

東日本大震災における建物被災度判定結果の分析と想定地震に対する建物被災度推定への応用

奈良岡 浩二 渡辺 泰志 奥村 俊彦 黒瀬 行信

(技術研究所) (環境・技術ソリューション本部)

(技術研究所) (環境・技術ソリューション本部)

Study on Facility Damage Judgment in the Great East Japan Earthquake and its Application to Facility Damage Estimation for a Scenario Earthquake

by Koji Naraoka, Yasushi Watanabe, Toshihiko Okumura and Yukinobu Kurose

Abstract

In this paper, results of facility damage judgment in the Great East Japan Earthquake are analyzed. The damage ratio of facilities tends to increase with the scale of seismic intensity. That trend is especially remarkable for facilities with steel structures. Also proposed is a facility damage estimation method for scenario earthquakes based on the results of the facility damage judgment in the Great East Japan Earthquake. Facility damage can be classified into three categories using the proposed method. An example of the application of the proposed method is shown for the assumed earthquake in northern Tokyo Bay.

概要

本報告では、東日本大震災において当社が実施した建物被災度判定結果についての分析を行った。建物に被害が生じた割合は、気象庁の震度階と共に高くなる傾向が見られ、特にS造建物においてこの傾向が顕著であった。また、東日本大震災の被災度判定結果に基づく将来のシナリオ地震に対する建物被災度推定手法の提案を行った。提案手法により建物被災度は、無被害とほとんど無被害が支配的な領域と部分的な被害ありと顕著な被害ありが相対的に支配的な領域、およびこれらの中間の領域の3つのカテゴリーに分類することができる。提案手法の適用例として、東京湾北部地震に対する被災度推定結果を示した。

§1.はじめに

東日本大震災においては、広範囲で震度6弱以上の強い揺れに見舞われており、新耐震基準で設計された建物では主要構造部の被害は少なかったが、建物の天井や間仕切り壁、および設備などの非構造部材に多くの被害が生じた。今後は、首都直下地震や南海トラフの巨大地震などが発生する可能性が高いことが指摘されており、東日本大震災で得られた教訓を今後の防災・減災対策に活かすことが重要である。

本報告では、まず、東日本大震災において当社が実施した建物被災度調査の分析結果について報告する。次に、将来の地震に対する建物被災度を推定する際に、東日本大震災における建物の被災状況を考慮するために、建物被災度と建物の損失評価結果との対応関係を求める1つの手法を提案し、東京湾北部地震に対する試行結果を紹介する。

§2.東日本大震災における建物被災度判定結果の分析

2.1 建物被災度調査の概要

建物被災度調査は、施設の応急復旧対策の必要性の有無と被災箇所と被災程度を確認するために、東北地方から関東地方の建物を対象として、被災建築物応急危険度判定マニュアル¹⁾に準じて社内で作成したチェックシートに基づいて目視により実施したものである。

建物被災度判定においては、建物の地盤基礎(地盤基礎の破壊、建物の沈下傾斜)、躯体(主要構造、2次部材)、外装(窓ガラス、外装材、外部仕上げ)、内装(天井、間仕切り壁、内部仕上げ)、設備(外部、内部)、Exp. J、外部突出物、外構、その他について、◎(無被害)、○(ほとんど無被害)、△(部分的な被害あり)、×(顕著な被害あり)の4段階について判定を行っている。さらに、これらの判定結果に基づいて建物全体に対する被災度を

