

木造住宅の震災被害シミュレーションと耐震性の向上に関する研究 —兵庫県南部地震被災地の詳細調査を通して—

藤原 悌三

キーワード：1) 兵庫県南部地震, 2) 木造住宅, 3) 被害調査, 4) 微動計測, 5) 静的載荷実験, 6) 被害原因, 7) 防災対策

1. はじめに

本研究の目的は、構法、建設年代の異なる木造建物の被害状況を詳細に調査するとともに、振動計測、倒壊実験によって実在木造建物の動特性を把握し、耐震補強・耐震設計の基礎資料を得ることを目的としているが、研究の背景は以下の諸点にある。

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震による阪神・淡路大震災では、都市直下型という被害集約の最も大きい形で市街地を襲った。この震災では、阪神および淡路地域における建物の被害は甚大であり、全壊および半壊の建物は20万棟を超えている。なにより人的被害は戦後最悪となり、死者5,502名、不明2名となった(1995年5月8日消防庁調べ)。その後の震災関連の死者789名を含み、死者6,308名となっている。特に、表1-1に見られるように、死者の約88%が家屋の倒壊によるものであった^{文1)}。

建物は、鉄骨造やコンクリート系の構造物においても大きな被害を受けたが、特に木造建物の被害は甚大であり、住家被害と人的被害は密接な関係がある。激甚地域の市・町(神戸市は区)単位での死者数/住家全壊棟数の比率を調べると、東灘区11.6%、芦屋市10.2%と比率の高い地域が認められるが、全域での比率は5.5%であった。

このように阪神・淡路大震災で多くの死傷者が出た最大の原因は、住宅など建物の耐震対策が不十分であったことである。特に、老朽密集住宅に被害が集中しており、維持管理や耐震補強の不備が挙げられる。関西地方、特に神戸周辺では、南海地震(1946年)以後、大地震の経験が無く、行政や住民に油断があったことも指摘される。しかし、兵庫県南部地震のような都市直下型地震による大災害の危険性は、我が国の多くの都市が同様に有する

ことであり、阪神・淡路大震災から得られる教訓を活かして、災害に強いまちづくりに取り組むべきであろう。とりわけ、都市住民の安全性に密接な木造建物について、被害原因を究明し、耐震性能の向上を図る耐震設計法や補強法を確立するなどの耐震対策は重要かつ緊急の課題と言える。

本研究では、被災都市域、特に芦屋市における木造住宅の被害状況について分析を行い、被害要因について検討した。さらに、木造住宅の耐震性を調べるために、既存建物の微動観測や静的水平力載荷実験を行った。これらの研究成果を報告するとともに、都市域の地震防災の観点からも言及する。

2. 都市域の建物被災状況と分析

建物の地震災害のより詳細な分析を行うため、震度Ⅶの激甚地域に含まれる神戸市、宝塚市、西宮市、芦屋市における被害調査に加えて各市の協力を得て、被災統計の分析を行ったが^{文2~10, 文12~14)}、ここでは、神戸市および芦屋市の結果について報告する。

2.1 神戸市の被害状況

神戸市の建物被害について、表2-1は各区の住宅の建設年代ごとの分布と世帯数から算定した全壊率、死亡率などを示している。ここに、世帯数・建設年代別住宅棟数は神戸市の統計書より引用した数である。住宅の全壊棟数は長田区、灘区、東灘区の順に多いが、1960年以前に建てられた建物の比率は、長田区38%、兵庫区32%、灘区29%であり、中央区は商業地域、東灘区は共同住宅が多い。北区、西区、垂水区、須磨区は最近開発された地域を含んでいるため比較的近年建設された建物が多い。全壊棟数と半壊棟数の1/2の和を住宅棟数で除して算出した全壊率は長田区、灘区、兵庫区の順に大きく、須磨区は14%と北区、西区、垂水区について小さいが、須磨区は最近開発された北部の新区と長田区の西に位置する旧区で構成されており、旧区の被害は長田区に匹敵するとの指摘がある。神戸市の被害データベースを入手していないため、詳細な検討は今後の調査によるが、長田区の住宅の建設年代が古いのは、戦災による火

表1-1 阪神・淡路大震災での死亡者の死因

| 死亡形態 | 人数 | 比率% |
|---------------------|-------|-------|
| 家屋・家具類の倒壊によると思われる | 4,831 | 87.8 |
| 焼死体(火傷死体)およびその疑いのある | 550 | 10.0 |
| その他 | 121 | 2.2 |
| 総数 | 5,502 | 100.0 |

(1995年4月24日警察庁調べ)

災も少なかったとの話もあり、都市の防災を考える上で建物の古さと被害の関係は参考になる。

2.2 芦屋市の被害状況

芦屋市は神戸市東灘区の東に隣接する都市で、芦屋市の最終報告による被害統計は表2-2に示すように、全壊率は長田区、灘区に次いで高い。芦屋市から提供された資料により、建物の建設年代別損壊率を以下に示すが、芦屋市の被害レベルは全壊、半壊、一部損壊、無被害に大別されている。

表2-3には芦屋市における木造建物の構造種別ごとの建設年代別被害レベルを百分比で示している。在来構法の重量屋根の木造建物では1961年以前の建物の60%以上

が全壊し、1970年代では30%、1980年代以降では10%以下となっている。建設年代を問わず、85%以上の建物が一部損壊以上の被害を受けている。軽量屋根の木造では全壊の比率は重量屋根の2/3程度、木造プレハブでは5%以下となり、無被害の建物も30%程度になる。ただし、プレハブの建物の大半は1970年代以降に建てられた比較的新しい建物である。

