

2008年中国・四川大地震における建築物被害調査報告

構造研究グループ 上席研究員 福山 洋

研究員 諏訪田 晴彦、田尻 清太郎

目次

- I はじめに
- II 調査地域
- III 各地の被害状況
 - 1) 映秀
 - 2) 都江堰
 - 3) 漢旺
 - 4) 白鹿
- IV 建築物の被害の特徴
 - 1) 1階の破壊
 - 2) 2階の破壊
 - 3) 短柱のせん断破壊
 - 4) 柱頭・柱脚の曲げ破壊または接合部での破壊
 - 5) 階段が取り付く柱の破壊
 - 6) 基礎と上部構造のずれ
 - 7) 組積壁の破壊・脱落
- V 復興状況
- VI 中国の建築物の耐震設計基準
- VII まとめ
 - 謝辞
 - 参考文献

I はじめに

2008年5月12日午後2時28分頃、中華人民共和国・四川省汶川県を震源とするマグニチュード7.9(米国地質調査所の発表、中国地震局の発表は8.0)の大地震が発生し、死者・行方不明者8万7千人以上、負傷者37万4千人以上、倒壊した住宅の世帯数約652万5千世帯という甚大な被害が発生した¹⁾。

建築研究所では、発生直後より地震被害情報の収集や復興支援に関する技術協力等を継続的に行なってきたが、地震発生後約半年が経過した2008年11月4、5日に、中国同済大学の協力

により現地調査を実施した。この現地調査の目的は、建築物の被害パターンなどの地震被害の特徴を把握し、今後さらに続けられる復興支援に関する技術協力等に資することである。ここでは、建築物の被害の特徴と復興状況等についての調査結果を報告する。

II 調査地域

本地震による被害は広範囲に及んでいるが、今回、調査を実施したのは四川省内の映秀(エイシュウ、Yingxiu)、都江堰(ト

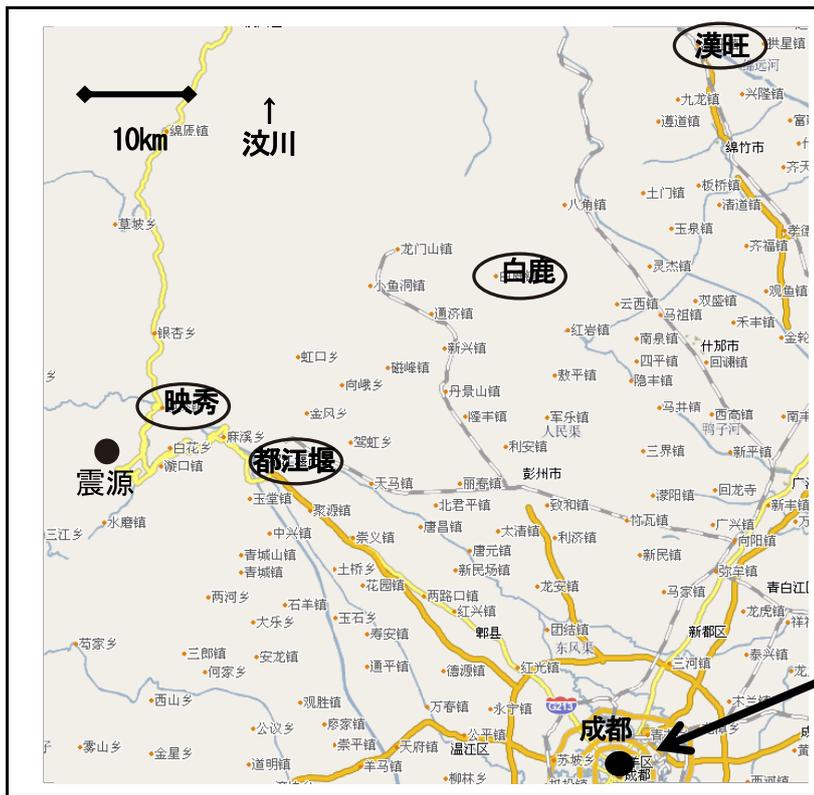


図1 現地調査地域

コウエン、Dujiangyan)、漢旺 (ハンワン、Hanwang) および白鹿 (パイルウ、Bailu) である (図1 参照)。都江堰には、調査を行った時点で比較的規模の大きな建物の被害が残っており、また、映秀、漢旺、白鹿には、地震の被害をそのまま後世に残すことが決定した建物群や断層があったため、これらの地点においてはほぼ被災直後の状態を調査することができた。

