

外国の地震での建築物被害の特徴と応急危険度判定

上之菌 隆志

Takashi KAMINOSONO

国土交通省 国土技術政策総合研究所 危機管理技術研究センター 建築災害対策研究官

地震被害を受けた建築物の被災の程度を緊急に評価し、その危険度を住民等に提示することは、余震等による災害を防ぐとともに民心の安定をはかる上で重要である。この作業を行う上での手法として、日本では「被災建築物応急危険度判定マニュアル¹⁾」、米国では「Procedures for Post-earthquake Safety Evaluation of Building²⁾」が開発されている。しかしながら建築物の構造様式や構造性能は各国で異なるため、地震の被害の様相も異なり、建築物の危険度を評価する手法も自ずと異なってくる。本論では、外国の建築物の地震被害概要を述べるとともに、日本の応急危険度判定手法をトルコ地震被害に適用した場合の考え方について述べる。

1. はじめに

建築物が地震を受けた場合には、無被害から崩壊まで、異なる程度の被害が生じる。地震被害を受けた建築物を地震後においても継続して使用してよいかどうかの判断は、人心の安定や生活の継続性を図る上で重要である。この判断に使用される建築物の危険度評価（以下、応急危険度判定という）は、日本¹⁾、米国²⁾、ヨーロッパ³⁾でも提案されている。本論では、外国の建築物の地震被害概要を述べるとともに、日本の応急危険度判定手法をトルコ地震被害に適用した場合の考え方について述べる。

2. 応急危険度判定の歴史

日本の応急危険度判定は建設省総合技術開発プロジェクト「震後建築物の復旧技術の開発」において、応急危険度判定法及び恒久被災度判定法が1985年に開発され、これらは日本から派遣された国際協力事業団専門家チームによりメキシコ地震被害に適用された。その後、日本建築防災協会において「被災度判定基準・復旧技術指針」となった。応急危険度判定の体制は静岡県、神奈川県で準備されたが、全国的に普及するにはいたらなかった。しかし1995年の兵庫県南部地震では、全国からの技術者の協力をえて応急危険度判定が実施された。その後、応急危険度判定士の育成等、体制作りが全国的に実施された。その後の地震被害（1985年新潟の地震、1997年鹿児島北薩地震）においても応急危険度判定が実施されている。1998年、「被災度判定基準・復旧技術指針」は「被災建築物応急危険度判定マニュアル」¹⁾にまとめなおされている。

3. 応急危険度判定の位置付け

地震被害を受けた建築物に必要な対策の流れを図-1に示す。対策としては、本震により被災建築物が、その後の余震により被害が進行し人命が危険にさらされないようにする応急的な対策（応急危険度判定、応急復旧）と建築物の継続使用を目的とした対策（被災度区分判定、恒久

復旧）がある。

応急危険度判定は、地震被害の規模にもよるが、その緊急性から地震直後から2～3週間から1ヶ月の間に実施することになる。しかしながら余震に対する応急危険度判定、恒久使用に対する被災度区分判定、さらには既存建築物の耐震診断は、ほぼ同様な技術の上に成り立っており、時として混同される可能性がある。被災度区分判定及び耐震診断では大地震を想定するが、応急危険度判定では、建築物が本来持っていた耐震性能が被害をあたえた本震によりどの程度低下したかを推定し、本震よりは小さい余震に対する危険性を判定することになる。そのため本震より大きな別の地震が被災建築物に作用した時の安全性の判定を行っているものではない。これは応急危険度判定の限界とも言える。

また、応急危険度判定精度と判定時間は、判定士の技術レベル、判定項目（調査内容）に関係しており、地震直後の短い時間に危険建築物を見つけ出す応急危険度判定と地震後2～3週間の間に問題のない建築物、注意建築物及び危険建築物に（定量的に）判別する応急危険度判定はその手法が異なる。米欧の応急危険度判定は前者を、日本の応急危険度判定は後者を目標としている。

