

2008年5月12日 中国四川大地震 復旧技術支援連絡会議 第2次復旧技術支援 建築チームの訪中報告

中埜良昭*・前田匡樹**・迫田丈志**・坂下雅信***

1. はじめに

2008年5月12日午後2時28分(現地時間)頃、中華人民共和国・四川省で M7.9 (USGS) の地震が発生した。この地震による人的、物的損害は甚大で、建物等の崩壊に伴い四川省と甘肅省において、あわせて6万9千人以上の死者と37万4千人以上の負傷者が発生した(6月11日現在)。地震発生直後、地震災害に関係の深い土木学会、日本建築学会、地盤工学会、日本地震工学会、日本地震学会の5学会(後に日本都市計画学会および日本地理学会を加えた7学会)は、相互の情報共有と協力・協調態勢のもと、中国の土木・建築関係者と連絡を取りつつ、阪神淡路大震災、中越地震災害などの経験の紹介、構造物の健全性診断技術などを含む復旧・復興支援を目的とした「四川大地震復旧技術支援連絡会議(以下、支援連絡会議)」を設置した。支援連絡会議では5月28日から6月1日にかけて復旧技術支援チーム(団長:濱田正則・早稲田大学教授、建築分野からは筆者らのうち中埜が参加)を四川省都成都市に先遣隊として派遣し、復旧技術支援について西南交通大学ほかの関係機関や関係者と協議した。

次いで支援連絡会議では、上記先遣隊の活動に基づき今後の具体的な支援方針のひとつとして西南交通大学との間で確認された「地震により損傷を受けた建物の診断と補修方法に関するセミナーの開催」に対応すべく、中国側技術者を対象とした震災復旧に関する技術支援セミナーの開催を活動の主目的とした第2次隊を組織・派遣することを決定した。これを受けて日本建築学会においても本活動を支援すべく筆者らを6月20日から25日にかけて派遣した。本稿では第2次隊の活動内容についてその概要を報告する。

<技術協力の対象および方法>

主として中低層鉄筋コンクリート造建築物を対象に、震災復旧に関する技術協力を行う。主な活動内容は以下の通りである。

- ①復旧技術の検討に必要な基礎データの収集とその検討
- ②同地の建築構造に適した被災度判定手法および応急・恒久復旧技術の検討と提案
- ③上記検討結果のとりまとめとセミナーの開催

<活動組織および日程>

団長:中埜良昭(東京大学生産技術研究所)

幹事:前田匡樹(東北大学大学院)

団員:迫田丈志(東北大学大学院),坂下雅信(京都大学大学院),呉旭(応用地質株式会社)

表1 日程表

6月20日	四川省成都市着
21~22日	被災地視察(綿竹市漢旺,都江堰市)
23日	セミナー準備
24日	セミナー開催 (於 西南交通大学鏡湖賓館多功能庁)
25日	帰国

2. 地震概要

四川省は中国西南部に位置しており、図1に示すように、四川省の東部と中部には四川盆地が広がり、四川省の省都である成都市はこの盆地の中心に位置している。また、四川盆地の北西端では、チベット高原の東縁との境界をなす龍門山脈が北東から南西の方向に伸びている。今回の地震は、龍門山脈の下を走る龍門山断層帯で発生したものと考えられる。本震は成都市の西北西約80kmを震源として発生した。龍門山断層帯では、過去にマグニチュード7以上の地震が発生した記録は残っていないが³⁾、その周辺の断層帯では古くから大規模な地震が頻繁に起こっている⁴⁾。四川盆地西部は、インドプレートとユーラシアプレートの大規模の2枚の巨大な岩盤の境界付近に位置している。それゆえ、四川盆地西部を含む中国内陸部からヒマラヤ山脈東端にかけての地域では、両プレートの衝突により断層帯が発達しやすい環境にあると考えられる^{1),5)}。