芦屋市では湾域が埋め立て地となっており、広い地域で液状化現象が見られた。その地域に建つ木造建物の被害を見ると、全壊、または、大破した建物は他の地域に比べると比較的少なく、液状化により建物の傾斜は見られるものの、地盤の加速度が小さくなったためにかえって被害を減少させたとも推定できる。

表2-1 神戸市各区の世帯数、建物の建設年代、全壊率、死者数

| 区 | 東灘 | 灘 | 中央 | 兵庫 | 北 | 長田 | 須磨 | 垂水 | 西 |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| 世帯数 | 71,303 | 51,910 | 50,022 | 51,424 | 59,857 | 52,091 | 61,373 | 79,403 | 42,417 |
| 住宅総数 | 66,430 | 49,110 | 45,810 | 48,830 | 54,740 | 50,790 | 57,760 | 73,680 | 35,310 |
| 建築時期別比率 | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) | (%) |
| 戦前-1945年 | 5.7 | 10.8 | 2.7 | 10.9 | 3.1 | 19.2 | 5.7 | 2.2 | 3.3 |
| 1946-1960 | 12.9 | 18.3 | 18.2 | 21.2 | 2.2 | 18.8 | 8.7 | 6.3 | 4.1 |
| 1961-1970 | 18.6 | 24.7 | 21.5 | 22.7 | 27.8 | 24.8 | 15.3 | 30.8 | 8.0 |
| 1971-1980 | 33.9 | 20.7 | 22.4 | 25.6 | 49.1 | 21.0 | 42.1 | 40.2 | 42.4 |
| 1981- | 22.1 | 21.7 | 28.4 | 16.1 | 17.2 | 13.5 | 27.9 | 19.3 | 41.6 |
| 全壊棟数 | 11,171 | 11,693 | 4,947 | 8,374 | - | 12,515 | 6,042 | 90 | - |
| 半壊棟数 | 3,098 | 3,559 | 3,420 | 4,422 | - | 4,994 | 4,093 | 5,520 | - |
| 全壊率(%) | 19.1 | 27.4 | 14.5 | 21.7 | - | 29.6 | 14.0 | 3.9 | - |
| 全焼棟数 | 338 | 495 | 72 | 1,150 | - | 3,930 | 1,150 | 2 | - |
| 消滅率(%) | 19.7 | 28.4 | 14.6 | 24.0 | - | 37.3 | 16.0 | 3.9 | - |

注1) 神戸市統計書

注2) 消滅率は全壊棟数と半壊棟数の1/2に全焼棟数を加えて世帯数で除した比率

表2-2 芦屋市の被害統計

| | | | | | | | |
|-----|--------|------|--------|------|---------|------|-------|
| 死者 | 436人 | 全壊建物 | 4,711棟 | 非難者数 | 20,970人 | 道路被害 | 280路線 |
| 重傷者 | 390人 | 半壊建物 | 4,045棟 | 非難所数 | 54箇所 | | |
| 軽傷者 | 2,785人 | 一部損壊 | 4,618棟 | 火災発生 | 13件 | | |

表2-3 (a) 木造在来構法(重量屋根)の建設年代別被害

| 建設年代 | 棟数 | 被害程度 (%) | | | | |
|-----------|------|----------|------|------|------|-----|
| | | 全壊 | 半壊 | 一部壊 | 無被害 | その他 |
| ~1945年 | 2155 | 72.6 | 20.7 | 4.9 | 1.6 | 0.1 |
| 1946-1961 | 1848 | 60.8 | 26.5 | 10.2 | 2.2 | 0.3 |
| 1962-1971 | 1698 | 46.8 | 34.9 | 15.6 | 2.7 | 0 |
| 1972-1981 | 1665 | 31.2 | 38.1 | 26.0 | 4.7 | 0.1 |
| 1982-1991 | 699 | 9.4 | 45.1 | 38.6 | 6.9 | 0 |
| 1992-1995 | 47 | 6.4 | 21.3 | 57.5 | 12.8 | 2.1 |

表2-3 (b) 木造在来構法(軽量屋根)の建設年代別被害

| 建設年代 | 棟数 | 被害程度 (%) | | | | |
|-----------|-----|----------|------|------|------|-----|
| | | 全壊 | 半壊 | 一部壊 | 無被害 | その他 |
| ~1945年 | 68 | 52.9 | 20.6 | 22.1 | 4.4 | 0 |
| 1946-1961 | 352 | 42.1 | 27.8 | 19.3 | 9.4 | 1.4 |
| 1962-1971 | 618 | 25.9 | 29.1 | 33.3 | 10.5 | 1.1 |
| 1972-1981 | 521 | 13.2 | 25.0 | 46.5 | 14.8 | 0.6 |
| 1982-1991 | 623 | 4.3 | 25.2 | 49.4 | 20.7 | 0.3 |
| 1992-1995 | 200 | 5.0 | 9.0 | 58.5 | 27.0 | 0.5 |

表2-3 (c) 木造プレハブ(重量屋根)の建設年代別被害

| 建設年代 | 棟数 | 被害程度 (%) | | | | |
|-----------|----|----------|------|------|------|-----|
| | | 全壊 | 半壊 | 一部壊 | 無被害 | その他 |
| ~1945年 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1946-1961 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1962-1971 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1972-1981 | 18 | 0 | 16.6 | 44.4 | 38.9 | 0 |
| 1982-1991 | 39 | 2.6 | 41.3 | 43.6 | 12.8 | 0 |
| 1992-1995 | 4 | 0 | 0 | 50.0 | 50.0 | 0 |