調査地域における最も一般的な建築物の構造形式としては、枠組み組積造が挙げられる。これは、レンガの壁の周囲を鉄筋コンクリート造の柱と梁で囲った構造であり、世界的にもポピュラーな構造形式である。一方、都市部では、鉄筋コンクリート造の柱梁フレームの中に、中空のレンガブロックを充填したものも多く見られる。これは、前者の枠組み組積造と似ているが、柱と梁の断面寸法が大きく、また、レンガの壁を設けないことで広いスペースを確保できるところが、異なる点である。また、1階が店舗で2階以上が共同住宅として使われる建築物では、店舗のスペース確保のために、1階のみ鉄筋コンクリート造の柱梁フレーム構造とし、2階以上は枠組み組積造としているものが多く見られる。この形式では、2階以上の戸境レンガ壁が1階ではなくなることがあるが、これは、兵庫県南部地震におい



写真1 大きく傾いた校舎 (映秀)



写真2 1階柱頭の曲げ破壊 (映秀)

て被害が多く見られたいわゆるピロティ構造（下階壁抜け構面を有する構造）と同様な構造形式となる。また、山間部の比較的小規模な住居等では、鉄筋コンクリート造の枠組みを有しない、純粋な組積造も多く見られる。

III 各地の被害状況

1) 映秀

映秀は、推定震源の北東約 10km、都江堰市から北西に直線距離で約 20km に位置しており、震源に最も近い町（鎮）のひとつである。ここは、都江堰市から汶川（今回の地震は中国では「汶川地震」と呼ばれている）に向かう川沿いの道を車で約 1 時間走った所にあるが、地震によってこの道は土砂崩れや落橋などの被害が大きかったため、地震後数ヶ月は車で向かうことができなかった。

映秀では、主に漩口中学校を調査した。ここは、今回の地震被害の記念碑とするために、地震直後の被災状況がほぼそのまま残されていることから、いくつかの典型的な被害パターンを確認することができた。写真 1 は大きく傾斜した鉄筋コンクリート造の校舎で、写真 2 のように、1 階柱が曲げ破壊して大きな水平変位が生じ、上部荷重を支えることができずに落階したと考えられる。また、写真 3、4 は、敷地内にある枠組み組積造の 5 階建て学生寮であるが、この建物は 1 階が完全に層崩壊し、2 階以上も組積壁および鉄筋コンクリート造の枠組みに大きなせん断ひび割れが見られるなど、甚大な被害が生じた。

なお、映秀では、写真 5 のようにほとんどの建物が崩壊あるいは大破していた。

2) 都江堰

次に、震源から約 20km 東、成都市から約 60km 北西に位置する都江堰市内に残る複数の被災建物の調査を、都江堰市の協力の下に実施した。

都江堰では、写真 6 に示すように、1 階が店舗で 2 階以上が共同住宅という建物が多く見られるが、その構造形式は 2 階以上が枠組み組積造、1 階が鉄筋コンクリート造である。この種の建物では、写真 7 のように 2 階以上の枠組み組積造の部分が崩壊したものや、写真 8 のように 2 階のみに被害が集中したものが見られた。なお、写真 7、8 の建物は 1990 年代に建設されたものである。

3) 漢旺

震源から約 90km 東北東に位置する綿竹市漢旺鎮を調査した。漢旺は、今回の地震で動いた断層の中央付近に位置すると考え



写真 3 1 階が完全に崩壊した学生寮（映秀）



写真 4 写真 3 の妻面の 1 階部分（映秀）



写真 5 ほとんどの建物が倒壊した映秀の様子



写真6 都江堰で一般的な1階に店舗を有する共同住宅



写真9 1階に被害が集中した建築物



写真7 2階以上の崩壊



写真10 2階に被害が集中した建築物



写真8 2階に被害が集中した建築物



写真11 2階以上に被害が分散した建築物

られている。当該市内では公安警察により立入禁止となっている区域もあった。漢旺も、ある区域をそのまま地震記念碑として残す計画があり、被害建物が取り壊されずに残っていたため、地震直後の被害の様子を調べることができた。

ここでは、道路沿いに中層の建物が比較的密集して並んでおり、建物同士の衝突なども見られた。また、1階に破壊が集中し2階以上はほとんど被害が見られない建物（写真9）、2階に被害が集中している建物（写真10）、2階以上に被害が分散した建物（写真11）、全階に被害が分散した建物（写真12）などさまざまな被害が見られた。