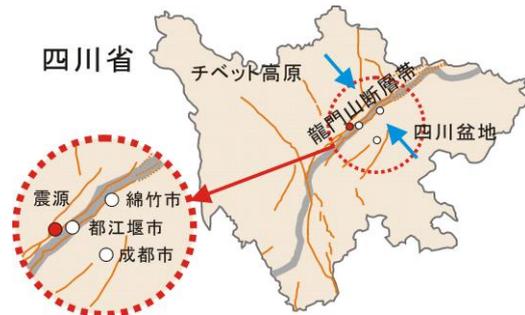


図1 四川省地図

* 東京大学生産技術研究所

** 東北大学大学院

*** 京都大学大学院

3. 被災調査の概要

技術支援セミナーにおいて、被災地における建物の構造形式や破壊性状を考慮した適切な復旧方法を提案する為に、6月21日および22日の2日間、現地調査を行った。調査は西南交通大学・趙世春教授および張建経教授の案内のもと、他の同大学関係者を含む総勢15名程度で、事前に選定された被災地域および被災建物を1箇所(1棟)当たり約1時間で調査した。調査地域は震源の山岳部に近い綿竹市漢旺と都江堰市である。図2に調査地点および調査経路を示す。6月21日は綿竹市漢旺(図中②)を中心に①→②→③→④を、6月22日は都江堰市(図中⑤)を中心に、それぞれ被災建物を調査した。地点⑥は活動拠点である西南交通大学を示す。

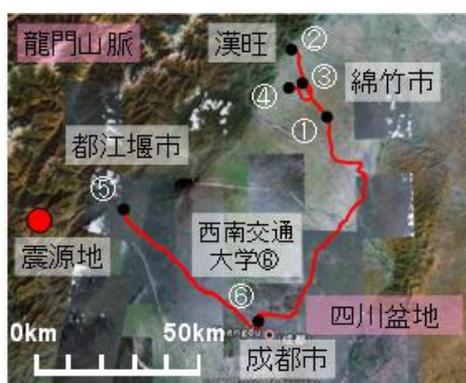


図2 被害調査地点

成都市の北約80kmに位置する綿竹市③では醸造業が盛んであり、醸造施設の倒壊現場も調査した。また綿竹市街の北約10kmに位置する漢旺②では、工場や集合住宅に生じた壊滅的な被害(写真1)を調査した。成都市の北西50kmに位置する都江堰市⑤(写真2)では、今回の被災調査でも確認されたように、倒壊・大破から小破まで多くの建物被害が報告されている。



写真1 集合住宅が多数倒壊した街区(漢旺)



写真2 傾斜地に建設中の集合住宅群(都江堰)

4. 被害の分類と被害例

今回調査した建物の構造形式は、大きく2種類に分類される。一つは鉛直部材のレンガ壁と水平部材のPCa床版、RC臥梁からなる組積造であり、もう一つはRC造フレーム構造にレンガ壁が充填された形式である。表1に被害パターンを示す。

表1 被害パターンの分類

被害分類	構造形式	被害パターン
(1)	組積造	レンガ壁やPCa中空床スラブの被害
(2)	RC造	レンガ壁の被害
(3)		柱のせん断破壊
(4)		柱頭・柱脚の曲げ圧壊
(5)		柱梁接合部破壊
(6)		地盤変状に伴う建物被害

(1) 組積造の被害

レンガ壁とPCa床版、RC臥梁からなる組積造では、建物の部分崩壊や倒壊という大きな被害が生じた。写真3に組積造の典型的な被害例である都江堰市の6階建て組積造建物を示す。1階の店舗はRC造フレーム構造、2階から6階の集合住宅部は組積造となっており、鉛直部材はRC造柱のないレンガ壁である。レンガ壁の上にはRC臥梁が配され、床にPCa中空スラブが用いられている。1階RC造部分は倒壊を免れたが、2階から上部の両妻側スパンの組積造は部分崩壊している。写真4のようにレンガ壁の崩壊によりRC臥梁の破壊やその上に敷き並べられたPCa中空スラブが崩落した被害が多く見られた。