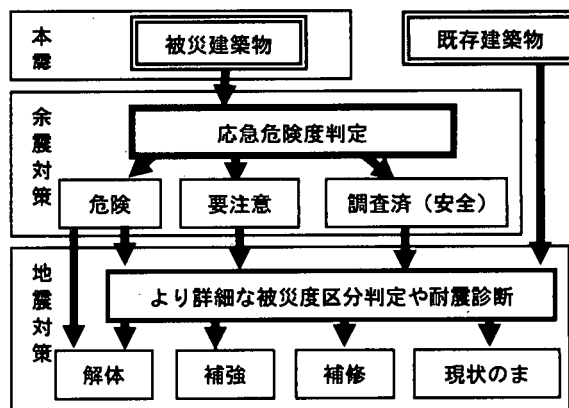


図-1 建築物への対策の主要な流れ

4. 鉄筋コンクリート造建築物の応急危険度判定

鉄筋コンクリート造建築物に対する日本の応急危険度判定の中心的な部分は、構造部材、特に鉛直部材の損傷度とその割合から判定する部分である。部材の損傷度は、図-2に示す耐力と変形の関係を考慮して、部材に発生したコンクリートのひびわれや破壊、鉄筋の座屈等を観察することによって判定する(表-2)²⁾。部材(柱)の損傷度ⅣとⅤの部材の割合によって建築物の構造的危険度を判定する(表-3)²⁾。部材の損傷度をできるだけ多く評価し、全体に対する損傷の割合を出すために、建築物の全体的な調査を行うために損傷を見逃しにくいこと、定量的な評価が可能であり判定士によるばらつきが少ないなどの有利な面がある。しかしながら部材が多い場合には、調査に時間がかかるという欠点もある。

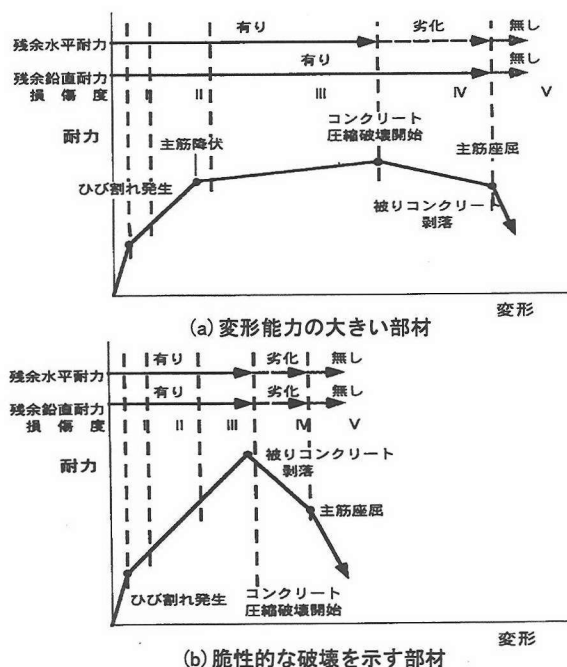


図-2 部材の耐力変形関係と損傷度²⁾

表-2 鉄筋コンクリート造部材の損傷度分類²⁾

損傷度分類	
損傷度Ⅲ	比較的大きなひびわれ(ひびわれ2mm程度)が生じているが、コンクリートの剥離は極めてわずかである。
損傷度Ⅳ	大きなひびわれ(ひびわれ2mm以上)が多数生じ、コンクリートの剥離も激しく、鉄筋がかなり露出している。
損傷度Ⅴ	鉄筋の座屈や破断、破壊面に沿ってコンクリートのつぶれやずれ、及び柱の高さ方向の変形が生じている。開口部ではサッシが曲がり、床が沈下している。

表-3 部材(柱)の損傷度割合と建築物構造的危険度²⁾

⑤ 損傷度Ⅴの柱本数/調査柱本数	損傷度Ⅴの柱総数 0 本	調査柱 16 本 (調査率 65%)	
	① 1%以下	2. 1%~10% 3. 10%超	
⑥ 損傷度Ⅳの柱本数/調査柱本数	損傷度Ⅳの柱総数 2 本	調査柱 16 本 (調査率 65%)	
	1. 10%以下	② 10%~20% 3. 20%超	
判定 ²⁾	1. 調査済 全部Aランクの場合	② 要注意 Bランクが1の場合	3. 危険 Cランクが1以上又はBランクが2以上