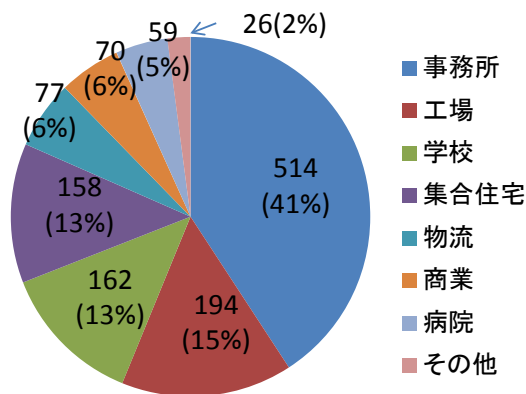


図-1 対象建物の用途構成

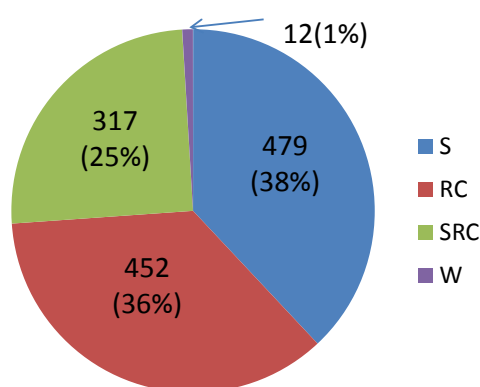


図-2 対象建物の構造種別構成

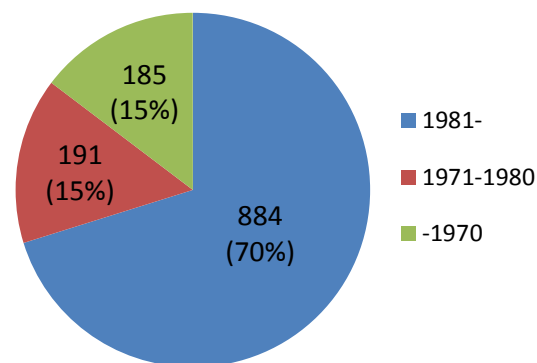


図-3 対象建物の建設年代構成

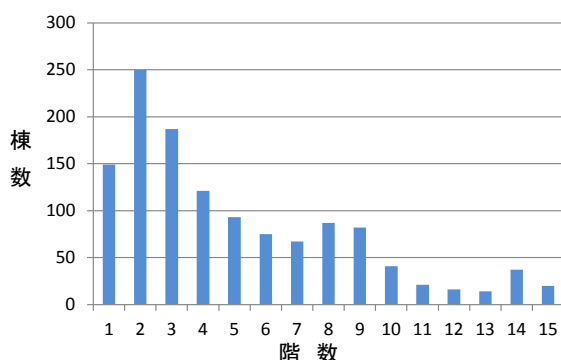


図-4 対象建物の階数構成

総合判定として、◎、○、△、×の4段階で判定を行っている。以下では、建物被災度判定を行ったものの中で、構造種別と竣工年が判明しており、かつ階数が15階以下となる1,260棟を対象として分析を行う。

対象建物の用途、構造種別、建設年代、および階数の構成を図-1~4に示す。用途の主なものは、事務所、工場、学校、集合住宅などであり、階数は低層のものが多くなっている。

2.2 建物被災度判定結果と震度階との関係

建物被災度の総合判定の◎、○、△、×に対する棟数と震度階との関係を表-1に示す。ここで、震度階については、(独)産業技術総合研究所のQuakeMap²⁾における250mメッシュ単位の計測震度相当値を1kmメッシュ単位の平均化したものを用いている。3.3において詳述するが、震度4以下の建物棟数は、他の震度階に比べて相対的に少ない傾向にある。これは、建物被災度調査を震度階が高い地域や建物の所有者からの要望により行っているためである。震度4以下から6強までは、震度階と共に◎の割合が低くなり、逆に×の割合が高くなる傾向にある。また、△と×を合わせた割合は、震度5強では約40%であるが、震度6弱以上では60%を超えており、震度6弱以上になると被害が増える傾向にある。

2.3 各部位の建物被災度判定結果と構造種別との関係

基礎・地盤、構造躯体、外装、内装、設備、外構、その他に対する建物被災度調査による×判定と△判定された建物の割合と震度階との関係を図-5, 6に示す。

表-1 建物被災度の総合判定と震度階との関係

震度階	総合判定				計
	◎(無被害)	○(ほとんど無被害)	△(部分的な被害)	×(顕著な被害)	
4以下	7	13	7	0	27
	0.26	0.48	0.26	0.00	
5弱	93	166	109	13	381
	0.24	0.44	0.29	0.03	
5強	50	188	121	25	384
	0.13	0.49	0.32	0.07	
6弱	15	103	141	73	332
	0.05	0.31	0.42	0.22	
6強	5	46	40	42	133
	0.04	0.35	0.30	0.32	
7	0	1	2	0	3
	0.00	0.33	0.67	0.00	
計	170	517	420	153	1260

*上段：棟数、下段：各震度階における棟数割合を表す。

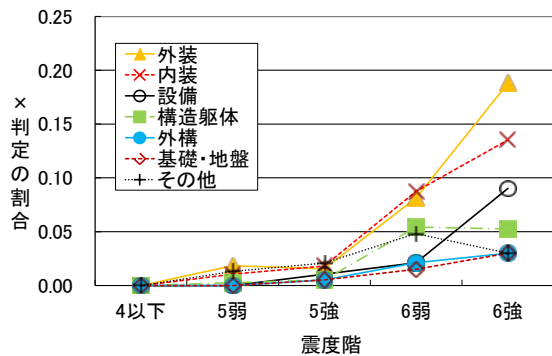


図-5 ×判定の建物割合と震度階との関係

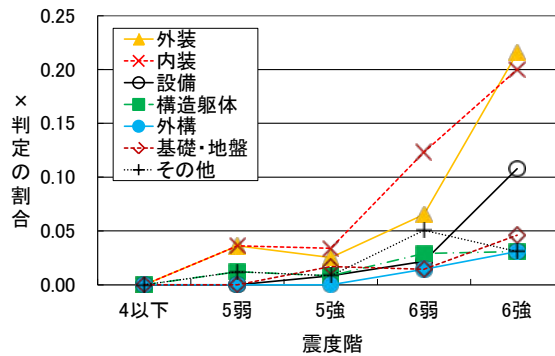


図-7 ×判定の建物割合と震度階との関係(S造、新耐震)