(2) RC造のレンガ壁被害

中国では鉄筋やセメントの価格の問題から、RC造耐震壁が用いられることが少なく、多くのRC造建物でレンガ充填壁が用いられている。また、

RC 造の間柱がレンガ壁施工後にレンガを型枠として施工される事例も見られた。今回の調査では、レンガ壁のせん断ひび割れや崩壊も多く見られた。写真5に綿竹市漢旺の7階建て商業ビルの被害状況を示す。妻面のレンガ壁にせん断破壊が生じ、仕上げ材の剥落が見られる。また、レンガ壁のせん断破壊により、壁に内蔵された RC 造間柱の柱脚部でも、せん断破壊が生じた。



写真3 建物両妻側スパンの部分崩壊



写真4 RC臥梁とPCa中空床スラブの崩落



写真5 レンガ壁とRC間柱のせん断破壊

(3) RC 造柱のせん断破壊

RC 造フレーム構造の建物に多く用いられるレンガ造腰壁により短柱化した柱のせん断破壊が見られた。写真6は都江堰市の3階建て建物1階で見られた短柱の典型的なせん断破壊の例である。短柱の下部では、レンガ造腰壁と柱の境に縦ひび割れが確認できる。

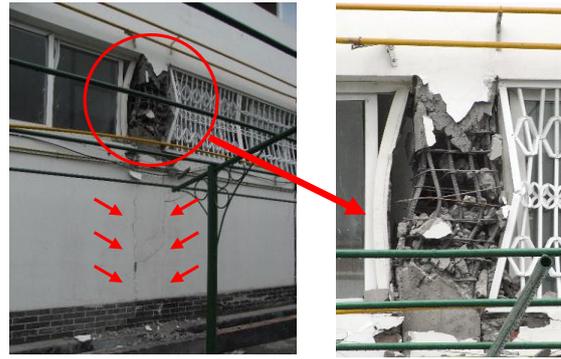


写真6 レンガ造腰壁による短柱せん断破壊

(4) RC 造柱の柱頭・柱脚での曲げ圧壊

RC 造建物で大破、倒壊した建物の多くに柱頭・柱脚の曲げ圧壊が見られた。写真7および写真8に1階で層降伏した都江堰市の6階建て集合住宅の柱頭および柱脚の曲げ圧壊を示す。柱のせん断補強筋の折り曲げ部がコアから抜け出し、コアコンクリートの崩壊、主筋の座屈が見られる。一部に主筋の破断も確認できる。技術支援セミナー(5章)では、この建物を例題として復旧案の提示を行っている。



写真7 1階側柱柱頭の曲げ圧壊



写真8 1階隅柱脚部主筋の破断

(5) RC 造柱梁接合部の破壊

柱頭破壊や柱のせん断破壊に比べると事例は少ないが、今回の被害調査では、写真9に示すような建設中のRC造フレーム構造の建物において、柱梁接合部のせん断ひび割れやせん断破壊が見られた。



写真9 柱梁接合部のせん断破壊

(6) 地盤変状に伴う被害

都江堰市の山間部の建設現場では、地盤変状に伴う不同沈下や地盤の強制変位に伴う建物の損傷が見られた。写真10に地盤の強制変位による柱の破壊を示す。建物の背後にある裏山斜面中腹にはアースアンカーが施工されているが、斜面下部の地盤が一部崩落し移動したために、連結梁の無い独立基礎上に建つ柱の柱脚が右側に強制変形を受け破壊した。



写真10 地盤変状による柱の損傷

5. 復旧技術支援セミナー

5.1 セミナーの概要

2日間の被災地調査の後、6月24日に被災建築物の復旧技術支援セミナーを西南交通大学内の鏡湖賓館多功能庁において開催した。セミナーには四川省西南建築設計院、成都建築設計院、鉄道省第二設計院などからの実務設計担当者および西南交通大学の研究者・学生など約90名の参加を得た。セミナーの構成を表2に示す。

講演1, 2では今回の被災地視察のまとめ、日本における被災建築物の復旧・復興の基本的な考え方とその方策を紹介した。講演3では被災した実在する建物を例題建物として、日本における被災度区分判定手法を適用した場合の被災程度の判定、ならびに本建物に対して考えうる復旧方法案

6例を提示した。フリーディスカッションでは、復旧・復興に関する一般的な考え方、日本側から提案した上記復旧方法に関して、その採用の可能性、実施に当たり障壁となる問題点、その解決方法などについて意見交換を行った。本報では、講演3の復旧計画案およびフリーディスカッションについて報告する。

