木造住宅の簡易な耐震診断法に関する研究

STUDY ON SIMPLIFIED SEISMIC DIAGNOSIS OF WOODEN HOUSE

細尾 敦 — * 1 高市 圭 — * 2
中川大輔 — * 2 神田 亮 — * 3
八島信良 — * 4

Atsushi HOSOO — * 1 Kei TAKAICHI — * 2
Daisuke NAKAGAWA — * 2 Makoto KANDA — * 3
Nobuyoshi YASHIMA — * 4

キーワード：
木造住宅, 耐震診断, 耐震性能, 地域防災, Google マップ

Keywords:
Wooden house, Seismic diagnosis, Seismic performance, Regional disaster prevention, Google map

This paper proposes a simplified seismic diagnosis to rapidly gather a lot of data for the earthquake resistant performance of wooden houses and describes the verification of its accuracy and indicates some examples to gather data by means of this diagnosis. In this diagnosis, the data for wooden houses are gathered by visual obtainment of exterior. We can choose in two options for how to conduct visual obtainment of exterior. One option is to obtain data by direct visual on-the-spot investigation. The other is to obtain data from the site of street view in the Google. From the results, it is found that one of the important factors that accuracy goes down is error when some lengths on houses are evaluated by visual obtainment of exterior, and that a lot of data can be gotten by means of this diagnosis.

1. はじめに

1995年に発生した阪神・淡路大震災では6000人を超える多くの尊い命が失われた。そのほとんどは、木造住宅の倒壊による圧死、または火災による焼死であった。倒壊した木造住宅のほとんどは、新耐震設計法施行(1981年)以前に建てられた屋根が重く、壁量が不足している、いわゆる、既存不適格のものである。しかし、震災から15年経過した現在でもこれら既存不適格木造住宅は全国各地に約1000万戸¹⁾も存在しており、早急な対応が望まれる。

これらを教訓として、震災直後から既存木造住宅に対する耐震診断と補強の技術の開発²⁾が行われている。これは、地震防災の最も重要な人命の尊重という立場から当然であろう。個々の住宅の耐震性能を把握することは住宅の耐震性能を向上させ、その倒壊を防ぐというだけでなく地域防災の面からも有益である。例えば、既往の研究において震度と住宅の倒壊率を示した被害関数の推定³⁾、避難所の容量と避難者数の推定⁴⁾などにも個々の住宅の耐震性能に関する統計量が用いられている。しかし、そのような統計量は現在、極めて少なく、その原因を調べてみると住宅の耐震診断を短期間に多量に実施する手段がほとんどないという明確な理由に辿りつく。

以上を踏まえ、本論文は住宅の耐震性能に関する多くの情報を短期間に収集するための簡易な耐震診断法を提案し、その精度を検討する事を目的とする。また、その診断法を用いて4つの地区で住宅の耐震性能に関する情報収集を行った例を示す。提案する診断法は、一般診断法²⁾を改良した手法であり、短時間で多くの住宅を診断できるように工夫されている。

2. 簡易な耐震診断法の提案

本診断法の基本的考え方は、一般診断法による。今まで住宅の耐震診断があるにも関わらず、地域全体の住宅の耐震性能に関する統計量がほとんど収集されていないのは、既存の耐震診断法がその精度が高い反面1つの住宅を診断する労力と手間が掛かっていたためである。具体的には、図面の入手や内観の現地調査などを必要とする。ここで本診断法は診断の対象とする住宅の情報を外観目視のみにより収集し、労力や手間をできるだけ軽減するように工夫した。本診断法のフローを図1に示す。この方法の行程は目視による外観

図1 本診断法のフローチャート

¹⁾ 財地震工学研究所 (元 日本大学大学院生産工学研究科建築工学専攻) 修士 (工学)
(〒275-8575 千葉県習志野市泉町1-2-1)

²⁾ 日本大学大学院生産工学研究科建築工学専攻

³⁾ 日本大学生産工学部建築工学科 教授・博士 (工学)

⁴⁾ 日本大学理工学部海洋建築工学科 非常勤講師・工博

¹⁾ Jishin Kougaku Kenkyusyo, Inc., Ms. Eng.

²⁾ Graduate Student, Graduate School of Industrial Tech., Nihon Univ.

³⁾ Prof., Dept. of Architectural Engineering, College of Industrial Tech., Nihon Univ., Dr. Eng.

⁴⁾ Part-time Lecturer, Dept. of Oceanic Architectural Engineering, College of Science and Tech., Nihon Univ., Dr. Eng.