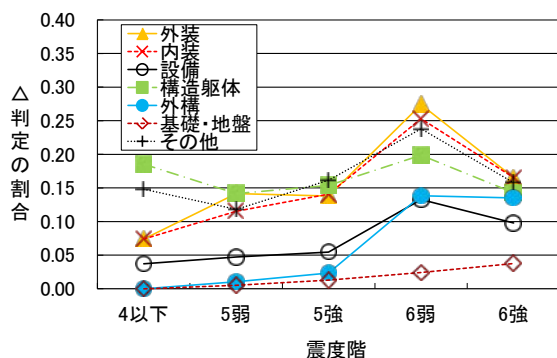


図-6 △判定の建物割合と震度階との関係

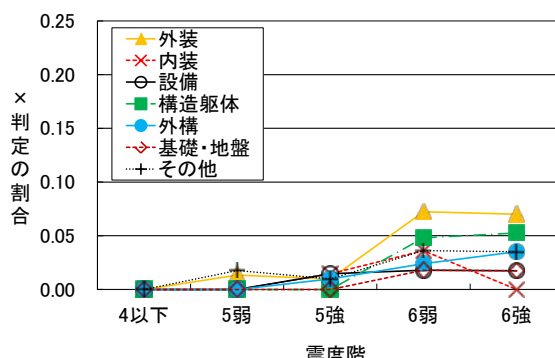


図-8 ×判定の建物割合と震度階との関係(RC造、SRC造、新耐震)

す。×判定の割合は震度階と共に概ね高くなる傾向が見られる。部位別では、外装(窓ガラス、外装材、外部仕上げ)と内装(天井、間仕切壁、内部仕上げ)の被害割合が高い。震度4以下では、建物被災度調査を行った建物棟数が他の震度階より少なく、被害ありの建物棟数が相対的に多いため、△判定の割合が高くなっていると考えられる。

次に、新耐震基準のS造建物とRC造およびSRC造建物に対する×判定の割合と震度階との関係を図-7, 8に示す。S造での×判定の割合がRC造・SRC造に比べて高く、特にS造での外装と内装の×判定の割合がRC造・SRC造に比べて高い傾向にある。

§3. 建物被災度判定結果と建物の損失評価結果との対応付け

政府の地震調査研究推進本部によると、南関東のM7程度の地震や南海トラフの地震が今後30年間に発生する確率は60%を超えている^{3),4)}。防災・減災の観点から、想定される地震に対する建物群の被災度を推定することが重要となる。ここでは、将来の地震に対する建物被災度を推定することを目的として、東日本

大震災における建物被災度判定結果と建物の損失評価結果との対応関係を求める1つの手法を提案する。

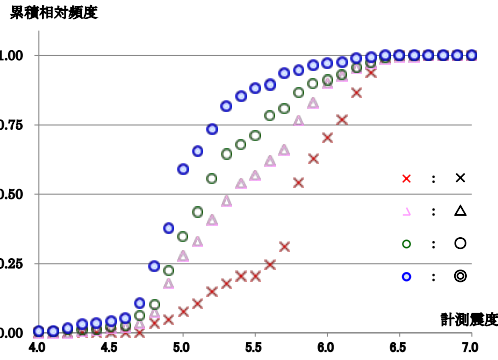
3.1 建物被災度判定結果と計測震度との関係

建物被災度の総合判定(◎、○、△、×)毎に計測震度に対して求めた基準化した累積頻度分布を図-9に示す。図-9から建物被災度判定結果の計測震度依存性が明瞭に認められる。基準化した累積頻度値が0.5となる計測震度に着目すると、◎では約5.0、○では約5.1、△では約5.3、×では約5.7となっており、被災程度が高くなるにつれ、建物被災度分布の中央値に対応する計測震度も高くなる傾向が見られる。