5. 外国の建築物の地震被害

(1) コロンビア

1995年1月25日にコロンビア共和国において地震が発生し、キンディオ県アルメニア市を中心に、多数の犠牲者と建築物に大きな被害が生じた。

1984年以前の鉄筋コンクリート造建築物では、中心部の一般建築物および南部の集合住宅が大きな被害を受けた。原因として、以下のような項目が考えられる。

- 1) 耐震設計がなされておらず、柱の曲げやせん断応力に対する断面、主筋、せん断補強筋が不足していた。
- 2) せん断補強筋は90度フックが一般的であった。
- 3) 柱主筋を柱梁接合部で継ぐことが一般的であった。
- 4) 柱梁接合部のせん断補強筋、柱梁接合部への主筋の定着などの配筋詳細が耐震的に不十分であった。
- 5) 非構造壁としての組積造壁が早期にせん断破壊し、さらに耐震設計されていない柱や梁、あるいは柱梁接合部がせん断破壊した。

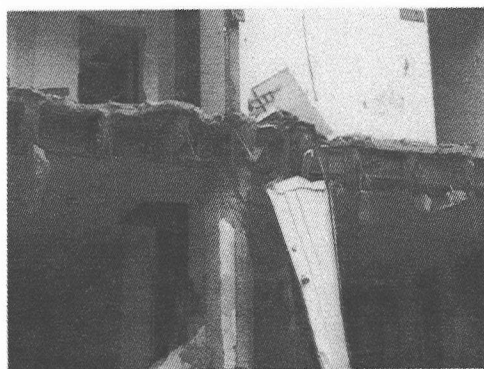


写真-1 中心街ビルの被害
スラブの落下、柱のせん断破壊



写真-2 南部の集合住宅の被害
非構造壁の破壊、柱梁接合部の損傷

1984年以降の鉄筋コンクリート造建築物の多くはフレーム構造として構造設計されており、それらの構造的被害は1984年以前の建築物の被害に比較して少なかった。しかしながら、非構造壁の組積造壁を無視して設計しているため、以下のような被害が目立った。

- 1) 非構造壁である組積造壁が、鉄筋コンクリート造フレーム構造の変形に追従できず、破壊し、落下している。この被害はフレーム内の壁でも見受けられたが、特にキャンティレバー梁上の非構造壁は柱で囲まれておらず、簡単に落下したと推定される。

2) 5階建て程度の集合住宅においては、1階の非構造壁が早期に破壊したため、建築物全体がピロティ建築物のように挙動し、一階柱の柱頭が曲げ圧縮破壊を示している例があった。



写真-3 中心街ビルの被害 非構造壁の落下

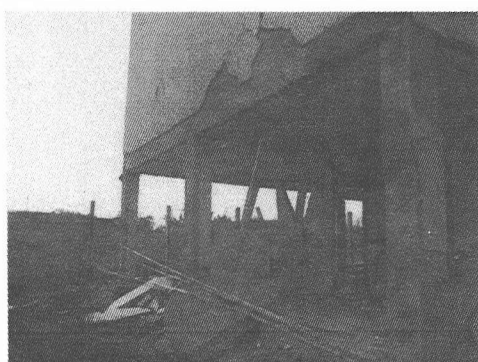


写真-4 新しい集合住宅の被害
1階非構造壁が損傷し、1階に被害が集中

アルメニア市では、米国の応急危険度判定手法を基本として応急危険度判定を、以下の手順で行っている。

- 1) 第1段階として、建築家、構造技術者、建設学科最終学年の学生たちが1チーム2名で、建築物の構造、地盤および設備に関する被害を判定する。結果として、建築物の被害に応じて、危険（赤）、注意（黄）、使用可（緑）の張り紙を行う。判定を行った技術者等は全国からボランティアで集まり、50～60チームで動いた。
- 2) 第1段階の判定で危険（赤）と判定された建物については第2段階として、構造技術者により再度調査され、構造的被害のレベル（小、中、大）が判定される。
- 3) 第2段階の結果を受け、少なくとも3人以上の構造技術者による委員会において、建築物を、詳細調査、または応急補強、または解体の対象として分類する。