調査と上部構造評点 I_w の算定に大別できる。

2.1 外観目視による対象建物の調査

本診断法の調査では診断者が外観目視によって住宅の耐震診断に必要な情報を収集する。収集する情報は、建物長さ L_j や無開口外壁のトータル長さ ${}_eL_w^j$ 、屋根の種類、築年の情報である。ここで、添え字 j は x, y 方向、 w は壁、 e は外側を示す。外観目視調査の方法としては、現地に赴き直接目視により情報を得る方法(図 2)と、近年、普及しつつある Google マップより情報を得る方法(図 3)を考えている。なお、この行程は、本診断法の簡便性を大きく支配しているため、この他にもっと効率良く情報を得る手法があればその手法を用い診断法の改良が行える。

外観目視調査では、過去の地震被害から倒壊した木造住宅はそのほとんどが 1 階部分の倒壊であること⁵⁾が分かっているため、2 階建て以上の木造住宅の場合であっても 1 階部分を目視の対象とする。

2.2 上部構造評点の算定

上部構造評点 I_w は保有耐力 P_d と必要耐力 Q_r の比で表わされる。 P_d と Q_r は外観目視調査で得られた情報より算定する。以下に、その算定手順を示す。

Q_r は、地震時に作用する地震力と等価な値であり、床面積当たりの必要耐力 γ_r に 1 階の床面積 A_f を乗じて算出する。

$$Q_r = A_f \cdot \gamma_r \quad (1a)$$

ただし、

$$A_f = L_x \cdot L_y \quad (1b)$$

ここで、 γ_r は目視より得られた屋根の種類と階高から文献 1 の一般診断法を参考に算定する。

次に、 P_d は建物が有する耐力であり、壁の耐力 P_w と柱などのその他の部材の耐力 P_c の和に住宅の劣化度による低減係数 D を乗じて求める。以下にその算定式を示す。

$$P_d^j = (P_w^j + P_c^j) \cdot D \quad (2a)$$

ただし、

$$P_w^j = P_w^j + P_i^j \quad (2b)$$

$${}_eP_w^j = \bar{c} \cdot {}_eL_w^j \quad (2c)$$

$${}_iP_w^j = r_1 \cdot {}_eP_w^j \quad (2d)$$

$$P_c^j = r_2 \cdot Q_r \quad (2e)$$

$$j = x, y$$

ここで、 P は耐力、添え字 c は壁以外の柱などを示す。また、添え字 i は内側を示す。さらに、 $\bar{c}$ は外壁の単位長さあたりの耐力、 r_1 は外壁の総耐力と内壁の総耐力の比、 r_2 は Q_r に対して壁以外の柱などの部材が負担する耐力の割合を示す。過去の診断実績から r_1 は $r_1 = 1.0 \cong 0.53/0.47$ 、 r_2 は文献 1 より $r_2 = 0.25$ とした。また、 $\bar{c}$ は r_1 と同様に $\bar{c} = 2.94$ (kN/m) とした。 L_j 、 ${}_eL_w^j$ を Google マップのストリートビュー上から目視情報を得て算定する場合には、道路側からの 1 面の写真しか掲載されていないことが多く(図 3 中 a))、建物外観 4 面が必ずしも全て目視可能であるとは限らない。このような場合には、道路直交側長さを道路側面から判断できないことから道路直交側長さは屋根伏せ面が見える航空写真を利用した平面情報(図 3 中 b))より数量化する。また、 ${}_eL_w^j$ は j 方向 2 面の総量であるため道路側面だけの無開口外壁長さ ${}_eL_w^j$ から ${}_eL_w^j$ を下式によって予測する。

$${}_eL_w^j = (1 + r_3) \cdot {}_eL_w^j \quad (3)$$

ここで、 r_3 は道路面の壁長さに対する反対面の壁長さの割合、添

図 2 直接目視による外観目視調査

図 3 Google マップによる外観目視調査

え字 s は道路側を示す。今回、筆者らが行った過去の診断実績から r_3 は、 $r_3 = 1.48$ とした。また、 D は調査より得られた築年の情報で評価する。具体的には外壁のひび割れや腐朽などの傷み具合からおおよその築年を推測し、木造住宅の耐用年数の約半分である築年 10 年未満を 1.0、新耐震設計法施行以前の建物である築 30 年以上を 0.7、その間の築年 10 年以上 30 年未満を 0.85 とした。