表2 セミナーの構成

6/24 午前 9:00~	講演1 (中埜):「四川地震による建築被害の概要」および「日本の被災建築物の復旧(基本的な考え方)」 講演2 (前田):「日本における被災建築物の被災度判定と復旧」
午後 ~17:50	講演3 (迫田):「被災した建物を実例とした日本の復旧技術の紹介」 フリーディスカッション

5.2 復旧計画案の提案

(1) 対象建物

例題建物は、四川省都江堰市内の山を背後に控えた斜面に建設中であったRC造6階建て集合住宅である。躯体は完成しており、外観はタイル貼りである。建物の全景を写真11に示す。柱リストおよび平面図、軸組図を図3および図4に示す。階高は2.85mで、1階柱の内法高さは2.2mである。2階~6階はレンガ壁を有するが、1階は純ピロティ構造となっている。



写真11 例題建物全景と1階柱の残留変形

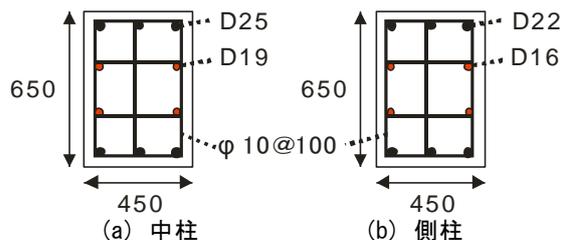


図3 柱リスト (単位:mm)

(2) 被害の概要

1階のほぼ全ての柱の柱頭・柱脚が曲げ降伏し、コンクリートの圧壊や主筋の座屈・破断が生じた(写真7および8)。2階から6階については、外観調査の結果、主架構およびレンガ壁に目立った損傷は見られなかった。一方、1階桁行き方向に残留変形角約 1/10 が生じる層降伏型の崩壊メカニズムが形成されている(写真11)。

(3) 応急危険度判定⁶⁾

被害状況から各柱の損傷度はVに該当し、その割合が1階柱全体の10%を超える為、応急危険度判定は[危険]と判定した。余震などに対する倒壊防止のため軸力支持などの応急措置とともに、2次災害防止のため立ち入り禁止措置が必要である。

(4) 被災度区分判定⁷⁾

上部構造は、1階の全ての柱が損傷度Vであるため、残存耐震性能率 $R=0$ となり、[大破] ($R<60$) と判定した。応急復旧の可否は[応急措置・応急

復旧]に該当し、耐震診断に基づいて恒久復旧を行うまで建物は使用禁止となる。応急措置としては、余震などによる損傷の進行や倒壊防止のための鋼材による軸力支持やブレース・RC壁増設による水平抵抗力の確保などが考えられる。

(5) 耐震診断⁸⁾

恒久復旧を検討するに当たり、まず耐震診断により被災前の桁行き方向の耐震性能(構造耐震指標 I_s)を評価した。材料強度については、コンクリートの圧縮強度を 30N/mm^2 、鉄筋の降伏強度を主筋で 345N/mm^2 、せん断補強筋で 295N/mm^2 と仮定した。また、経年指標 T および形状指標 S_D は 1.0 とした。

単位面積当たりの建物重量は 10kN/m^2 として建物総重量、柱軸力を算定した。建物重量の算定は現地調査の結果を踏まえ、床はスラブ厚 120mm 、仕上げ厚 30mm 、積載荷重 0.8kN/m^2 とし、レンガ壁は比重を 20kN/m^3 、レンガユニットの空洞部分と外形寸法の面積比率で定義した空隙率を 0.5、

壁仕上げを片面 25mm ずつ両面で 50mm と仮定した。また桁行き方向1スパン当たり $Y1\sim Y4$ 間戸境壁2枚相当の重量(桁行き壁とその他の間仕切壁の重量を戸境壁1枚分に相当すると仮定)を考慮した。さらにその他仕上げ等の影響による重量増を10%程度考慮した。これらの仮定より求められる1階柱の長期軸力は 1700kN であり、軸力比に換算すると0.2程度である。

