(1スパン分を1単位として)
- ★ 中国では煉瓦/ブロック壁の損傷評価が必要?
- ★ 梁や柱・梁接合部の損傷は、上下の柱の損傷に読み替えるなどの対応

2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

32

RC造柱・耐力壁の損傷度

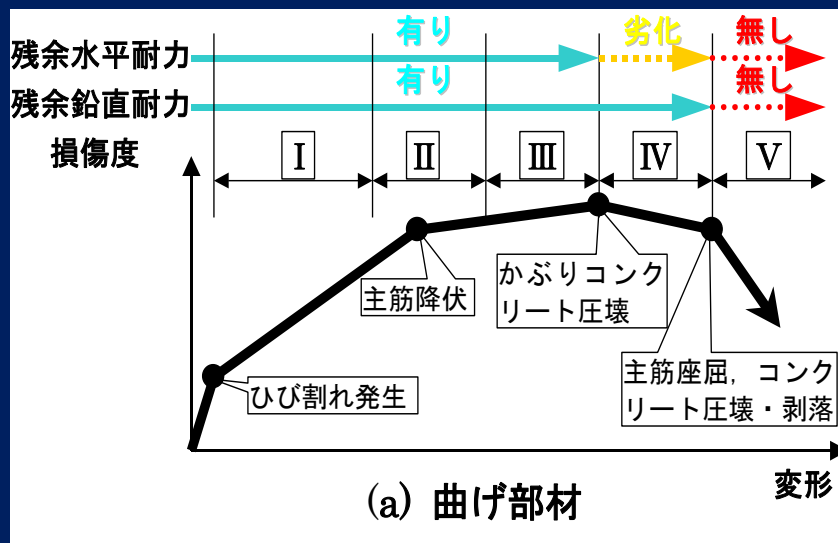
損傷度	損傷内容
I	近寄らないと見えにくい程度のひび割れ (ひび割れ幅0.2mm以下).
II	肉眼ではっきり見える程度のひび割れ (ひび割れ幅0.2~1mm程度)
III	比較的大きなひび割れが生じているが、コンクリートの剥落は、極くわずかである (ひび割れ幅1~2mm程度).
IV	大きなひび割れ(2mmを超える)が多数生じ、コンクリートの剥落も激しく鉄筋がかなり露出している.
V	鉄筋が曲がり、内部のコンクリートも崩れ落ち、一見して柱(耐力壁)の 高さ方向の変形 が生じていることがわかるもの。沈下や傾斜が見られるのが特色。鉄筋の破断が生じている場合もある.

2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

33

曲げ柱の「荷重－変形関係」と「損傷度」

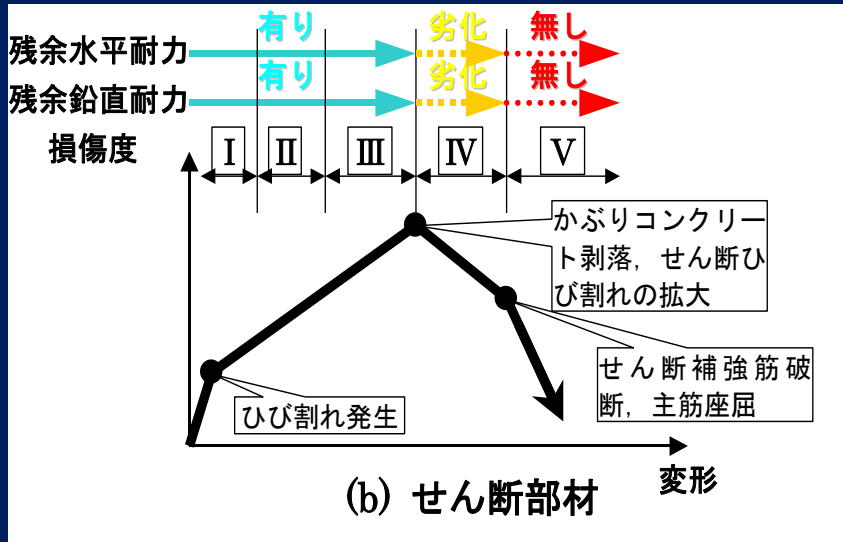


2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

34

せん断柱の「荷重－変形関係」と「損傷度」



2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

35

RC造柱・損傷度Ⅲ



2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

36

RC造柱・損傷度Ⅳ



2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座



37

RC柱・損傷度Ⅴ

- ◆ 内部Concreteの崩落
- ◆ 軸縮み
- ◆ 主筋の座屈
- ◆ Hoopの破断



2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

38

RC柱・損傷度 V

主筋の破断、座屈



主筋の破断、座屈



2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

39

煉瓦造壁の損傷度(1999集集地震)