4) 白鹿

震源から約 55km 東北東（成都の北北東、直線距離で約 40km の彭州市中心部からさらに北北東方向に 40km ほど山間部に入ったところ）に位置する彭州市白鹿鎮を調査した。白鹿では、白鹿中学校（9年制、日本の小学校と中学校をあわせたものに相当する）を視察した。この中学校も建物はすべて枠組み組積造または組積造である。ここでは、2棟の教室棟の間に断層が露出しており、それが上下に2mほどずれているが、枠組み組積造の教室棟は被害は生じたものの何れも倒壊せずに残っていた（写真13）。ただ、この2棟以外の組積造の建物はほとんどが倒壊している（写真14）。こども、敷地全体の被災状況をそのまま保存する計画のようで、敷地入り口や敷地内に被災状況説明の看板が設置されていた。

視察した中学校以外に、走行中の車中から多数の仮設住居が見え、ときおり倒壊もしくは大破した民家も観察されたことから、白鹿鎮全体の被害は大きかったと推察される。

III 建築物の被害の特徴

今回の地震被害調査で見られた特徴的な被害パターンを以下に整理して示す。

1) 1階の破壊

写真3, 4, 15, 16に見られるように、建築物の1階が破壊し2階以上の部分が落階する（もしくは、落階しそうになっている）被害形式であり、次のような原因が考えられる。

写真3, 4は枠組み組積造、写真15は組積造であるが、これらの構造では一般に全層で同じ断面や配筋とすることが多いため、各階の耐力はほぼ同じである。一方、地震力は一般に1階が最も大きいため、相対的に1階が最も壊れ易くなる。もし、組積壁の量が充分にあつて、その強度で地震時に発生する力に抵抗できる場合には安全な構造形式であるが、地震時の力に対



写真12 全階に被害が生じた枠組み組積造建築物



写真13 2棟の教室棟の間に露出した断層



写真14 倒壊した組積造建物（手前）



写真 15 1階が大きく破壊された組積造（漢旺）



写真 17 2階に被害が集中した建築物（都江堰）



写真 16 下階壁抜け部分で大きく損傷した
1階の柱（都江堰）



写真 18 2階で大きく減じられた柱の寸法（都江堰）



して組積壁の耐力が不足する場合には、1階が破壊され層崩壊を生じる危険性がある。もともと相対的に弱い1階の組積壁が損傷すると、その剛性と耐力が低下するため、さらに被害が1階に集中するという進行性の危険な破壊につながる可能性がある。このような、1階に被害が集中する現象は、張間、桁行の両方向ともに考えられる。なお、1階が損傷を受けた段階では、下階壁抜け架構に近い状況となるため、これまでに日本で被害が多く見られたピロティ構造と同様な状況となる。また、日本と同様に、鉄筋コンクリート造の下階壁抜け部分で1階の柱が大きく損傷した例も見られた（写真16）。

このような破壊を防止するためには、周辺フレームによる組



写真 19 1階柱と2階柱をつなぐ梁のせん断破壊（都江堰）



写真20 短柱のせん断破壊 (都江堰)



写真21 腰壁が先に壊れて短柱とはならなかった柱 (写真20と同じ建物)



写真22 柱頭・柱脚の曲げ破壊 (映秀)



写真23 柱頭・柱脚の曲げ破壊 (映秀)

積壁の拘束の度合いを高めたり、壁や柱・梁の断面を大きくして層の抵抗力を高めることが考えられる。このような工夫を施した場合の効果（面内の剛性と抵抗力）を実験等によって調べることで、その結果を適切に設計に反映させることができる。なお、その前提条件として、壁の面外破壊は適切に防止されていなければならない。

2) 2階の破壊

1階は比較的健全であるが、2階に破壊が集中している被害形式 (写真10, 17) であり、次のような原因が考えられる。

1階が鉄筋コンクリートフレーム構造で2階以上が枠組み組積造である複合構造の場合、1階の鉄筋コンクリート造柱に比べ、2階の枠柱の断面は極端に小さくなっている場合が多い (写真18)。梁間方向の耐力は組積壁の量に依存するが、桁行き方向の耐力は柱の強度に依存する。2階の柱は小さく、組積の袖壁が取り付いているが、この袖壁は比較的小さな変形で破壊するため、結果として桁行き方向の耐力は1階に比べて2階は小さい。このため、2階に破壊が集中したものと考えられる。