(2) インド

2001年1月26日にグジャラート州西部において発生した地震により、震源地から300km離れた大都市アーメダバードでは、12階程度の集合住宅（ラーメンで設計していると思われるが、非構造壁の組積造壁が2階以上存在することによりピロティ形式となっている）が、1階のピロティ部分が破壊することにより上層階が崩壊した被害が発生した。



写真-5 建物の手前部分（白い部分）が完全に崩壊した集合住宅（1階がピロティ形式）

(3) ペルー

2001年6月23日のペルー南部に発生した地震により、ペルーの南部アレキパ、モケグア、タクナにおいて被害が発生した。

モケグアのシモンボリーバル小学校では、1968年築の2階建て校舎の1階柱が雑壁により短柱化しており、その短柱部分でせん断破壊、付着割裂破壊を生じた。せん断補強筋間隔は25cm程度とかなりあらい。

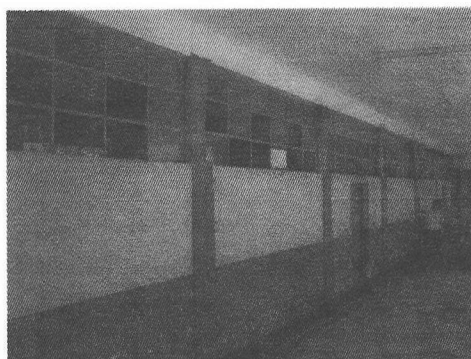


写真-6 短柱化した柱のせん断破壊、付着割裂

タクナのホルヘ・パサドレ・ケトローマン大学では、1996年築の校舎が被害を受けた。南西角柱1階柱脚曲げおよび上下端接合部せん断ひび割れが発生している。

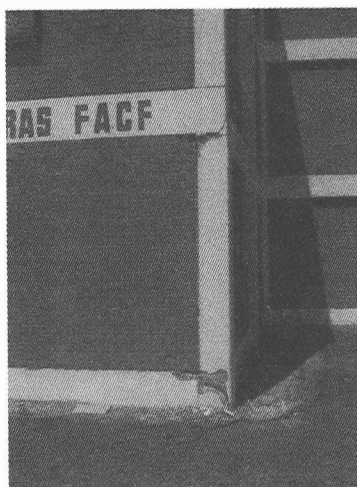


写真-7 壁と柱梁接合部の被害

(4) トルコ

1999年8月17日にトルコ共和国北西部に大きな地震(トルコ・コジャエリ地震)が発生した。イズミット、ギョルジュク、アダパザールを中心に建築物に大きな被害が生じた。鉄筋コンクリート造建築物の特徴は、扁平柱、せいの小さい梁、フープの少ない柱梁接合部、穴明きれんがの非構造壁である(写真-8)。

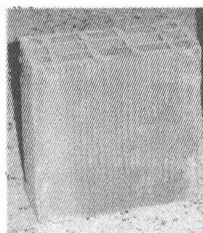


写真-8 鉄筋コンクリート造建築物と穴明きれんが

鉄筋コンクリート造建築物の被害は全壊、1階層崩壊(写真-9)、及び柱、梁、柱梁接合部の被害と各種の被害が見受けられたが、特徴的なものとして、扁平柱のせん断破壊(写真-10)、柱梁接合部のせん断破壊(写真-11)、及び非構造壁の落下(写真-12)がある。