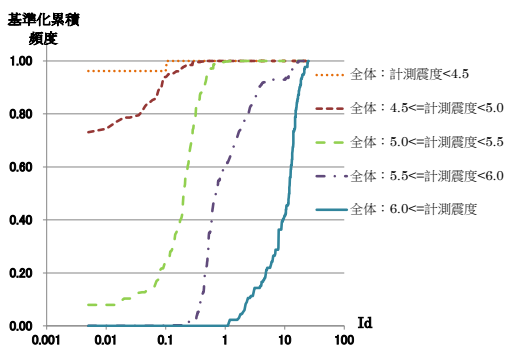
3.2 建物の損失評価方法の概要

建物の損失評価においては、文献5)に示したように、建物の部位を内外装、躯体、設備、その他に分けて、構造種別と建築年代に応じてそれぞれの fragility 曲線を設定する。次に、建物の応答を簡易応答評価式⁹⁾により算定し、各層の応答(層間変形角、層間変形、層の応答加速度等)を評価し、上記の各部の fragility 曲線と対応する応答値により損失比を評価する。

最大地動速度については、QuakeMapにおける



図一〇 東日本大震災における建物被災度毎の基準化累積頻度分布



図一〇 東日本大震災における震度階毎の被災度調査建物の I_d の累積頻度分布

250mメッシュ単位の最大地動速度を 1kmメッシュ単位で平均化したものを用いている。また、最大地動加速度は、最大地動速度に対する最大地動加速度の比 (A/V) を 6.2 と設定して算出している。これは、簡易応答評価式と本報告で用いているフラジリティカーブによる損失評価結果と既往のフラジリティ曲線図⁷⁾による損失評価結果との比較からキャリブレーションを行い、入力損失的な効果を考慮に入れて設定した値である。

3.3 建物被災度判定結果と建物の損失評価結果との対応付け

建物の被災度を示す Index 値として I_d を導入する。建物の内外装、躯体、設備、その他の損失比を L_a, L_s, L_m, L_o 、各損失比に対するインパクト係数を I_a, I_s, I_m, I_o とし、Index I_d を以下のように定義する。

$$I_d = L_a I_a + L_s I_s + L_m I_m + L_o I_o \quad (1)$$

式(1)でインパクト係数として、各建物部位のコスト比を与えると、 I_d は PML 等で用いられる予想損失額を再調達価格で割った値を与える事になる。

上記で述べた被災度 Index I_d と建物被災度との関係

表一〇 震度階毎の建物棟数とその比率

震度階	*1	①	②	①/②
4以下	27	0.02	0.17	0.12
5弱	381	0.3	0.42	0.71
5強	384	0.3	0.31	0.97
6弱	332	0.27	0.08	3.38
6強以上	136	0.11	0.02	5.5
計	1260	1	1	—

*1: 建物被災度調査棟数 ①: 被害調査建物内棟数比率
②: 建物データベース内棟数比率

より得られる各種統計量は、調査された建物についての統計量を表すことはできるが、調査されていない建物を含んだ統計量は表していない。ここでは、「未調査建物の被害統計量は、当該建物所在地の震度に依存し、その統計量は同じ震度を受けた調査建物の被害統計量に等しい。」との仮定を用いて、未調査建物を含んだ場合の被害統計量を推定することを考える。

上記の仮定は、未調査建物の場合は大半が無被害か、ほとんど無被害である状況と予想されることから実際には無被害であるものを被害有とみなすことにつながると思われる。しかし、このような考え方をを用いる事により、被害有とみなされる 建物を相対的に多めに評価する事になり、本手法によって求められた統計量は安全サイドの判断指標を与えるものと判断される。従って、このような仮定を用いて概略的に未調査建物も含めた被害予測統計量を算定することは実用上、合理的であると考えられる。

インパクト係数を $I_a = 25, I_s = 25, I_m = 25, I_o = 25$ (インパクト係数をコスト比としてすべて 0.25 として求めた I_d 値を 100 倍した事に相当) とする。

各建物の所在地の震度階毎に基準化した累積頻度と I_d との関係を求めると図一〇のようになる。震度階が高くなるにつれ、 I_d 値が大きくなる傾向が見られる。

表一〇に建物被災度判定が行われた建物の震度階毎の建物棟数(表中*1)とその比率(表中①)、ならびに、当社施工建物のデータベースに登録されている建物棟数(未調査建物を含む)の震度階別の比率(表中②)と①/②を示す。

表一〇の①/②の値に見られるように、調査建物の棟数比率は震度 6 弱以上において相対的に高く、震度 5 強以下において相対的に低くなっている事がわかる。これらの結果より、調査されている建物は震度 5 弱以上の地域のものがほとんどであり、被害調査建物の被災度結果は震度 5 弱以上の性状が大きく反映されてい