このような破壊を防止するためには、桁行き方向の応力伝達

と組積壁の取り扱いを明確にするのが有効である。すなわち、組積壁を構造体とするのであれば、その効果を実験等によって調べ、結果を適切に設計へ反映させる。そうではなく、組積壁を無視するのであれば、組積壁が早期に破壊し柱へ悪影響を及ぼさないことを実験等で確認するか、もしくは柱との間にスリットを入れる等の方法により組積壁に力が流れないようにし、かつ、鉄筋コンクリート造のフレームのみで地震力に抵抗できるよう、適切に断面設計を行う必要がある。

なお、張間方向の柱の位置が、1階に比べて2階の方が外側に張り出している場合があるが、その場合には、梁に大きな力が作用することからせん断破壊している場合が見られた(写真19)。

3) 短柱のせん断破壊

柱が曲げ降伏する前にせん断破壊で脆性的に壊れる被害形式(写真20)であり、多くの柱がせん断破壊すると、落階の危険性もある。

その原因は、柱に腰壁等が取り付けすることで内法長さが短くなり、入力せん断力が大きくなるが、柱のせん断耐力がそれを上回っていないことである。

この破壊を防止する対策としては、短柱の場合の大きな入力せん断力よりも柱のせん断耐力が上回るように、多くのせん断補強筋を配する等の設計を行うことである。ただし、腰壁が先に壊れて短柱とはならない場合もあり(写真21)、そのコントロールは容易ではない。このような壁が取り付け柱の挙動を実験等によりよく調べる必要がある。これは、そのまま日本にもあてはまる課題である。

4) 柱頭・柱脚の曲げ破壊または接合部での破壊

写真22、23のように、柱の頭部および脚部で曲げ破壊し、鉄筋の座屈やコンクリートの圧壊等が見られる破壊で、最終的にはその階で倒壊する危険性もある。

原因は、梁よりも先に柱にヒンジが出来ることであり、一般に推奨されている weak beam strong column の考え方が実現できていないことである。この破壊を防止するためには、柱軸力を考慮した上で、柱と梁の曲げ耐力比を適切に設定するといった設計が求められる。日本でも1995年の兵庫県南部地震で梁よりも柱の先行降伏やせん断破壊が多く見られたことから、例えば構造計算ルート2-3では、確実に梁降伏を先行させるような規定の改訂が行われた。

5) 階段が取り付け柱の破壊

写真24は階段が取り付け柱の破壊であり、特に短柱となった柱の部分では、大きな強制変形を受けるために4)の「柱頭・柱



写真24 階段が取り付け柱の破壊 (映秀)



写真25 基礎と上部構造のずれ (映秀)



写真26 写真25の基礎と柱脚の詳細

脚の曲げ破壊」が生じ易くなり、また、大きなせん断力が作用することにより 3)の「短柱のせん断破壊」も生じ易い。これらに起因する損傷が進むと、落階につながることもあり得る。この対策としては、階段も考慮して架構の応力を算定するか、階段に壁を設けて水平力を伝達できるようにするといった方法が考えられる。なお、日本では階段に作用する水平力は階段が取り付く壁に負担させるか、もしくは隣接する建物に負担させる設計が一般的であるが、このような抵抗要素の明確化は有効な設計上の考え方であると思われる。

6) 基礎と上部構造のずれ

写真 25 は、基礎梁と上部構造の枠組み組積造の間にずれが生じた被害形式である。この原因としては、写真 26 に示すように、枠柱の主筋が基礎梁に緊結されていないことにある。

ただし、多少のずれであればこれを許容することにより、上部構造への入力せん断力を小さくしてその被害を軽減できる可能性もあり、今後研究的に検討すべき課題と考えられる。

7) 組積壁の破壊・脱落

組積壁は一般に、面内方向力（壁面に平行な力）には比較的強いが、面外方向力（壁面に直交する力）に対する抵抗力はあまり大きくはない。そのため、面外方向力には直交壁で抵抗するのが有効であるが、当該壁と直交壁の接合部の強度が充分でない場合には、その部分で分離するように破壊し、結果として壁は面外方向へ転倒するとともに、面内方向力へも抵抗できなくなる。写真 27 はこのような状況を示すものであるが、これは全世界の組積造建築物に共通の避けるべき課題である。