写真-9 1階層崩壊



写真-10 扁平柱のせん断破壊

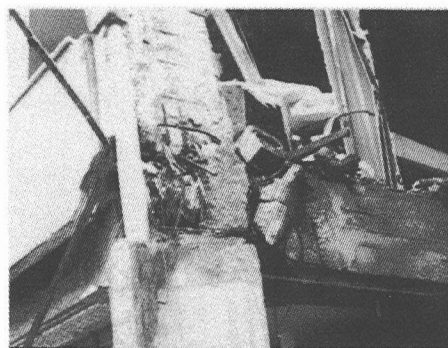


写真-11 柱梁接合部のせん断破壊

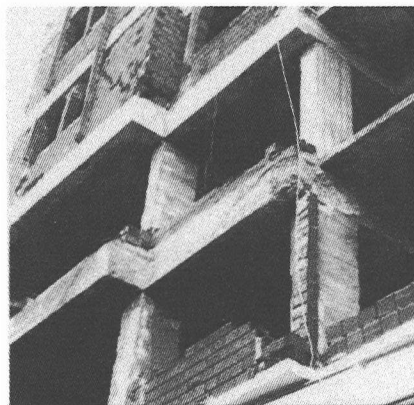


写真-12 非構造壁の落下

6. トルコ版建築物危険度判定マニュアル

イスタンブール工科大学のスタッフとともに、トルコの鉄筋コンクリート造建築物の性質と構造部材の被害の実態を考慮して、日本の応急危険度判定手法を修正し、トルコ版の建築物危険度判定マニュアルとチェックシートを作成した⁴⁾。トルコ版建築物危険度判定マニュアル作成で勘案した項目を以下に示す。

1) 扁平な柱、柱梁接合部、梁の損傷度を定義した。

トルコの建物には、薄い又は細い部材が多く使われている。薄い部材や細い部材は靱性が乏しく、最大耐力以後の耐力低下が大きいという特徴がある。そのため扁平な柱や成の小さい梁の損傷度を定義し、危険度評価に取り入れることとした(図-3、図-4)。さらに扁平柱と薄い梁の接合部の損傷が最終的に建物の崩壊につながる被害も多く見受けられたので、柱梁接合部の損傷度を定義し、危険度評価に取り入れることとした。(図-5)

2) 損傷度Ⅲの部材を危険度判定に取り入れた。

トルコの建物に多く用いられている部材は、前述のように靱性が乏しく、最大耐力以後の耐力低下が大きいという特徴がある。そこで、最大耐力を超えたと考えられる損傷度Ⅳの部材と損傷度Ⅴの部材を同一視して、危険度評価を行うこととした。

また損傷度Ⅲの部材残余耐震性能を元の耐震性能の60%とし、建物の耐震性能が約90%に低下した場合、すなわち損傷度Ⅲの部材が全体の約30%以上になったときをRank-Cと判定するようにした。

3) れんが壁の損傷を落下危険物の評価に取り入れた。

トルコの建物の外壁の多くはれんが壁である。れんが壁が柱梁フレームに囲まれている場合と柱梁フレームに囲まれていない場合がある。柱梁に囲まれていないれんが壁の落下危険性が高いことを考慮して、落下危険物の評価を行うこととした。