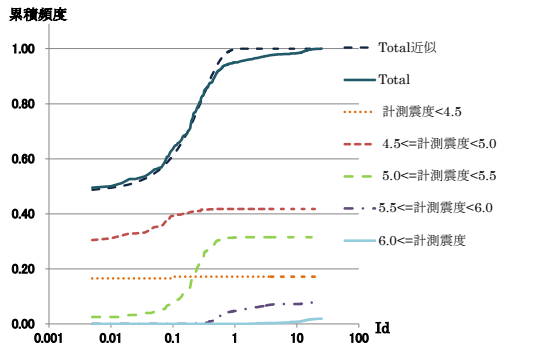


図-11 東日本大震災における未調査建物を考慮した震度階毎の推定累積頻度分布

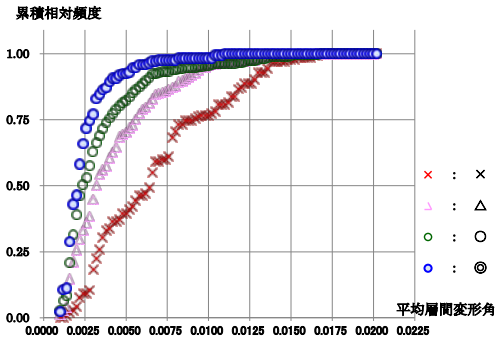


図-14 東日本大震災における建物被災度毎の平均層間変形角累積頻度分布

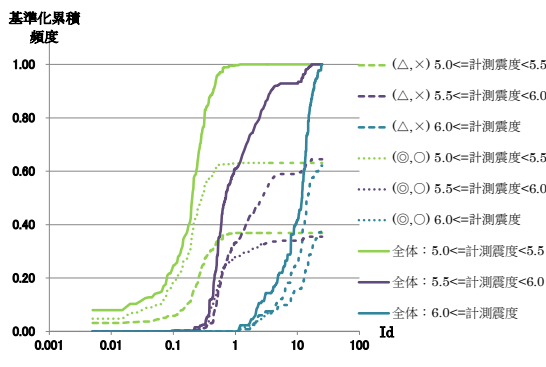


図-12 東日本大震災における震度階毎の基準化累積頻度分布と(◎または○)と(Δまたは×)と判定される割合

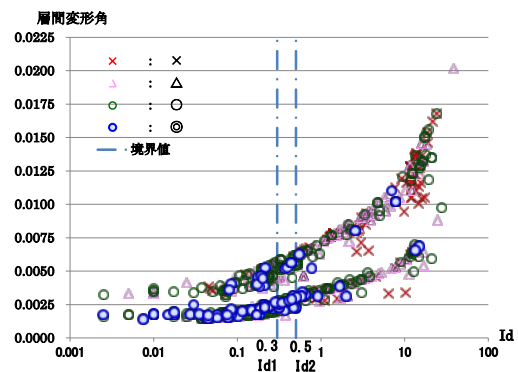


図-15 東日本大震災における建物被災度と I_d および平均層間変形角との関係

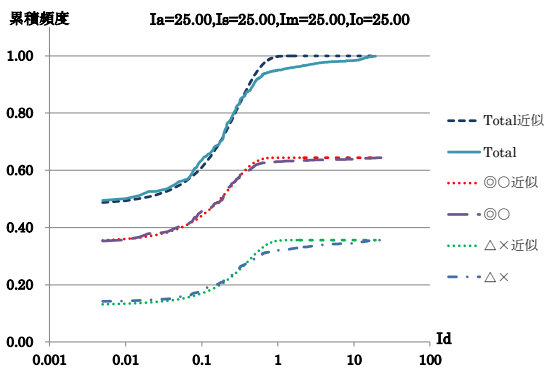


図-13 東日本大震災における未調査建物を考慮した(◎または○)と(Δまたは×)で分類した場合の I_d の推定累積頻度分布

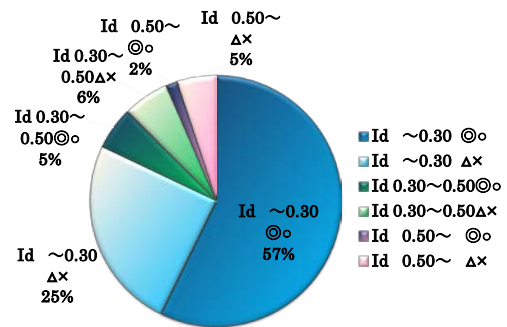


図-16 東日本大震災の被災度調査建物に未調査建物を考慮した場合のデータ構成比 ($I_a=0.3, I_e=0.5$ の場合)

る結果となっている事がわかる。

未調査建物を含んだ震度階毎の推定累積頻度は、未調査建物に対する前述の仮定により、図-10 に示す各震度階の基準化した累積頻度分布に震度階毎の当社施工建物のデータベース内棟数比率(表-2 中②)を乗じる事によって、図-11 のように求める事が出来る。