このような、面外方向への破壊が適切に防止されれば、組積壁は比較的大きな面内抵抗力を示すが、その耐力時には、小さな変形で脆的にせん断破壊することが多く、大きな損傷を受けやすい（写真 28）。よって、地震応答変形が大きくなる建築物に組積壁を利用する際には、破壊後の脱落などに対する慎重な検討が望まれる。

一方、組積壁を主として力を負担する部材ではなく、いわゆる非構造部材として利用している場合には、脱落の危険が適切に排除されていて、かつ、柱や梁が健全であれば、建築物の耐震性能はほとんど低下していないと考えられることから、写真 29 のような被害は許容されよう。しかしながら、地震後の建物の機能性を考慮することも今後だんだん求められてくると考えられることから、そのような要求をいかに適切に充足していくかは今後の重要な検討課題の一つである。



写真 27 組積壁の面外方向への破壊・転倒（漢旺）



写真 28 組積造方立て壁のせん断破壊（都江堰）



写真 29 非構造壁の破壊（漢旺）

V 復興状況

震源に近い山間部の農村地区である映秀、震源から約90km東北東に離れた山間部の町である漢旺、震源から約55km東北東に離れた山間部の町である白鹿では、町全体が壊滅的な被害を受けたと見られ、調査時点においても大半の住民が仮設住宅で生活しており、山間部においては自らの手で住宅を再建している姿も散見された。また、震源から約20km東に位置し、断層に近い人口約25万人の都江堰市街地では、いたるところで4～6階建て程度の枠組み組積造の集合住宅が大きな損傷を受けており、多くの住民が仮設住宅で生活していた。しかし、1階が店舗で2階以上が住宅となっている被害建物（構造形式は、1階が鉄筋コンクリート造で2階以上が枠組み組積造）では、1階の損傷の程度が比較的軽微である場合には1階の店舗のみが使用されている建物も多く見られた（写真6参照）。今回の調査で面会した成都市規画管理局の担当者によれば、都市部に比べて農村地区の復興方法に大きな課題が残されているとのことであった。

VI 中国の建築物の耐震設計基準

中国における建築物の耐震基準の変遷は、1978年に「工業および民用建築抗震設計規範」（TJ11-78）、1989年に「建築抗震設計規範」（GBJ11-89）、2001年に「建築抗震設計規範」（GB50011-2001）が制定されている。中国の耐震規定における設計用地震入力は、12段階の烈度によって規定されており、各烈度に応じて設計用の入力加速度（設計用せん断力係数）が定められている。また、建物の用途に応じて耐震等級（甲乙丙丁）も定められている。中国政府は今回の地震を受け、2008年7月に耐震基準を見直している。その主な内容は、学校建築をはじめ多くの人が集まる建築物の設計用せん断力係数のグレードを1ランク引き上げたことと、被災地域の設計用せん断力係数を引き上げたことである。なお、耐震規定の見直し作業が迅速に行われたのは、約10年ごとに見直される基準の改定時期がたまたま近かったことから、既にある程度の検討が進んでいたことがその背景にあるとのことであった。

VII まとめ

2008年11月4、5日に実施した現地調査の概要を示すとともに、現地調査で見られた被害の分類、調査時点における復興状況、中国の建築物の耐震設計基準について概説した。本調査により、建築物の被害パターンなどの地震被害の特徴を把握し、今後さらに続けられる復興支援に関する技術協力等に資する情

報を収集することができた。

謝辞

本現地調査は、同済大学、成都市の関係各位の多大なる協力の元、国土交通省国土技術政策総合研究所建築研究部主任研究官の井上波彦氏と共同で実施したものである。また、現地調査では、建築研究開発コンソーシアムを通して、穂山靖司氏（鹿島建設技術研究所 上席研究員）、山野辺宏治氏（清水建設技術研究所生産技術センター 主任研究員）、宮内靖昌氏（竹中工務店技術研究所建設技術研究部 RC 構造グループ 主任研究員）、杉本訓祥氏（大林組技術研究所構造技術研究部 副主査）の協力を得た。関係各位に厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) 中国建築科学研究院主編：2008年汶川地震建築震害図片集、2008年
- 2) 国土交通省国土技術政策総合研究所：「2008年中国四川大地震における建築物被害と復興状況に関する調査報告について」、<http://www.nilim.go.jp/lab/bcg/kisya/journal/20081112.pdf>、2008年11月14日