以上より、算定した Q_r 、 P_d を基に、式(4a)、(4b)により I_w を算定する。

$$I_w = \min(I_w^x, I_w^y) \quad (4a)$$

ただし、

$$I_w^j = P_d^j / Q_r \quad (4b)$$

ここで、式(4a)において建物 x, y 方向の 1 方向でしか目視できなかった場合は、その方向をもって I_w とする。

3. 簡易な耐震診断法の精度の検討

3.1 精度の検討方法

本診断法の結果の精度を確保することは、これらの診断法を用いて地域防災計画を行う上で重要なことである。このため本章では、本診断法の精度を統計解析により検討する。

本診断法の算定手順をよく吟味すると、結果の精度が低下する要因は、行程を簡略化したことにより誤差が含まれること、目視による情報に誤差が含まれることなどが考えられる。これらの他にも要因は考えられるが、今回は、特にこの 2 つの誤差が支配的であると考え、この 2 つに着目して精度の検討を行う。そこで、一般診断を実施した 128 件の木造住宅の I_w を本診断法で求めた値と比較してその基本的精度を検討する。本診断法と一般診断法により算定される I_w の差は、算定過程を簡略化し I_w を略算することで生じる誤差(以下、略算誤差)と目視の際に情報を見誤ることで I_w に生じる誤差(以

下、目視誤差)に大別できる。例えば、略算誤差には、 $\bar{c}$ と実際の外壁の耐力の差がある。目視誤差には、 L_j などを評価する際に生じる長さの見誤りによるもの他、 γ_r や D を評価する際に生じるものがあるが、今回は、誤差に対して支配的と考えられる長さの見誤りによる誤差(以下、見誤り誤差)に着目する。 I_w から略算誤差のみを抽出するには、見誤り誤差をゼロにして I_w を求め、一般診断法により求めた I_w と比較すれば良い。見誤り誤差をゼロにするため、本診断法における耐震診断に必要である建物長さ L_j や無開口外壁のトータル長さ ${}_eL'_w$ 、屋根の種類、築年の情報を図面から読み取り、本診断法の I_w の算定方法を適用し I_w を算定(以下、この方法を図面診断法)とする。また、目視誤差のみを抽出するには本診断法と図面診断法とを比較する。

本来ならば、直接目視により情報を得て I_w を求める方法(以下、直接目視診断法)、あるいはGoogleマップの情報を得て I_w を求める方法(以下、Net目視診断法)で一般診断を実施した住宅の I_w を求めたいと考える。しかし、その128件の住宅が広域に点在していること、Googleマップではその住宅のうち少数しか確認できないことなどから128件の住宅に対する2つの手法の実施は困難である。したがって、任意の住宅の L_j 、 ${}_eL'_w$ を直接目視、Googleマップより実際に数量化し、そのばらつきを統計的に求めた。 L_j 、 ${}_eL'_w$ は、誤差を含んだ長さ L' とし、下式により算定する。なお、 L' は対数正規分布に従うものとする。

$$L' = \exp(\lambda + \xi \cdot r) \quad (5a)$$

ただし、

$$\lambda = \ln \bar{\mu} - 0.5 \cdot \xi^2 \quad (5b)$$

$$\xi = \sqrt{\ln(1 + \delta^2)} \quad (5c)$$

$$\bar{\mu} = L \cdot (1 + \alpha) \quad (5d)$$

$$\alpha = \bar{\Delta}/L \quad (5e)$$

ここで、 λ 、 ξ は読み取り長さの対数の平均値と標準偏差、 $\bar{\mu}$ 、 $\bar{\delta}$ はそれぞれ読み取り長さの平均値、変動係数の平均値、 $\bar{\Delta}$ は見誤り誤差の平均値で、 r は正規乱数の標本値である。なお、 L' が x 方向の場合 $L=L_x$ とする。 y 方向や ${}_eL'_w$ も同様である。また、 α は見誤り誤差の割合であり今回のシミュレーションでは一定値とした。表1に手法ごとに各々定めた α 、 $\bar{\delta}$ の値を示す。最終的に L_j 、 ${}_eL'_w$ を

表 1 各手法における α 、 $\bar{\delta}$

	直接目視診断法	Net目視診断法
α	-0.08	-0.12
$\bar{\delta}$	0.18	0.19

図 4 図面診断法と一般診断法の評点

図 5 直接目視診断法と一般診断法の評点

図 6 Net目視診断法と一般診断法の評点

式(1b), (2c)に代入し I_w を求めた。なお、前述のようにNet目視診断法は、道路側面の1方向のみ目視可能な場合が多いため、1方向のみのデータで I_w を算定する。