図-12 は図-10 の震度階毎に基準化した累積頻度分布に対して(◎、○)、(Δ、×)と判定される割合を示したものである。これらの結果と表-2 の②の値との積和を計算すれば、図-13 に示すような対象建物全体の I_d の累積頻度分布と各 I_d に対して(◎、○)、(Δ、×)と判定される割合を求めることができる。図-14 に、

建物被災度の総合判定(◎、○、△、×)毎に簡易応答解析結果より求まる建物の平均層間変形角に対して求めた基準化した累積頻度分布を示す。基準化した累積頻度の値が 0.5 となる平均層間変形角は、◎では約 1/500、×では約 1/150 となっている。平均層間変形角と I_d との関係を図-15 に示す。平均層間変形角と I_d との関係については、2本の曲線でモデル化できるような分布形状を示している。同じ I_d に対して平均層間変形角が大きいグループがS造に対応するものであり、平均層間変形角が小さいグループがRC造やSRC造などに対応するものである。図中、平均層間変形角 1/500 と 1/150 に対応する I_d の値(I_{d1} および I_{d2})はそれぞれ概ね 0.3 と 0.5 となる。

建物被災度の推定においては、被災度区分指標値として I_{d1} 、 I_{d2} を導入して、(◎、○)が相対的に支配的な領域($\sim I_{d1}$)、(△、×)が相対的に支配的な領域($I_{d2} \sim$)、およびその中間的な領域($I_{d1} \sim I_{d2}$)を設定する。図-13の正規分布で近似した曲線に対して、 $I_{d1}=0.3$ 、 $I_{d2}=0.5$ とした場合に、それらの I_d の値によって区分されるデータの状況を図-16の円グラフに示す。図-16において、時計回り方向にそれぞれ $I_d < 0.3$ 、 $0.3 \leq I_d \leq 0.5$ 、 $0.5 < I_d$ に該当するデータの割合を示している。また、上記の3つの I_d の区分において、建物被災度判定での総合判定結果がそれぞれ(◎または○)、(△または×)となっているものの割合も示している。図-16より、以下の事項が指摘できる。

- ① $I_d < 0.3$ 、 $0.3 \leq I_d \leq 0.5$ 、 $0.5 < I_d$ となる建物の割合は 0.82、0.11、0.07 となる。
- ② $I_d < 0.3$ となる建物の中で(◎または○)となっている割合は約 0.7、 $0.5 < I_d$ となる建物の中で(△または×)となっている割合は約 0.7 となる。
- ③ $0.3 \leq I_d \leq 0.5$ となる建物の中で(◎または○)、(△または×)となる割合はそれぞれ 0.45、0.55 でほぼ半々となる。

上記より、本分析で設定したインパクト係数より算出された I_d を用いると $I_d < 0.3$ 、 $0.3 \leq I_d \leq 0.5$ 、 $0.5 < I_d$ の区分に応じて建物を分類した場合、 $I_d < 0.3$ と判定された建物内の約 70%は被災度判定において(◎または○)と判定され、 $0.5 < I_d$ と判定された建物内の約 70%は(△または×)と判定され、 $0.3 \leq I_d \leq 0.5$ と判定された建物については概略(◎または○)、(△または×)がそれぞれ 50%ずつの割合となると予想される。従って、本分析において採用したインパクト係数を用いた指標 I_d および被災度区分指標値 $I_{d1}=0.3$ 、 $I_{d2}=0.5$ を用いて建物の被災度予測をすれば、 $I_d < 0.3$ の場合に対して約 70%の確率で(◎または○)と判定される建物を、 $0.5 < I_d$ の場合に対して約 70%の確率で(△または×)と判定される建物を予測することができる。また、 $0.3 \leq I_d$

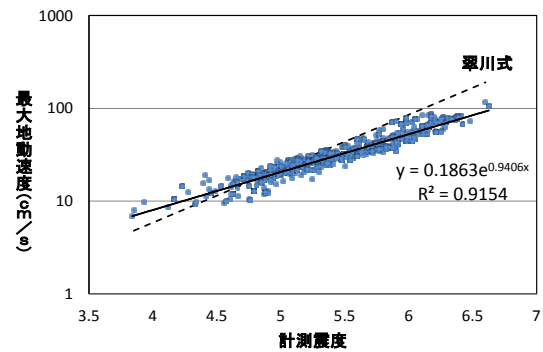


図-17 東日本大震災における建物被災度調査位置における計測震度と最大地動速度との関係

≤ 0.5 の場合には、概ね 50%の確率で建物の被災度は(◎または○)または(△または×)と判定される。

3.4 東日本大震災における計測震度と最大地動速度との関係

東日本大震災において建物の被災度調査を実施した地点を対象として QuakeMap を 1km メッシュ単位で平均化した計測震度と最大地動速度との関係を図-17 に示す。両者の平均的な関係を回帰分析により求めると、以下のようになる。