図3に示す2種類の柱(中柱・側柱)の強度指標 C 、靱性指標 F の算定結果と、第2次診断による1階の構造耐震指標 I_s および $C_{TU} \cdot S_D$ の算定結果を表3に示す。いずれの柱もせん断破壊よりも曲げ降伏が先行する。部材の内法高さ ($h_0=2200\text{mm}$) に対して、せい ($D=450\text{mm}$) が比較的小さく、図3に示すようにせん断補強筋に中子筋も用いられていることから、靱性指標 $F=2.60$ および 2.99 と塑性変形能力の高い曲げ柱と評価された。また、強度(保有水平耐力)は $C_{TU} \cdot S_D = 0.26$ と日本の耐震診断基準で要求される0.3を若干下回るが、塑性変形能力に富む建物であり(実破壊モードとも対応)、日本において既存RC造建物の耐震判定の目安とされる $I_s=0.6$ 程度の性能を被災前は有していたと考えられる。

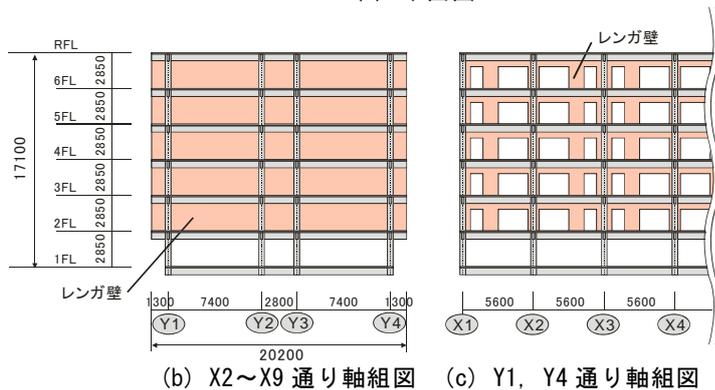
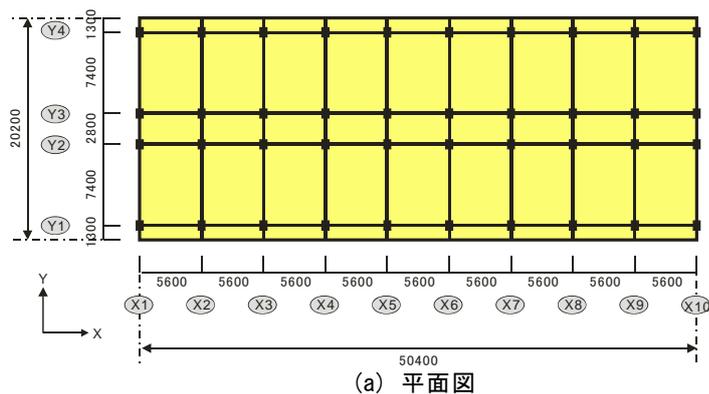


図4 例題建物(単位:mm)

表3 被災前の耐震診断結果(1階)

柱	C	F	E_0	I_s	$C_{TU} \cdot S_D$
側柱	0.14	2.60	0.67	0.67	0.26
中柱	0.12	2.99	(5)式	0.67	0.26

(6) 復旧計画案

被害状況および耐震診断の結果に基づいて、復旧計画案を提示した。復旧に採用する工法は、「震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針」⁷⁾および「1999年台湾・集集地震災害調査報告および応急復旧技術資料」⁹⁾を参考とした。立案した復旧案は図5および表4に示す6例である。

復旧案は大きく3つに分類される。復旧案1は被災した1階柱を原状復旧する案である。但し、耐力回復係数 ϕ が1.0を下回るため、適切な工法を採用し、施工管理をしたとしても元の耐震性能を得る事はできない。従って同規模の地震に再度見舞われた場合には、倒壊する可能性がある。