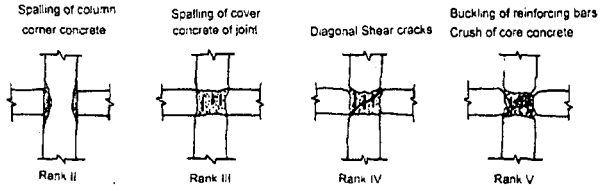


図-5 柱梁接合部の損傷度

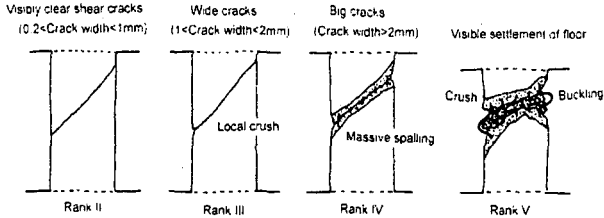


図-3 一般の柱の損傷度

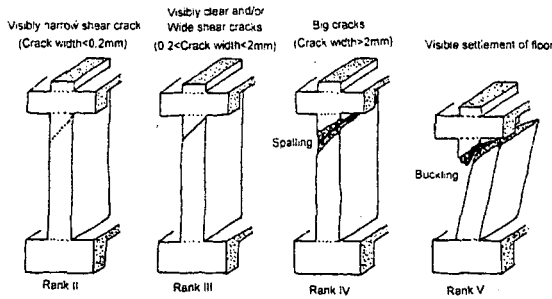


図-4 扁平な柱の損傷度

7. おわりに

被災建築物の危険度判定は、余震による2次災害の発生を防ぐとともに人心の安定をはかる上で重要である。日本での経験や技術を外国に移転する際には、その国の建築物の構造形式、構造性能、及び被害の特徴さらには施工品質等を考慮する必要がある。トルコ版応急危険度判定マニュアルでの考え方を参考に、中南米や東南アジア版を検討する予定である。

- 文献1) 日本建築防災協会ほか、「被災建築物応急危険度判定マニュアル」、1998.1
 2) Applied Technology Council、「Procedures for Postearthquake Safety Evaluation of Building (ATC20)」、1989
 3) European Seismological Commission、「European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98)」、1998
 4) Quick Inspection Manual for Damaged Reinforced Concrete Buildings due to Earthquakes、国土技術政策総合研究所資料、平成14年4月

添付資料-1 チェックシート(1)

INSPECTION SHEET 1/3

QUICK INSPECTION OF DAMAGED BUILDINGS (REINFORCED CONCRETE STRUCTURES)

STEP 0 ID Code : _____ Number of Inspections : _____
 Time and Date of Inspection : _____ / Mon. / Day _____ / Day _____
 Name of Inspector(s) (Affiliation / ID Number) : _____ / _____ / _____

DESCRIPTION OF INSPECTED BUILDING

1. Address : _____ TEL: _____
 2. Contact Person: _____
 3. Building Use : 1. Apartment House, 2. Individual House, 3. Residence with Commercial Use, 4. Office, 5. Others _____
 4. Type of Partitioning Walls [] Hollow Brick [] Solid Brick [] RC wall _____
 5. Number of Stories: Basement _____ + Ground Story _____ + Upper Stories _____

STEP 5 SUMMARY (Complete the sheet on the following pages and then summarize results below.)

<p>OVERALL RATING:</p> <p><input type="checkbox"/> INSPECTED Original lateral resistance is not significantly degraded, and temporary use or occupancy is allowed.</p>	<p><input type="checkbox"/> LIMITED ENTRY Temporary use is not allowed unless retrofit to prevent damage progress, repair to remove life-threatening hazards and/or barricades around hazard striking area(s) are made. Detailed assessment may be needed.</p>	<p><input type="checkbox"/> UNSAFE Emergency retrofit to prevent sudden collapse is needed, but entry and temporary use are not allowed. Detailed assessment needed.</p>
--	---	---

RECOMMENDATIONS:

Shoring / bracing / jacking needed in the following area(s): _____
 Removal of falling and/or overturning hazard(s) needed in the following area(s): _____
 Barricade / off-limits needed in the following area(s): _____
 Other(s) (area(s)): _____

COMMENTS:

INSPECTION SHEET 2/3

INSPECTIONS

STEP 1 Inspection 1. General Inspection of Entire Building

If a building is obviously unsafe due to following damage, mark the corresponding reason(s), identify the building "UNSAFE" and check as such in SUMMARY on the first page. (Inspections 2 and 3 can be skipped.)

<input type="checkbox"/> Total or Partial Collapse	<input type="checkbox"/> Extensive Damage to and/or Remarkable Offset of Superstructure from Foundation
<input type="checkbox"/> Remarkable Inclination of Entire Building or Individual Story	<input type="checkbox"/> Other(s)

STEP 2 Inspection 2. Hazard from Damage to Adjacent Buildings, Surrounding Ground and Structural Members