損傷度	損傷内容
I	周辺の柱あるいは梁と壁との境界部分にひび割れが見られる程度.
II	周辺の柱あるいは梁と壁との境界部分に明瞭なひび割れが見られるが、煉瓦壁にはその隅角部での仕上げ剥落や僅かな斜めひび割れが見られる程度.
III	斜めひび割れや目地に沿った滑りが生じ、煉瓦壁の隅角部や中央部に仕上げの剥落が見られる程度.
IV	明瞭なせん断ひび割れや目地に沿った滑りが生じ、仕上げが大きく剥落している。煉瓦造壁の一部に欠けが見られるが、崩落はしていない程度.
V	壁の一部または大部分が崩落している、ひび割れにより煉瓦造壁の向こう側が透けて見える、あるいは面外方向の倒れが認められるもの.

2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

40

煉瓦造壁・損傷度Ⅱ



2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

41

煉瓦造壁・損傷度Ⅲ



2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

42

煉瓦造壁・損傷度Ⅳ



大きな亀裂, 目地の滑り

2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

43

煉瓦造壁・損傷度Ⅴ

向うが見えるほどの大きな亀裂、損傷



2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

44

耐震性能残存率Rの算定方法

算定の原則

- 被災前に対する被災後の耐震性能の割合で定義
- 被害が最も大きい階で被害の大きい方向を対象

$$R = \frac{D I_s}{I_s} \times 100 \quad (\%)$$

I_s : 被災前の構造耐震指標

$D I_s$: 被災後の構造耐震指標

- 被災後の部材強度は損傷度 (I ~ V) に応じた低減係数 η を乗じる

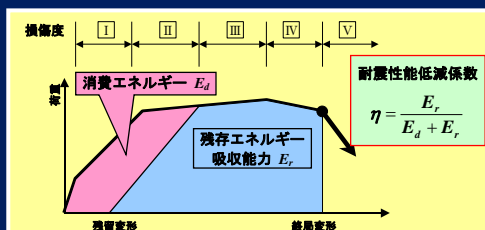
耐震性能残存率Rの略算(応急復旧)

◆ 部材の強度の比率を仮定

柱(曲げ, せん断) : 柱無し壁 : 片側柱付壁 : 両側柱付壁

1 : 1 : 2 : 6

◆ 被災後の強度は上記に η を乗じて算定



損傷度	曲げ柱	その他
0	1.00	1.00
I	0.95	0.95
II	0.75	0.60
III	0.50	0.30
IV	0.10	0
V	0	0

被災度の区分

[軽微] $R \geq 95$ (%)

[小破] $80 \leq R < 95$ (%)

[中破] $60 \leq R < 80$ (%)

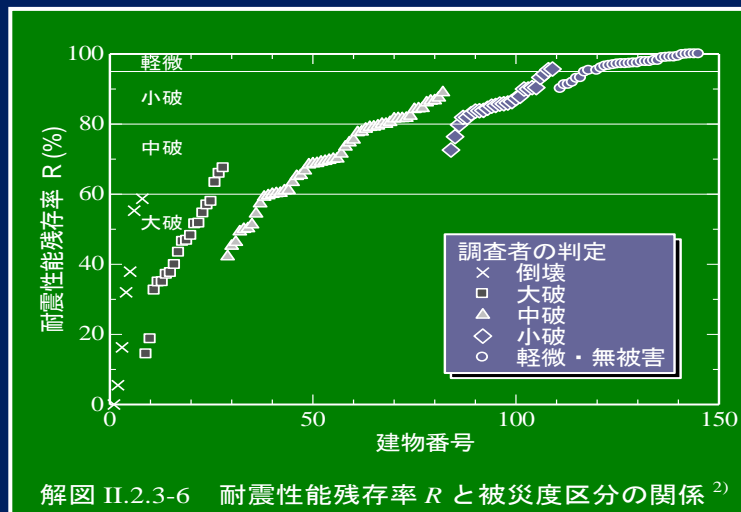
[大破] $R < 60$ (%)

[倒壊] 建築物全体または一部が崩壊し、
 $R=0$ とみなせるもの

1995年兵庫県南部地震の

被災建物の被災度区分判定結果

境界値付近の判定は慎重に！



3. 応急復旧の要否の判定

震度階 vs. 被災度 から判定

震度	被災度		震度	
	軽微 $R \geq 95$	小破 $95 > R \geq 80$	8()	9()
V弱以下 (7)	×	×	×	×
V強 (8)	◎	△	△	△
VI弱 (9)	◎	○ (△)	△	△
VI強以上 (大地震&被害小)		○ (△)	○ (△)	△