表2-3 (d) 木造プレハブ(軽量屋根)の建設年代別被害

| 建設年代 | 棟数 | 被害程度 (%) | | | | |
|-----------|-----|----------|------|------|------|-----|
| | | 全壊 | 半壊 | 一部壊 | 無被害 | その他 |
| ~1945年 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1946-1961 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 1962-1971 | 4 | 0 | 50.0 | 50.0 | 0 | 0 |
| 1972-1981 | 119 | 5.0 | 5.9 | 51.3 | 36.1 | 1.7 |
| 1982-1991 | 574 | 0.7 | 38.9 | 38.7 | 21.8 | 0 |
| 1992-1995 | 243 | 3.2 | 4.8 | 49.1 | 41.9 | 0.8 |

3. 木造住宅の被害要因

3.1 建物種別と被害

被害が大きかった木造建物について主な建物用途別に見た被害割合を図3-1に示す。長屋建や店舗併用住宅の被害が特に激しかったことが判る。長屋建は、1戸当たりの間口が狭く、1階部分の壁が一方に偏るなど壁配置が不適切なため、1階の長手（桁行）方向が耐力不足になり傾斜あるいは倒壊した。戸建住宅でも間口が狭い建物も同様で、1方向のみに壁配置が偏るため大きな被害を受けた。また、店舗併用住宅では、1階道路側に大きな開口部を設け、店内には壁が十分に配置されないため、1階部分が大変形を起し倒壊しているものが多数見られた。同様に、1階部分を駐車場にしている木造住宅も1階部分が崩壊した。

このように平面的、立面的に壁配置が偏るなど構造計画上の問題を有する建物は大きな被害を受けており、今後、壁量を満たすのみならずバランスの良い壁配置にすることが大切である。

3.2 構法と被害との関連

芦屋市全域での被害調査では、木造建物の構法による区分がないため、西宮北口駅北東地域および芦屋市西部地域の両地域における外観被害調査およびアンケート調査から建物の構法別被害を調べた²⁴⁻⁷⁾。この調査では、木造軸組構法、木造枠組構法およびプレハブの住宅が主な対象としており、その他に鉄筋コンクリート造および鉄骨造建物が含まれる。図3-2に各構法別の被害率を示す。

木造軸組構法を除いた他の構法では、概ね全壊、半壊

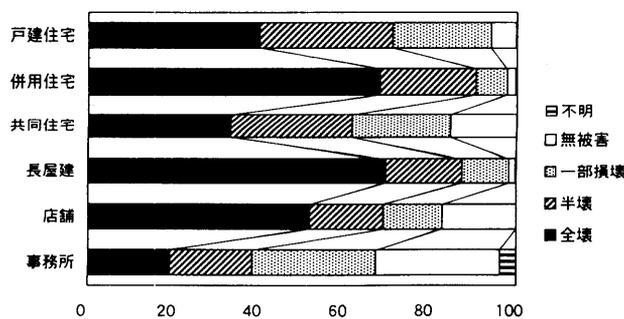


図3-1 木造建物の用途別被害（芦屋市全域）

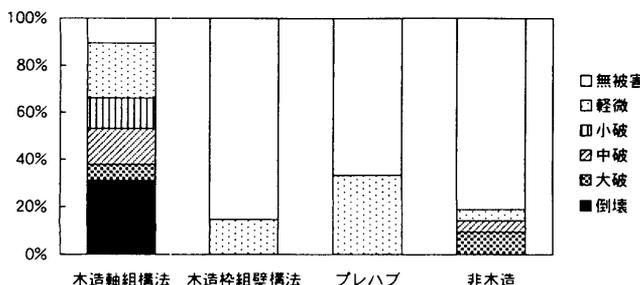


図3-2 木造建物の構法用別被害

の被害はなく、一部損壊か無被害に留まっている。木造軸組構法の場合には無被害が少なく、全壊から一部損壊まで一様に被害を受けており、全壊率は、両地域合わせて45%である。このことは、木造軸組構法の建物は、建築年代が古いものから新しいものまで幅広く存在しているが、木造枠組壁工法およびプレハブなどの建物は比較的新しいものが多いことも理由として挙げられる。

3.3 建設年代と被害との関連

木造建物の建築時期と被害レベルとの関係を図3-3に示す。建設年代を明治・大正（1925年以前）、昭和初期～25年（1926年～1950年）と以後は10年ごとに区分した。図3-3において、建築年の古いものほど全壊、半壊の大きな被害を受けた割合が大きくなる傾向を示している。一方、1980年に建築基準法施行令が改正された後の建物は、全壊の比率は少なく一部損壊程度の被害に留まる傾向がある。

木造建物に関する構造規定は、1950年に建築基準法とその施行令が制定され、筋かいの使用や壁量の規定などが盛り込まれた。その後、1959年、1971年および1980年の建築基準法施行令の改定において、壁量規定の強化や基礎の強化など改良を重ねて現在に至っている。