3.2 精度の検討

式(5a)より求めた見誤り誤差を含んだ L' を用いて本診断法により前述した住宅128件の I_w を算定した。表2に4つの診断法の中央値、変動係数、 I_w が0.7未満の住宅の割合(以下、 $P(I_w < 0.7)$)を示す。なお、 I_w は対数正規分布に従うこと⁹⁾が知られているため、表2には平均値ではなく中央値を示した。中央値及び変動係数はNet目視診断法が最も高く、他の方法には大差がない。 $P(I_w < 0.7)$ はNet目視診断法が最も低く、他の方法には大差がない。これらより、Net目視診断法の I_w には誤差が大きくかつ過大評価、すなわち危険側の評価となる傾向があることが分かる。さらに、 I_w に含まれる略算誤差の傾向をみるため、表2の一般診断法と図面診断法の各値を比較する。各値とも大差ない。よって、 I_w の略算誤差は本診断法の精度にさほど影響はないと思われる。

続いて、 I_w に含まれる目視誤差の傾向をみるため、表2の直接目視診断法あるいはNet目視診断法と図面診断法の各値を比較する。直接目視診断法と図面診断法の I_w の中央値と変動係数には大差がない。しかし、 $P(I_w < 0.7)$ は11%の差がある。また、Net目視診断法と図面診断法の I_w の各値とも差がある。今までの考察から両目視診断法には、見誤り誤差の影響が顕著であると考えられる。加えて、Net目視診断法は道路側面の1方向のみの診断であるという直接目視診断法にはない要因による誤差が含まれていると考えられる。

次に、図面診断法と一般診断法の I_w に関する相関分析結果を図4に示す。同様に直接目視診断法と一般診断法の結果を図5に示す。さらに同様にNet目視診断法と一般診断法の結果を図6に示す。図4より、図面診断法と一般診断法との I_w の間には相関係数は0.65とサンプル数128の1%有意水準の0.23より大きい有意な相関がある。先にも述べたが図面診断法には見誤り誤差によって生じる目視誤差は含まれておらず、したがって、略算誤差のみが支配的と考えられる。このような場合、本診断法で算定した I_w は一般診断法の I_w と高い相関を有している。図5より、直接目視診断法と一般診断法の I_w に関する相関係数は0.59であり一般診断法と図面診断法と同様に

表 2 各手法における特性値と I_w 0.7 未満の住宅の割合

	一般診断法	図面診断法	直接目視診断法	Net目視診断法
中央値	0.57	0.58	0.60	0.75
変動係数	0.43	0.35	0.41	0.56
$P(I_w < 0.7)$	71%	75%	64%	44%

1%有意水準で有意な相関がある。しかし、見誤り誤差の影響により相関性は低くなっている。さらに、Net 目視診断法と一般診断法に関する I_w の相関係数は 0.35 であり、1%有意水準で有意な相関がある。しかし、見誤り誤差の影響で相関性は低くなっており、その相関性は図 5 の直接目視診断法より低い。これは、見誤り誤差のほかに道路面側の 1 方向のみの診断であるという直接目視診断法にはない要因による誤差が含まれているためだと考えられる。なお、これらの結果は特性値および $P(I_w < 0.7)$ の結果とほぼ同様である。

これまでの分析を総括すると、本診断法では見誤り誤差が支配的であるため、見誤り誤差をなくすための目視による長さの測り方、長さの基準になる指標や目視の訓練法などを開発しマニュアル化する必要があると考えられる。

4. 簡易な耐震診断法の実施例

本章では、本診断法を適用し実際に住宅の耐震性能に関する情報収集を行った例を示す。

直接目視診断法を実施した対象地区は、新潟県中越沖地震（2007 年）の被災地である、新潟県柏崎市内の 3 地区である。それらの地区の位置を図 7 に示す。それらの地区は、街の成り立ちの歴史、すなわち古くからの住宅地で古い木造住宅が多い、あるいは新興住宅地で既存不適格木造住宅が少ないなどといった点に着目して選定した。具体的には「古くからの集落」である荒浜地区、「古くからの集落と新興住宅地域の混在」する枇杷島地区、「新興住宅地域」である半田地区である。それぞれの地区で無作為に抽出した木造住宅 100 件、計 300 件を対象に目視調査の経験がある男子大学生 3 人、3 日間で診断を実施した。なお、1 日当たりの診断時間は 7 時間であり、移動手段は徒歩とした。また、調査時間内では定期的に休養をとり疲労蓄積をなるべく避けるようにした。各地区の I_w の頻度分布を図 8～10 に示す。各地区の変動係数にはほとんど差はない。中央値、 $P(I_w < 0.7)$ は、荒浜地区 0.52、62%、枇杷島地区 0.65、57%、半田地区 0.75、44% という結果となった。このことから、直接目視診断法で求めた診断値には地域性が確認できる。