小地震 but 被害大
→ 弱い(と思われる)建物

- ◎ → 強い(と思われる)建物 → 継続使用
- : 応急復旧(補修) → 継続使用
- △: 応急措置、応急復旧 → 原則、使用禁止
- ×: 耐震診断を行い恒久復旧
- () は'71以前の建物

被災度区分判定基準の適用例

2008年6月14日岩手・宮城内陸地震で被災した学校校舎

大崎市立上野目小学校校舎

1963年建設



2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

柱のせん断亀裂

損傷度Ⅳ



損傷度Ⅲ



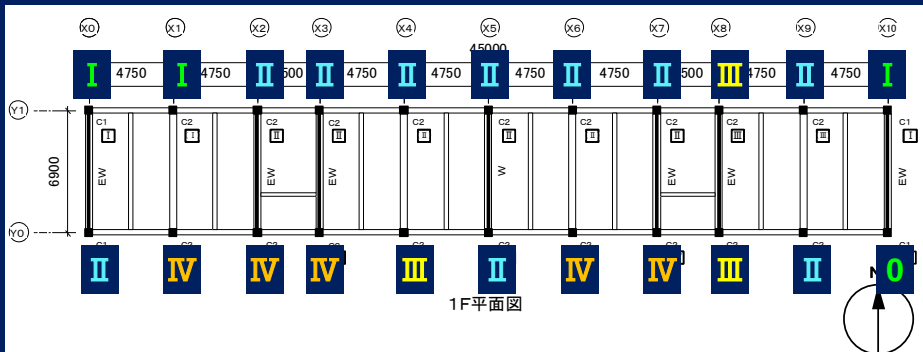
2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

52

1階の被害状況

- ◆柱22本のうち
損傷度Ⅳ5本、損傷度Ⅲ3本など



2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

53

耐震性能残存率Rの略算

- ◆柱はせん断柱と判断する

損傷度	低減率 η		本数		
0	1	×	1	=	1.00
I	0.95	×	3	=	2.85
II	0.60	×	10	=	6.00
III	0.30	×	3	=	0.90
IV	0	×	5	=	0
V	0	×	0	=	0
合計			22		10.75

$$R = \frac{\text{被災後の性能}}{\text{被災前の性能}} = \frac{10.75}{22} = 49 \text{ (\%)}$$

2008/6/24

54

被災度区分と応急復旧の要否の判定

◆R=49より [大破]、震度は6弱(MM:9)

被災度 震度	軽微 $R \geq 95$	小破 $95 > R \geq 80$	中破 $80 > R \geq 60$	大破・倒壊 $60 > R$
V弱以下	×	×	×	×
V強	◎	△	△	△
VI弱	◎	○(△)	△	△
VI強以上	◎	◎(○)	○(△)	△

△: 余震による損傷進行、倒壊防止のため、
応急措置、応急復旧を行い、
 耐震診断に基づく、恒久復旧(補修・補強)を
 行うまで、**使用禁止**

2008/6/24

四川地震 災害修復技術講座

55

4. 恒久復旧の要否の判定

表 II.2.3-3 恒久復旧の要否の判定

	$I_{50} < D I_s$	$D I_s < I_{50} < I_s$	$D I_s < I_s < I_{50}$
$0.3Z \cdot G \cdot U < {}_D(C_T \cdot S_D)$	○	△	×
${}_D(C_T \cdot S_D) < 0.3Z \cdot G \cdot U < C_T \cdot S_D$	△	△	×
${}_D(C_T \cdot S_D) < C_T \cdot S_D < 0.3Z \cdot G \cdot U$	×	×	×

○: 恒久使用 (軽微な補修を行う。ただし、損傷度Ⅲ以上の部材は構造補修を要する)
 △: 構造補修により、被災前の耐震性能を回復する、または、目標耐震性能を確保する。
 ×: 構造補強により、目標耐震性能を確保する。

**$I_s, C_T \cdot S_D$ を計算し、現行の耐震基準を
 満足するように補修・補強する**

恒久復旧の基本方針

- ◆ 建物(A): 補修ではIsoを確保できない。補強も必要
- ◆ 建物(B): 補修して元の性能を回復すればIsoを確保
- ◆ 建物(C): 簡単な補修のみでOK