このように木造建物の耐震性能は、建物の蟻害、老朽化や施工技術、維持管理のばらつきに加えて、基準法の規定により、相当大きく変動していると考えられる。

3.4 構造的被害要因

(1) 屋根重量

図3-4に木造建物の屋根仕上げと被害との関係を示す。

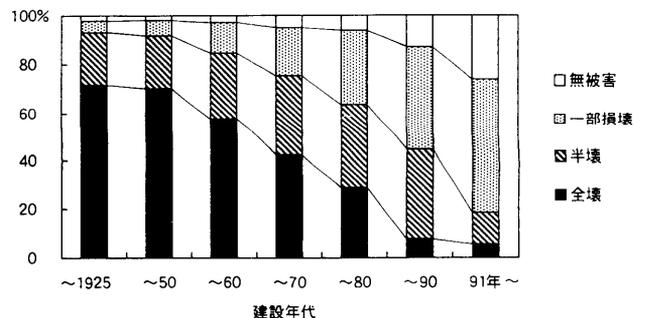


図3-3 木造建物の建設年代別被害（芦屋市全域）

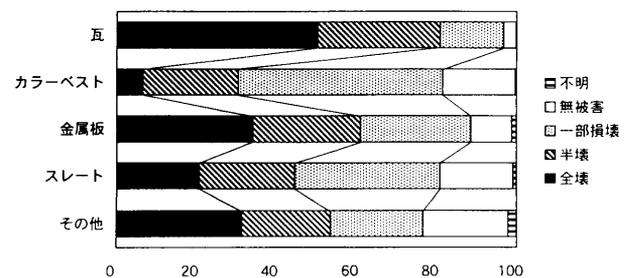


図3-4 木造建物の屋根仕上げと被害（芦屋市全域）

瓦屋根の場合、大きな被害を受け、無被害の建物は少ない。特に、建設年代が古く、土葺瓦屋根を持つ軸組構法の木造建物は、建物全体が倒壊するなど大きな被害を受けた。他の屋根仕上げの建物は、建設年代が新しいものも多く、被害割合は少なくなる。西日本では、台風が多いため重しとして瓦葺屋根が多く用いられており、さらに、夏の暑さのため、断熱効果を持つ泥土を厚く敷き詰め、その上に瓦を貼り付けていくため、土と瓦でかなりの重量となる。屋根が重いことは、それだけ地震力を大きく受けるため、屋根重量に見合った柱や壁の耐力が必要となる。このような意味においても、木造建築においてもなんらかの構造計算に基づく耐震設計が必要になる。

(2) 床面積

木造建物の延床面積と被害との関係を図3-5に示す。建築面積の狭い建物で大きな被害の割合が大きくなるが、一方、広い建物でも、特に建設年代の古い建物が大きな被害を受けた。建築面積が狭い場合には、間口が狭くなりがちであり、間口の狭小住宅では、桁行方向には壁が配置されるが、梁間方向には壁を十分に配置することができない、特に、道路に面した1階部分には出入り口と窓が設けられるため、壁を配置する余裕がないため、1階部分が梁間方向に傾斜、倒壊した。

(3) 構造材の腐朽

芦屋市西部地域での外観被害調査から、外壁がラスモ

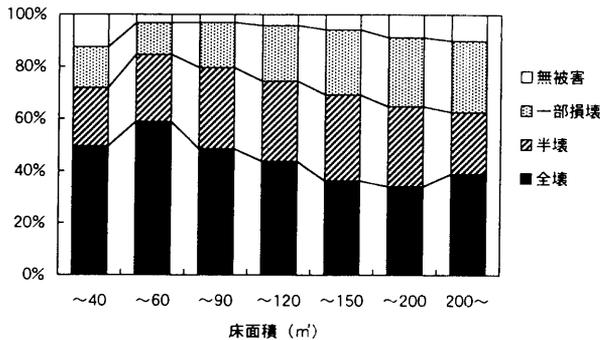


図3-5 木造建物の延床面積と被害 (芦屋市全域)

ルタルの場合、柱、梁および土台が腐朽しているもの、あるいは蟻害を受けているものが数多く見られた。倒壊もしくは大破している建物では柱がほとんど腐朽して無くなっていたり、土台の腐朽が著しいものも見られた。特に、外壁、柱、梁など主要構造材が腐朽している場合には、何らかの被害を受けている。構造材の腐朽、蟻害は、建物の耐力を著しく低下させる要因の1つであり、腐朽や蟻害の防止、補修など維持管理が重要である。

以上、木造住宅を中心に被害状況や被害要因を述べてきたが、今後、木造建物の耐震性を向上させるためには、木造建物の耐力や変形性能、さらに動力学特性など不明な点も多い。現行の建築基準法において、木造建物、特に在来の軸組構法による2階以下の建物に対して、耐震設計は壁率規定などによっているのみであり、構造力学的な観点からは、あいまいにされている点が多い。

4. 木造住宅の耐震実験

木造建物がどの程度の耐力や変形性能を有しているのかを調べるために、1995年6月から12月にかけて、取り壊し予定の建物4棟と実験用軸組を用いた振動実験および水平力載荷実験を実施した^{*)1)}。ここでは、実験の概要と結果を述べるとともに実験結果から木造建物の耐震性について検討する。

4.1 実験の概要

実験対象建物の概要

表4-1に示した解体予定の既存の木造建物4棟および実験用木造軸組1棟について実験を行った。昭和初期に建てられた2棟(SI邸・TU邸)は耐力壁に筋かいが入っていないが、昭和30年代後半あるいは昭和40年に建てられたもの(TA邸・SU邸)は、外壁がラスモルタルであり、耐力壁に筋かいが入っている。H棟は実験用に建設した軸組のみの2間×2間の2階建である。5棟の平面図と建物外観写真を図4-1~図4-5に示す。その