復旧案2~4は損傷した1階柱の補修を行うとと

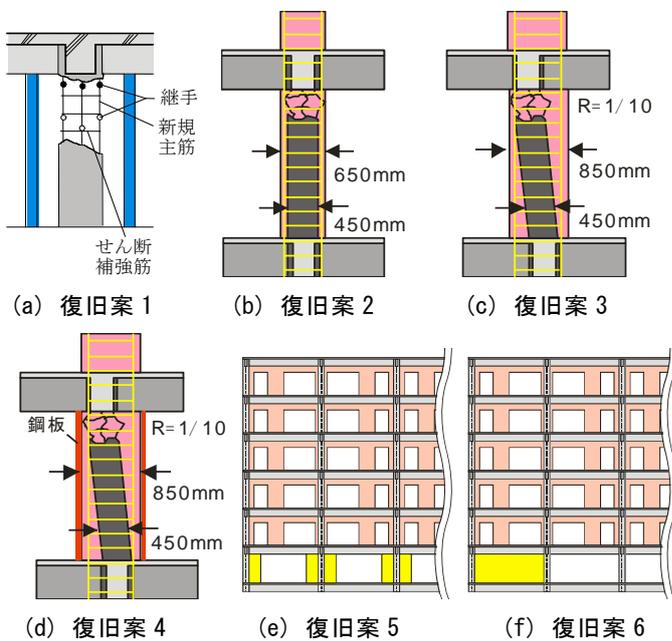


図5 復旧工法

もに RC 巻による曲げ補強も合わせて行い強度を増大させる計画である。復旧案2は水平残留変形の修正する案で、復旧案3および4は柱の傾斜を残したまま復旧する計画とした。(復旧案4は曲げ補強に加えて鋼板巻きによるせん断補強も行う。)

復旧案5, 6は、柱の損傷を補修するとともに、袖壁または耐震壁を増設することで、強度の増大を図る計画とした。

復旧案では復旧工法の概念を分かりやすく説明するため、1階のみを対象とした復旧計画案を示したが、実際の補強設計では、上階との強度・剛性のバランスの検討が重要であることも説明した。

5. 3 フリーディスカッション

(1) 日本側が提示した復旧計画案に対する議論

例題建物は1階の残留変形が大きく、その矯正には、1階柱の損傷により沈下した上層部のジャッキアップを行った後に水平加力し移動する必要がある。高度な施工技術が要求される。したがって、柱の残留変形を矯正せず、傾いたままで補強する復旧案3が現実的な解決策として現地の設計者から多くの賛同が得られた。また一方で、復旧案3では柱寸法が既存断面に比して著しく増大すること、これに伴い上階との強度・剛性のバランスが大きく崩れる恐れがあること、などから復旧案2を支持する意見も出された。なお復旧案6の耐震壁増設による補強計画については、中国の設計基準では、純フレームと耐震壁付きフレームの混合形式が規定されていないこと、また一般的にセメントや鉄筋の価格の問題から RC

表4 復旧計画案の一覧

	概要	基本コンセプト	施工上の問題	復旧後の耐震性能
復旧案1	柱の補修 (原状復旧)	被災前の状態に原状復旧	柱の残留変形を修復するためのジャッキアップと水平移動が必要	同レベルの地震で倒壊の可能性が残る
復旧案2	柱の曲げ補強	柱の傾斜(残留変形)を修復し、RC巻き補強で強度も増大	RC巻立て部分の主筋の定着、柱梁接合部のせん断補強のディテールの検討が必要	被災前より強度・剛性が増大するが、上階との強度・剛性のバランスの検討が必要
復旧案3	柱の曲げ補強	傾斜した柱はそのままRC巻き補強		
復旧案4	柱の曲げ+せん断補強	復旧案3に加えて、鋼板巻きせん断補強		
復旧案5	柱の補修 袖壁増設	復旧案1に加えて、袖壁を増設	柱の残留変形を修復するためのジャッキアップと水平移動が必要	
復旧案6	柱の補修 耐震壁増設	復旧案1に加えて、耐震壁を増設		