$$V_{max} = 0.1863 \exp(0.9406I) \quad (2)$$

ここに、 V_{max} は最大地動速度(cm/s)、 I は計測震度である。

式(2)を図-17に破線で示した翠川式⁹⁾と比較すると、およそ震度 5 強以上では翠川式によるものより最大地動速度が小さく、逆に、およそ震度 5 弱以下では翠川式によるものよりも大きくなっている。将来の地震に対して建物被災度を推定する場合には、計測震度-最大地動速度の設定が重要である。この関係は海溝型や内陸直下などの地震の発生タイプによって異なると考えられるが、以降の検討においては、東日本大震災における計測震度と最大地動速度の平均的な関係として式(2)を用いる事とした。

§4. 東京湾北部地震に対する建物群の被災度推定

4.1 本手法の留意点と将来発生すると考えられる地震に対する被災度分布予測のための改良

東日本大震災における震度分布とそれらの震度分布内に存在する建物の分布状況が等しいと考えられるような地震については、概ね類似した I_d 値の累積分布、あるいは統計的性質を有すると考えられるため、3.で示した手法によって被災度分布を予測することは可能であると思われる。しかしながら、将来に発生すると

予想される地震については、その地震によって引き起こされる震度分布と震度分布内に存在する建物の分布状況が一般的に東日本大震災におけるものと違うと考えられるため、本手法を将来に発生すると予想される地震に対する被災度分布予測に適用する場合には、改良を加える必要があると考えられる。

ここでは、上記を鑑み、将来発生すると考えられる地震の被災度分布を予測するための手法を以下に提案する。

- ① 将来発生すると考えられる地震(以下、将来地震と呼ぶ)の震度分布(何らかの形で与えられているものとする)の入手
- ② 将来地震の各震度分布(震度4以下、震度5弱～震度6強以上等)とそれらの中に含まれる建物数の調査、および各建物の I_d 値と累積頻度 $\cdot I_d$ 関係を導出(但し、 I_d 値評価時の計測震度から最大地動速度への変換については、式(2)に示した東日本大震災における観測記録の計測震度-最大地動速度関係の回帰式を用いる。)
- ③ 東日本大震災において得られた、各震度に対する基準化した累積頻度 $\cdot I_d$ 関係(各震度に対する基準化した累積頻度 $\cdot I_d$ 関係と、その(◎または○)および(△または×)と判定されるものの分布)に将来地震の各震度地域に存在する建物数を乗じ、それらの和を計算し、将来地震の累積頻度 $\cdot I_d$ 関係(累積頻度 $\cdot I_d$ 関係と、その(◎または○)および(△または×)と判定されるものの分布)を導出
- ④ 一般的に本節の最初で述べた理由により、③によって求められた将来地震の累積頻度 $\cdot I_d$ 関係は②によって得られる累積頻度 $\cdot I_d$ 関係とは異なった分布となるが、各 I_d 値に対する(◎または○)および(△または×)の割合は両者とも同じになると考え、②によって得られた将来地震の累積頻度 $\cdot I_d$ 関係に③によって求められた(◎または○)および(△または×)の内訳を与える。
- ⑤ ④で求めた、将来地震の累積頻度 $\cdot I_d$ 関係を用いて、ほぼ(◎または○)と判定されると見做し得る I_d 値の境界値、ほぼ(△または×)と見做し得る I_d 値の境界値を設定する。

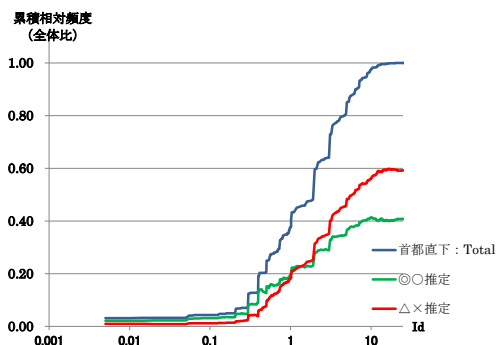


図-18 将来地震に対する I_d の推定累積頻度分布

以上のプロセスによって求めた(◎または○)および(△または×)の累積頻度分布は、必ずしも単調増加とはならず正確な意味での累積頻度分布とは言えないが、概ね累積頻度分布を表現しているものと考えられる。上記の②に示した方法により求めた将来地震(中央防災会議から2004年に公表された東京湾北部地震:対象建物棟数約10,300)に対する累積頻度 $\cdot I_d$ 関係、および④に示した方法により求めた(◎または○)および(△または×)の推定累積頻度と I_d との関係を図-18に示す。