表4-1 載荷実験を行った木造建物

| 建物名称 | SI邸 | TU邸 | TA邸 | SU邸 | H棟 |
|-------|---|---|--|---|--|
| 実験日 | 1995年6月20日 | 1995年6月21日 | 1995年10月2,13日 | 1995年12月6,7日 | 1995年10月6日 |
| 建設場所 | 京都市左京区 | 京都市左京区 | 京都市山科区 | 西宮市六軒町 | 京都市南区 |
| 建設年代 | 昭和初め 1930年代 | 昭和初め 1930年代 | 昭和30年代後半 1960年代 | 昭和40年 1965年 | 平成7年(新築) 1995年 |
| 主体構造 | 2階建在来軸組 土塗壁(貫3段, 竹小舞) | 2階建在来軸組 土塗壁(貫3段, 竹小舞) | 2階建在来軸組 土塗壁(筋かい, 竹小舞) | 2階建在来軸組 塗壁(筋かい, 竹小舞) | 2階建在来軸組 (二つ割筋かい, もしくは貫3段) |
| 屋根仕上げ | 土葺瓦 | 土葺瓦 | 土葺瓦 | 土葺瓦 | なし |
| 外壁仕上げ | 土塗壁(2階半分 まで縦羽目板張) | 土塗壁(2階半分 まで縦羽目板張) | ラスモルタル | ラスモルタル | なし |
| 床面積 | 1階 (m²) 70.28 2階 (m²) 40.61 計 (m²) 110.89 | 1階 (m²) 94.57 2階 (m²) 52.86 計 (m²) 147.43 | 1階 (m²) 148.77 2階 (m²) 43.51 計 (m²) 192.28 | 1階 (m²) 96.96 2階 (m²) 32.83 計 (m²) 129.79 | 1階 (m²) 12.96 2階 (m²) 12.96 計 (m²) 25.92 |
| 載荷方法 | 1方向繰り返し | 1方向繰り返し | 1方向繰り返し | 1方向繰り返し | 交番繰り返し |

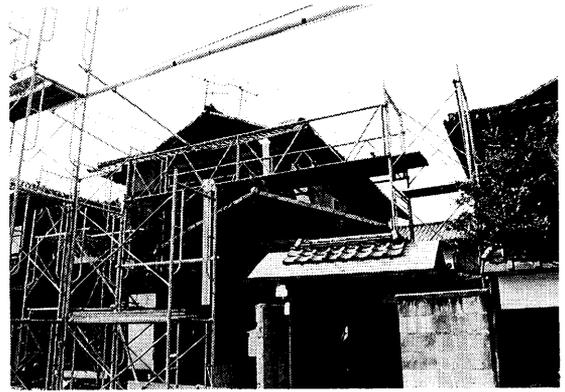
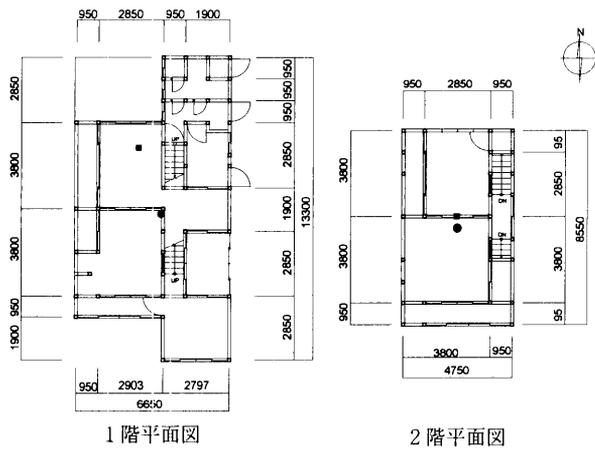


図4-1 S I邸平面図と外観

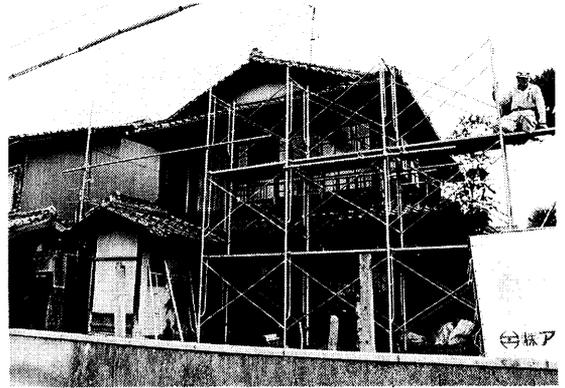
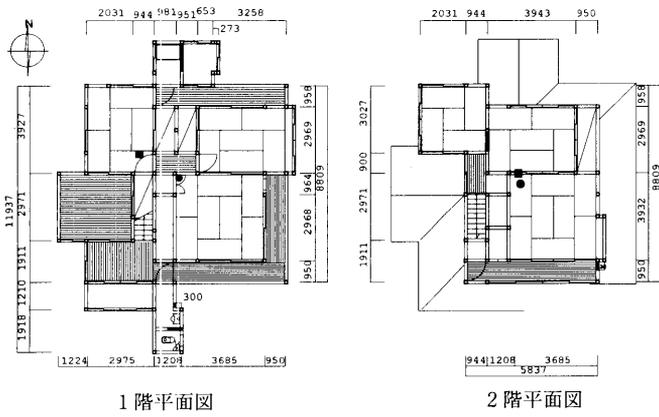