	A	B	C
a. Hazard Resulting from Damage to Adjacent Buildings or Surrounding Ground Failure	<input type="checkbox"/> No	<input type="checkbox"/> Uncertain	<input type="checkbox"/> Yes
b. Settlement of Buildings due to Ground Failure	<input type="checkbox"/> < 0.2 m	<input type="checkbox"/> 0.2 - 1.0 m	<input type="checkbox"/> > 1.0 m
c. Inclination of Buildings due to Differential Settlement	<input type="checkbox"/> < 1/60 rad.	<input type="checkbox"/> 1/60 - 1/30 rad. (seemingly inclined)	<input type="checkbox"/> > 1/30 rad. (easily noticeable)
d. Damage to Columns			
1. Inspect the most seriously damaged story, sketch building and count damaged columns as indicated at the bottom of this page, and then fill up the following d-1 and d-2.			
2. If no serious damage to a column but some beams and/or beam-column joints is found above or below the column, take it into account of damage to the column.			
d-1. Ratio of Damage IV or V [(1)/(3)x100] _____ %	<input type="checkbox"/> < 1/100 (1 %)	<input type="checkbox"/> 1/100 - 1/10 (1 % - 10 %)	<input type="checkbox"/> > 1/10 (10 %)
d-2. Ratio of Damage III [(2)/(3)x100] _____ %	<input type="checkbox"/> < 1/8 (12.5 %)	<input type="checkbox"/> 1/8 - 1/4 (12.5 % - 25 %)	<input type="checkbox"/> > 1/4 (25 %)

Structural Safety Judgement from a. to d.

INSPECTED* (only A)

LIMITED ENTRY (B ≥ 1 but C = 0)

UNSAFE (C ≥ 1 or B ≥ 2)

* Either Interior Inspection or Interview needed as a general rule

Inspected story : _____

[SKETCH : If a column shape is rectangular, sketch as such.]

(1) Number of damage rank IV or V	
(2) Number of damage rank III	
(3) Number of inspected columns	
(4) Number of total columns	
(5) Inspected Ratio of columns	[(3)/(4) x 100] %

1. Sketch building configuration and column location of the

INSPECTION SHEET 3/3

Inspected story in the left box.
2. Find out columns with damage rank ≥ III and indicate them.

Inspection 3. Falling and/or Overturning Hazards

	A	B	C
e. Framed Nonstructural Wall () Hollow Brick () Solid Brick () Concrete Block	() No or slight damage	() Cracks observed but no out-of-plane deformation	() Extensive cracks penetrated, offset from boundary members or out-of-plane deformation () Diagonal cracks observed
f. Unframed Nonstructural Wall () Hollow Brick () Solid Brick () Concrete Block	() No damage	() Slight damage	() Noticeable inclination, deformation or separation from top story
g. Wooden Roof	() No damage () Unknown	() Some damage observed but no falling hazards present	() Noticeable inclination / separation from connected members and rebar anchorage missing or uncertain
h. Stairways () Interior () Exterior	() No or slight damage () Unknown	() Extensive cracks observed but stair rebars are anchored	() Likely to fall down
i. Window Frame and Windowpane	() No or slight damage	() Visible deformation and/or cracks	() Remarkable crack and/or separation
j. Finishings () Plaster () Mortar	() No damage	() Partial crack or separation	() Likely to fall down
k. Elevated Water Tank, Chimney, Signboard, Machinery etc.	() No inclination () Unknown	() Slight inclination	() Life-threatening
l. Other Hazard(s)	() No damage	() Damage observed	

Nonstructural Safety Judgement from e. to l.

INSPECTED* (Only A and/or B)

LIMITED ENTRY (C ≥ 1)

* Either Interior Inspection or Interview needed as a general rule

SUB-SUMMARY on Inspections 2 and 3

Inspected Areas Exterior only Exterior & Interior (or Interview)

1. Check one in Inspections 2 and 3, and then choose the highest rating among them as the OVERALL RATING

	INSPECTED	LIMITED ENTRY	UNSAFE
Inspection 2 (Structural Safety)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Inspection 3 (Nonstructural Safety)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
OVERALL RATING Check the highest rating among Inspections above.	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

* Either Interior Inspection or Interview is needed as a general rule.

2. Following the above results, fill up SUMMARY on the first page. If B or C Rank for falling and/or overturning hazards (questions e. through l.) exists, describe your recommendations and comments in SUMMARY on the first page.