4.2 将来地震に対する I_d 判定領域の検証

4.1 で示した考え方によって求めた将来地震に対する(◎または○)および(△または×)の累積頻度分布に前述の被災度区分指標値 $I_{d1}=0.3$ 、 $I_{d2}=0.5$ を適用した場合のデータ構成比を求める。将来地震の被災度推定地域の建物約10,300棟に対する検証結果を図-19に示す。図の表現については、図-16の場合と同様である。

図-19より、以下の事項が指摘できる。

- ・ $I_d < 0.3$ 、 $0.3 \leq I_d \leq 0.5$ 、 $0.5 < I_d$ となる建物の割合は0.12、0.09、0.79となる。

- ・ $I_d < 0.3$ となる建物の中で(◎または○)となっている割合は約0.67、 $0.5 < I_d$ となる建物の中で(△または×)となっている割合は約0.65となる。

- ・ $0.3 \leq I_d \leq 0.5$ となる建物の中で(◎または○)、(△または×)となる割合はそれぞれ0.56、0.44でほぼ半々となる。

上記より、東京湾北部地震に対して本分析で設定したインパクト係数より算出された I_d を用いると $I_d < 0.3$ 、 $0.3 \leq I_d \leq 0.5$ 、 $0.5 < I_d$ の区分に応じて建物を分類した場合、件数的にはそれぞれ概ね丸めた値で、10%、10%、80%の比率となると予想される。また、 $I_d < 0.3$ と判定された建物の内の約70%は被災度判定において(◎または○)と判定され、 $0.5 < I_d$ と判定された建物の内の約70%は(△または×)と判定され、 $0.3 \leq I_d \leq$

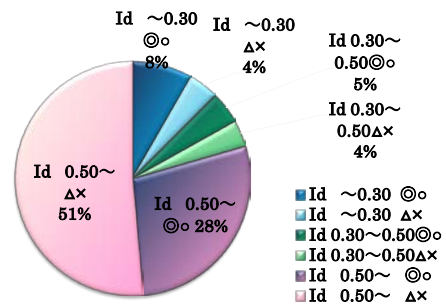


図-19 将来地震(東京湾北部地震)に対する各判定領域におけるデータ構成比($I_{d1}=0.3$ 、 $I_{d2}=0.5$ の場合)

0.5と判定された建物については概略(◎または○)、(△または×)約50%ずつの割合となると予想される。

§5.まとめ

東日本大震災における建物の被災度判定結果の分析から、震度6弱以上では調査した建物の約6割以上に顕著な被害か部分的な被害が生じている。また、天井や間仕切り壁などの内装と外装の被害は、S造で多く生じている。

次に、建物の被災度判定結果を考慮した被災度推定手法について検討を行い、新たな被災度指標 I_d を導入した。この指標に基づくと、無被害とほとんど無被害

が支配的な領域と部分的な被害ありと顕著な被害ありが相対的に支配的な領域、およびこれらの中間の領域の3つに分類できることがわかった。

提案した建物被災度推定手法を用いることにより、首都直下地震や南海トラフの地震などに対する建物群の被災度を推定することが可能となる。本手法は、今後発生が予想される大地震のBCP対応に有用であると考えられる。

謝辞

建物被災度調査は、社内の多くの関係者により実施されたものです。関係各位に感謝いたします。

<参考文献>

- 1)財団法人 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：被災建築物の応急危険度判定マニュアル、1998.
- 2)独立行政法人 産業技術総合研究所：QuiQuake —地震動マップ即時推定システム—<http://qq.ghz.geogrid.org/QuakeMap/>
- 3)地震調査研究推進本部 地震調査委員会：相模トラフ沿いの地震活動の長期評価、2004年8月
- 4)地震調査研究推進本部 地震調査委員会：南海トラフの地震活動の長期評価（第二版）について、2013年5月
- 5)石川裕，奈良岡浩二，渡辺泰志，斎藤知生：生産施設の地震リスク評価，第12回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.1386~1389、2006.
- 6)田村和夫，中村豊，金子美香，神原浩：高層建物の地震時安全性評価技術の開発（その1）全体概要と建物の簡易応答評価手法，日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2，pp.623-624，2005.
- 7)村尾修，山崎文雄：自治体の被害調査結果に基づく兵庫県南部地震の建物被害関数，日本建築学会構造系論文集，第527号，pp.186-196，2000年1月
- 8)翠川三郎，藤本一雄，村松郁栄：計測震度と旧気象庁震度および地震動強さの指標との関係，地域安全学会論文集，1，pp.51~56，1999.