図4-2 T U邸平面図と外観

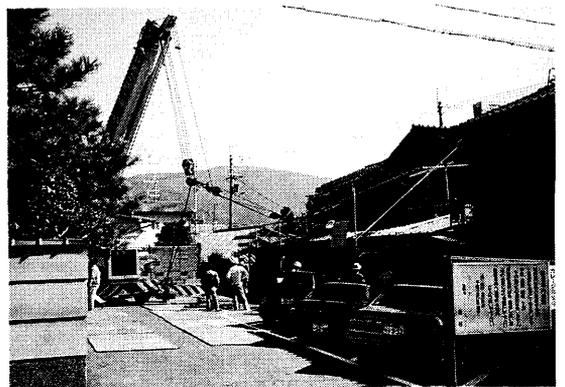
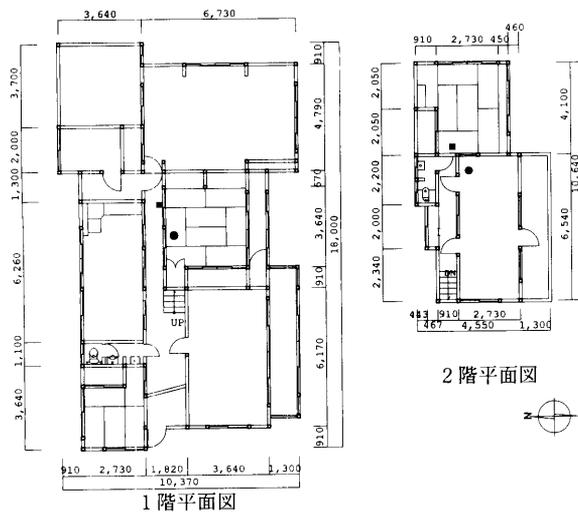


図4-3 T A邸平面図と外観

うち、4棟は京都市内の建物であり、無被害であるが、図4-4に示すように西宮市のSU邸のみ基礎や犬走りに被害を受けている。

水平力載荷実験・振動計測

小屋梁位置で隅柱部分を引っ張って静的な載荷を行い、載荷履歴に対する耐力と変形の関係を調べ、最大耐力を超えて破壊に至るまでの挙動を調べた。

載荷には容量約25tonfのラフター型トラッククレーンを用いて、ワイヤーで2階天井部の柱-梁接合部分を引っ張り、1方向の繰り返し載荷を層間変形角1/30~1/12rad程度まで行った。H棟の実験では容量7tonfのトラッククレーン2台を用いて交互に引っ張り繰り返し載荷した後、荷重計および変位計を除去、倒壊するまで載荷した。2階に作用させた水平引張力は、容量20tonf（感度 $100 \times 10^{-6}/\text{mm}$ ）の荷重計を1台用いて計測した。基礎、1層、2層の各変位は容量2500mmの巻き込み型変位計（感度 $2.0 \times 10^{-6}/\text{mm}$ ）を6台用いて計測した。また、変位の実験時モニター用に、測定範囲200~1300mmの超音波式変位センサー（表示分解能1mm、表示精度 $\pm 1\%$ F.S.）を2台用いた。S I、T U邸を例に、載荷実験の観測システムとクレーンによる加力状況を図4-6に示す。

在来構法木造建物の基本的な振動特性を明らかにするために実験前に自由振動実験を、また実験で生じる建物損傷によって振動特性がどのように推移するかを調べるために常時微動測定を行った。購入した地震計による測定状況と微動計測器を図4-7に示す。

4.2 実験結果の概要

実験で得られた結果について、水平力載荷の最大荷重と変形角、自由振動および微動計測から得られた振動特性を表4-2に示す。また、実験成果をまとめると次のようになる。

(1) 解体予定の在来構法の既存木造住宅4棟ならびに軸組架構1棟を用いて常時微動計測、自由振動実験、ならびに水平力載荷実験を行い、木造建物の固有振動数、減衰定数、復元力特性を調べると共に、建物の剛性ならび

表4-2 実験結果の一覧

| 建物名称 | S I邸 | T U邸 | T A邸 | S U邸 | H棟 |
|-------------------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 最大荷重 (tonf) | 8.1 | 10.7 | 10.6 | 14.2 | 1.7 |
| 最大荷重時の層間変形角 (rad) | | | | | |
| 1 階 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 |
| 2 階 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.0 | 0.1 |
| 重量 (tonf) | | | | | |
| 1 階 | 8.1 | 10.0 | 10.0 | 7.6 | |
| 2 階 | 11.0 | 13.3 | 30.3 | 18.6 | |
| 総重量 | 19.1 | 23.3 | 40.3 | 26.2 | |
| ベースシヤー係数 | 0.4 | 0.5 | 0.3 | 0.5 | |
| 載荷方向の卓越振動数 (Hz) | 桁行方向 | 桁行方向 | 梁間方向 | 桁行方向 | 桁行方向 |
| 載荷実験前 | 3.9 | 3.0 | 4.0 | 3.5 | 2.6 |
| 載荷実験後 | 3.1 | | 3.3 | 3.3 | 2.2 |
| 低下率 | 20.5 | | 17.5 | 5.7 | 15.4 |
| 減衰定数 (%) | 5.4~6.0 | 5.9~8.5 | 4.6~6.2 | 7.5~8.0 | 3.0~6.5 |

に耐力を評価する算定法について考察した。

(2) 常時微動計測により得られた木造家屋の実験前の1次固有振動数は、桁行方向が3.0Hz~4.7Hz、梁間方向が2.4Hz~4.0Hzであった。桁行方向が梁間方向よりも壁量が多く、1次固有振動数にも影響していることが認められる。載荷実験後、加力方向の1次固有振動数は、載荷実験前の振動数に対して6%から18%の低下が見られた。

(3) 自由振動実験による1次固有振動数は、桁行方向載荷の場合が2.2Hz~3.9Hz、梁間方向載荷の場合が3.7Hzで、減衰定数は4.6~8.5%の範囲であった。