壁よりレンガ壁を多用する実情から、あまり現実的ではないとの指摘があった。

また、RC巻き立てにより柱を拡幅した場合の主筋や接合部せん断補強筋の定着方法など補強部材のディテールについても議論した。

(2) その他の質疑応答

復旧計画案以外にも、数多くの質問や議論がなされた。主な内容は以下の通りである。

a) 建物の被災度、部材の損傷の評価と対応策

RC部材のひび割れへの関心が高く、ひび割れの状況（ひび割れの幅や発生箇所等）とその対処法について多数の質問がなされ、地震後、現地の設計技術者やユーザーが建物の損傷に敏感になっていると感じられた。部材の補修方法に関する質問も多く、日本で一般的な復旧方法を紹介した。

b) 構造設計の考え方

今回の地震では倒壊には至らないものの、残留変形や内装等に被害が生じた建物も多く、倒壊を免れたことでよしと考える構造設計者と被害が生じたことを問題視するユーザーとの間の意識の齟齬が生じているとの問題提起があった。これに対して日本側から、阪神淡路大震災後に日本でも同様の問題が生じ、地震時に建物がどの程度変形し、どのような損傷が予想されるかを構造設計者がユーザーに説明することの重要性が認識され、性能設計の導入の契機となったこと、しかしながらまだ研究成果は必ずしも十分ではなく、性能設計の実現には多くの課題がある現状を説明した。

c) 今後の中国の耐震設計基準のあり方

この地震を契機に中国政府が被災地域の設計用地震力の改訂（引き上げ）を予定していることに関して、強化の必要性や適切な地震力レベルに関する質問が出された。これに対して、被災地の地震動の大きさと建物の耐震性能および被災度の関係を十分に調査して、現行の耐震規定における設計地震動レベルの妥当性を慎重に検討することが必要であるとの見解を示した。

6. まとめ

今回調査した被災地域（都江堰市、綿竹市漢旺）では、組積造建物の壊滅的な被害が多数見られた。これらの多くはレンガ壁、PCa中空スラブおよびRC臥梁からなる構造で、壁が崩壊して床が落下する被害である。RC構造では、日本の建物と比

較すると柱、梁部材が細いため、部材端部の曲げ破壊や柱梁接合部近傍の破壊が多く、それにより架構が崩壊した被害事例も多く見られた。

災害復旧に関する技術支援セミナーでは、日本の震災復旧の基本的考え方や基準類を説明するとともに、典型的なRC造ピロティ構造の被災事例を検討対象として復旧案を6例提示し、これに基づき中国の技術者と活発な議論を行った。

7. 謝辞

本活動は、「四川大地震復旧技術支援連絡会議」での合意に基づき日本建築学会から派遣されたもので、現地調査および技術支援セミナーの開催にあたっては、中国・西南交通大学から全面的な支援を受けた。特に、同大学・何川教授、趙世春教授、張建経教授、蔣關魯教授には本セミナーの開催ならびに現地調査に関する種々の調整および調査同行に多大な尽力をいただいた。ここに、関係各位に謝意を表するとともに、被災地の一日も早い復興を祈念する。

8. 参考文献

- 1) USGS ホームページ, 2008.7.14,
<http://www.usgs.gov/>
- 2) 新華社通信 ホームページ, 2008.6.26,
<http://www.reliefweb.int/rw/RWB.NSF/db900SID/KKAA-7FZ5L6?OpenDocument&rc=3&emid=EQ-2008-000062-CHN>
- 3) 丸山正：2008年中国四川省大地震震源域の活断層の概要, AFRC NEWS No.79, 2008.5
- 4) 立行政法人 産業技術総合研究所 地質調査総合センター ホームページ：震央周辺地域の地質構造と歴史地震, 2008.5.19,
http://www.gsj.jp/jishin/china_080512/ActiveTectonicsMap.html
- 5) 国立科学博物館 ホームページ ホットニュース, 2008.5.20,
<http://www.kahaku.go.jp/hotnews/detail.php?t=16&s=1>
- 6) 日本建築防災協会・全国被災建築物応急危険度判定協議会：被災建築物 応急危険度判定マニュアル, 1998.1.
- 7) 日本建築防災協会：震災建築物の被災度区分判定基準および復旧技術指針, 2002.8.
- 8) 日本建築防災協会：既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準 同解説, 2001.
- 9) 日本建築学会：1999年台湾・集集地震災害調査報告および応急復旧技術資料, 2000.11