次に、Net 目視診断法を実施した対象地区は千葉県船橋市本町である。本町地区の位置を図 11 に示す。この街周辺は旧成田街道の宿場町であったため、古い木造住宅が密集している。この地区から木造住宅 100 件を無作為に抽出し、直接目視診断法の実施と同様に目視調査の経験がある男子大学生 1 人、1 日で診断を実施した。なお、診断時間は昼食を挟んで 2 時間半ずつ合計 5 時間である。また、直

接目視診断法と同様に調査時間内では定期的に休養をとり疲労蓄積をなるべく避けるようにした。本町の I_w の頻度分布を図 12 に示す。中央値 0.81、変動係数 0.48、 $P(I_w < 0.7)$ 45% という結果となった。このことから 1 方向のみの診断による I_w の特性、すなわち、精度の検討の結果と同様な傾向が中央値、 $P(I_w < 0.7)$ に表れている。これは、Net 目視診断法では 1 方向のみで診断を行う住宅が多いため診断値が過大評価となるためであり、今後は、Google マップで情報を得る場合でも 2 方向について得られるようにする必要があるだろう。

図 8 荒浜地区における I_w の頻度分布

図 9 枇杷島地区における I_w の頻度分布

図 10 半田地区における I_w の頻度分布

図 12 本町地区における I_w の頻度分布

図 7 新潟県柏崎市における 3 地区の立地 ⁷⁾

図 11 千葉県船橋市における本町地区の立地 ⁷⁾

5. まとめ

本論文は、住宅の耐震性能に関する多くの情報を短期間に収集するための簡易な耐震診断法を提案し、その精度を検討した。また、その診断法を用いて4つの地区で住宅の耐震性能に関する情報収集を行った例を示した。以下に得られた知見を示す。

- ① 今回の分析に限られるが、本診断法における I_w の略算誤差は特性値などにそれほど影響がない。
- ② 同様に、一般診断法と本診断法の間には1%有意水準において有意な相関性がある。
- ③ 見誤り誤差は、本診断法の結果に対する精度低下の要因となるため見誤り誤差を減少させる対策が必要である。具体的には、見誤り誤差をなくすための目視による長さの測り方、長さの基準になる指標や目視の訓練法などを開発しマニュアル化する必要があると考えられる。
- ④ 本診断法による実施例から本診断法の特性値は対象地区の木造住宅の耐震性能の特徴を概ね捉えている。
- ⑤ 本診断法による耐震診断実施例から短時間に多くの住宅の耐震性能を把握できる可能性を示した。

今後は、 γ_r や D を評価する際に生じる情報の見誤りにより I_w に生じる誤差の検討を行い更なる精度の向上、耐震診断の実施例を増やすとともに得られた情報で実際に地域防災計画を構築するよう努めていく。

〔参考文献〕

- 1) 国立国会図書館：住宅耐震化の現状と課題，調査と情報－ISSUE BRIEF－，第568号，2007.3
- 2) 財団法人日本建築防災協会：木造住宅の耐震診断と補強方法 木造住宅の耐震精密診断と補強方法(改訂版)，2004.8
- 3) 塩見政士，小檜山雅之：耐震診断データを用いた木造建物被害関数の等価線形モデルによる拡張，日本建築学会技術報告集，第13巻，第26号，2007.12，p481-486
- 4) 山口剛史，森保宏，井戸田秀樹：学校建物と木造住宅の耐震化による避難リスクの低減効果，日本建築学会東海支部研究報告書，第46号，2008.2，p149-152
- 5) 萩原幸男：日本の自然災害－世界の大自然災害も収録－1995年～2009年，日本専門図書出版，2009.7
- 6) 中埜良昭，岡田恒男：信頼性理論による鉄筋コンクリート造建築物の耐震性安全性に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，第406号，1989.12，p37-43
- 7) 鎌田輝男：白地図 KenMap，2009.10

[2010年2月19日原稿受理 2010年5月20日採用決定]