(4) 最大耐力時の層間変形角は1/60rad~1/20radの範囲にあり、平均1/30radであった。

(5) ベースシヤー係数は、昭和初期に建てられた2家屋で0.43~0.46、昭和40年に建てられた家屋で0.54と、桁行方向に載荷したものは、いずれも比較的高い値を示している。それに比べると梁間方向に載荷した家屋は0.26と低く、壁量の少ないことが影響していると考えられる。

4.3 木造住宅の地震応答解析

被災地の既存木造住宅について、建物用途、規模、建設年代の異なる多くの建物を対象に常時微動を観測し、建物の振動特性を評価するとともに、上記の耐震実験の結果を併せて、木造住宅の動力学特性を見だし、力学

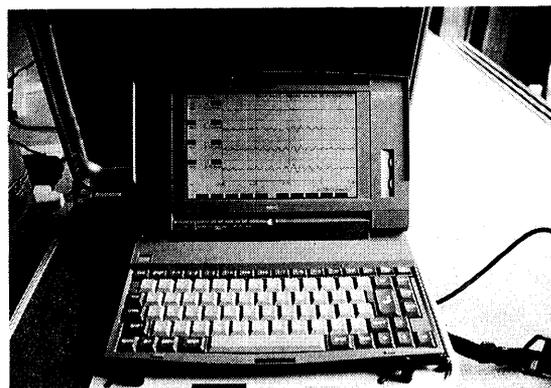
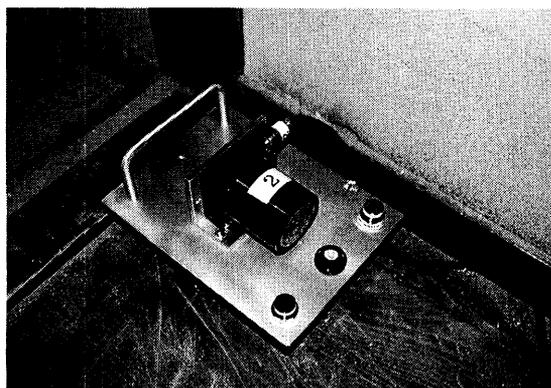


図4-7 計測中の地震計と微動計測器

モデルを作成して地震応答解析を実施した。これより、建物の耐震性、特に、間口が狭い建物や梁間方向と桁行き方向で大きく振動特性が異なる建物などは耐震上の危険性を有することを明らかにした。

以上得られた実験結果および応答解析結果を総合的に検討して、木造住宅の耐震性の向上を図るため、今後、既存建物の耐震補強や新しく建設される建物の耐震対策を検討する。

5. 地震防災対策

兵庫県南部地震は建物の震動的な被害が甚大であったが、液状化の発生した埋め立て地域での中低層建物の被害は比較的軽微であった。神戸市開発局のポートアイランドの記録はGL-88mの記録より小さく、表層地盤の加速度が小さいことが低層で固有周期の短い建物の被害を軽減させたのではないかと考えられる。一方、大阪市では建物の被害地域と液状化地域とは調和的である。神戸市の湾域は最近開発されたため、建物が液状化を考慮して設計されていたかどうか、大阪市の建物の建設年代はどうだったかなどの今後の調査が待たれる。釧路市内の建物の基礎が地盤の凍結を考慮した設計となっていることが液状化地域や斜面崩壊の恐れのある地域に参考になるのではないかと。

間口の狭い建物の被害が多かったが、個々の建物の平面形状を調査し、壁量の影響か、捩れの影響か、その両方か、を見極めた上で、個々の建物の耐震化が不可能な場合には街区としての耐震化を考えていく必要がある。密集地の耐震化は地震災害を軽減するため避けられない課題である。

既存不適格建物の耐震補強が論議されているが、現行基準の下限値と保有耐力との関係、すなわち、被害が軽微に済んだ建物の安全性に対する余裕度があったかどうかを明らかにすることが今後の基準法改定の必要性を決定すると考える。既存不適格建物をいかに補強するかは、社会的コンセンサスを得ながら速やかに行う必要があるが、機能性が重視される公共建物や不特定多数が集まる民間建物などは機能性と安全性を備えた性能を持つ設計が要求されよう。

地震後ほとんどの自治体が防災対策の見直しに取り組んでいる。地震被害を推定するには、被害事実の正確な把握と分析が不可欠であり、地震情報、建物情報、地盤情報、交通情報、ライフライン情報などを活用した地震被害推定を行い、災害シナリオに沿った震後対策を立てなければならない。さらに、現状を肯定した被害推定から被害を軽減するための方策を導くための研究が求められる。

最近、活動する可能性のある断層の位置を公にする傾向にあり、大都市では地盤図も作成されている。構造物

の地震時挙動は断層位置、地層構造、表層地盤の動特性などに影響されるため、これらの情報の公開は構造物の耐震性向上のためにも有用と考えられる。特に、造成地の旧地盤の状況と盛り土・切土の関係や建設時の設計図書の内容の保存・伝達は既存建物の耐震補強に欠かすことのできない資料の伝達である。

地震時の電話の輻輳は緊急の情報伝達が停止するだけでなく、市民の生活にも支障をきたす。インターネットによる情報交換は今後の情報システムの活用法としても、日常的の駆使できる体制をとることが望まれる。地盤の強震動観測の必要性が指摘されているが、地盤と構造物との相互作用効果と構造物の地震時挙動を把握するためには応答観測を目的とした観測体制の確立が不可欠である。これらの地震観測をネットワーク化してその情報を即時に緊急対策に利用できるシステムを構築する必要がある。米国と同様、自治体の積極的な対応が望まれる。

6. 結

本研究の結果を要約すると以下のものである。

- 1) 神戸市各区の全壊率は長田区、灘区が大きい。両区の建設年代の古い木造建物のストックは他の区に比して多いことが被害の一因となっている。
- 2) 芦屋市の木造建物の詳細調査結果から、木造在来構法（重量屋根）の被害が多く、中でも建設年代の古い建物に被害が集中していること、同じ構法でも建設年代の新しい建物、木造プレハブは被害が軽微なこと、瓦屋根の被害が多いこと、長屋・併用建物の被害が多いことなどを明らかにした。
- 3) 既存木造建物の破壊実験から、最大耐力時の層間変形角は $1/60\text{rad}$ ～ $1/20\text{rad}$ であり、ベースシヤール係数に換算すると桁行方向は $0.43\sim 0.54$ と高いが、梁間方向は壁量が少なく 0.26 と低い値を示し、狭小間口の建物の危険性を指摘した。
- 4) 購入した微動計測器を用いて測定した木造建物の固有周期は桁行方向が $3.0\text{Hz}\sim 4.7\text{Hz}$ 、梁間方向が $2.4\text{Hz}\sim 4.0\text{Hz}$ であり、載荷実験後は $6\%\sim 18\%$ 低下するため塑性領域を含む復元力特性の把握が重要であることを指摘した。
- 5) 以上の被害調査と実験結果から、木造建物の耐震安全性には、動特性の把握、終局耐力と壁倍率の関係、壁配置の適正さなどが重要であること、既存建物の診断と耐震補強、施工精度の向上が不可欠であること、都市防災の観点からの問題点と解決策の一端などを示した。

謝辞

本研究は住宅総合研究財団の助成金によって行われた。財団関係者ならびに資料提供、解析にご協力いただいた

関係者各位、さらに木造建物の耐震実験などでは、建築主・工務店・大工・設計者など多くの方々に協力いただいた。ここに深甚の謝意を表す次第である。

<参考文献>

- 1) 平成8年度防災白書, 国土庁編
- 2) 1995年兵庫県南部地震災害調査速報, 日本建築学会, 1995. 3
- 3) 鈴木祥之:兵庫県南部地震による建物被害, 京都大学防災研究所年報, 第38号A, 1995. 4
- 4) 橋本清勇・中治弘行・東樋口護・鈴木祥之:兵庫県南部地震による木造建物の被害, その1 調査地域と被害状況, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.225~228, 1995. 6
- 5) 中治弘行・橋本清勇・東樋口護・鈴木祥之:兵庫県南部地震による木造建物の被害, その2 建物概要と被害状況, 日本建築学会近畿支部研究報告集, pp.229~232, 1995. 6
- 6) 鈴木祥之・東樋口護・橋本清勇・北山宏貴・標 智仁・中治弘行:1995年兵庫県南部地震による木造建物の被害, その1 建物外観調査とアンケート調査, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造Ⅲ, pp. 5~6, 1995. 8
- 7) 鈴木祥之・東樋口護・橋本清勇・標 智仁・中治弘行・北山宏貴:1995年兵庫県南部地震による木造建物の被害, その2 被害分析, 日本建築学会大会学術講演梗概集構造Ⅲ, pp. 7~8, 1995. 8
- 8) 鈴木祥之・藤原悌三:神戸市中央区における木造建物の被害, 1995年兵庫県南部地震-木造建物の被害-, 日本建築学会近畿支部, pp.41~48, 1995. 9
- 9) 鈴木祥之・標 智仁・中治弘行・北山宏貴・東樋口 護・橋本清勇:芦屋市・西宮市における木造建物の被害, 1995年兵庫県南部地震-木造建物の被害-, 日本建築学会近畿支部, pp. 73~84, 1995. 9
- 10) 北原昭男・藤原悌三・鈴木祥之:1995年兵庫県南部地震による宝塚・芦屋における建物の被害分布特性, 京都大学防災研究所年報, 1996. 4
- 11) 岩井 哲・中治宏行・鈴木祥之・北原昭男:在来工法既存木造住宅の静的水平力載荷実験による耐震性能評価, 京都大学防災研究所年報, 1996. 4
- 12) 平成6年文部省科学研究費(総合研究A 代表者・藤原悌三)研究成果報告書, 平成7年兵庫県南部地震とその被害に関する調査研究, 1995. 3
- 13) 平成7年文部省科学研究費(総合研究A 代表者・藤原悌三)研究成果報告書, 平成7年兵庫県南部地震の被害調査に基づいた実証的分析による被害の検証, 1996. 3
- 14) 阪神・淡路大震災-防災研究への取り組み-, 京都大学防災研究所, 1996. 1

<研究組織>

| | | |
|----|-------|----------------|
| 主査 | 藤原 悌三 | 京都大学防災研究所教授 |
| 委員 | 鈴木 祥之 | 京都大学防災研究所助教授 |
| 〃 | 東樋口 護 | 京都大学工学部助教授 |
| 〃 | 橋本 清勇 | 京都大学工学部助手 |
| 〃 | 奥田 辰雄 | 木四郎建築設計室代表 |
| 〃 | 立石 一 | 株式会社立石構造設計代表 |
| 〃 | 出田 肇 | 地域環境計画研究所代表 |
| 〃 | 福井 晟 | 京都府建築工業協同組合理事長 |
| 〃 | 荒木 正宣 | 全京都建設協同組合理事長 |