

建物被害調査資料に基づく1923年関東地震における
鉄筋コンクリート造建物の被害に関する研究DAMAGE OF REINFORCED CONCRETE BUILDINGS DURING THE 1923 GREAT KANTO
EARTHQUAKE BASED ON DAMAGE INVESTIGATION REPORTS

林 章二*, 牧原 慎一郎**, 福和 伸夫***, 飛田 潤****

Shoji HAYASHI, Shinichiro MAKIHARA, Nobuo FUKUWA
and Jun TOBITA

In this paper, we analyzed the damage of reinforced concrete buildings due to the 1923 great Kanto Earthquake in the City of Tokyo based on the major two damage investigation reports. One is made by the Shimizu-gumi construction company, which is newly analyzed in this paper, and the other is well known report by the Imperial Earthquake Investigation Committee. As a result, the damage of RC buildings was clearly related with their building type and use, number of floors and distributed area. Detailed investigation on some damaged buildings revealed the situation of reinforced concrete buildings at that time, as well as the properties of damage investigation by a construction company. Microtremor observation and soil boring log collection were newly done at 53 sites of damaged buildings. Surface soil conditions obtained from H/V spectra of microtremor and drilling data were examined and shown to be related with reinforced concrete building damage. The difference of seriously damaged area of reinforced concrete buildings and wooden houses was observed which will be important aspect of seismic hazard distribution in the Tokyo city area.

Keywords: The 1923 great Kanto Earthquake, building damage, reinforced concrete buildings, investigation reports, microtremor, horizontal-to-vertical spectral ratio

1923年関東地震, 被害, 鉄筋コンクリート造建物, 調査資料, 常時微動計測, H/V スペクトル

1. はじめに

1923年関東地震は建物や都市に甚大な被害を与え、我が国の災害史上で最多の犠牲者を出した。一方で、首都東京の震災復興計画、市街地建築物法への耐震規定の導入、東京大学地震研究所の設立などにもつながり、建築界に与えた影響は計り知れない。建物被害に関しては、当時の震災予防調査会をはじめとして膨大な調査報告がある。一方、近年の武村らによる精力的な研究により、被害の実像が多面的に明らかにされてきており、死者数の改訂や、木造建物の被害に基づく震度分布などが示されている¹⁾。首都直下地震の発生が懸念される現在、強震動予測や地震応答解析など現代の研究的知見をもって、関東地震の被害を分析することの意義は未だ大きい。

関東地震当時は、東京の建物の大半は木造であり、非木造建物はごくわずかであった。一方、現代の東京は非木造建物、特に鉄筋コンクリート造建物が大半を占める。このため、関東地震時の鉄筋コンクリート造建物の被害に関する分析は、現代都市の地震被害を予測する上で重要な基礎資料となる。また、東京には19世紀末から戦前にかけて建築された鉄筋コンクリート造による近代の歴史的建築物が数多く残っている。これらは我が国の近代化の歴史を今に伝え

る重要な歴史遺産であり、将来の首都直下地震を前にして耐震改修を含む修復保存が重要な課題となっている。関東地震の際の鉄筋コンクリート造建物の被害分析を通して当時の建物の耐震性能を的確に把握できれば、現存する近代建築物の耐震補強を合理的に実施する道が拓ける。

関東地震の調査報告は、被害の大部分を占めた木造家屋や火災に関するものがほとんどである。一方、鉄筋コンクリート造建物の被害調査資料としては、震災予防調査会『震災予防調査会100号(丙)下』の内の「鉄筋コンクリート造被害調査報告」²⁾(以下、震災予防調査会報告)が知られている。ここでは鉄筋コンクリート造の被害建物のほぼ全数が網羅されており、被害の全容は検討できるが、それでも総数で約500棟であり、個々の建物に関する建築構造的な記載も十分とはいえない。すなわち、統計的分析のためには資料数が十分ではなく、建物の被害原因を詳細に分析するには資料内容が不足していた。このため、関東地震の際の鉄筋コンクリート造建物の被害に関する分析は、未だ十分に行われているとはいえない。

そこで、本論では、新たな資料として清水組による1923年関東地震の被害調査『大正12年九月一日関東地方大震災火災による建物の被

* 清水建設技術研究所 工修

** 名古屋大学大学院環境学研究科 大学院生
現・愛知県庁 修士(工学)

*** 名古屋大学大学院環境学研究科 教授・工博

**** 名古屋大学大学院環境学研究科 准教授・工博

Institute of Technology, Shimizu Corp., M. Eng.

Graduate Student, Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ.

Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Graduate School of Environmental Studies, Nagoya Univ., Dr. Eng.

害調査』³⁾(以下、清水組資料)に着目し、震災予防調査会報告と相互補完することにより、当時の鉄筋コンクリート造建物の被害分析を試みる。この資料は、当時数少ない総合建設業である清水組が、自社設計施工建物について技術者による詳細な被害調査と原因の分析を行い、自社の将来のための記録としてまとめたものである。公表を目的としなかったためもあり、調査建物数は多くはないものの、建物の被害状況について建築技術者の視点で詳細に調査され、的確に記録されている点に大きな特徴がある。

さらに、これらの資料を統合して検討した被害状況を、武村らにより推定された東京の詳細な震度分布と対比させることにより、当時の鉄筋コンクリート造建物の被害分布の特徴を明らかにすることも可能になる。そこで、本論では下記のような流れで関東地震における鉄筋コンクリート造建物の被害分析を行うことを目的とする。

- 1) 震災予防調査会報告と清水組資料で重複する建物について、被害調査内容を比較することにより、それらの整合性を確認すると共に、両資料の相互補完性について明らかにする。
- 2) 両資料を用いて、鉄筋コンクリート造建物の被害分析を行う。その際に、建物用途、建物階数に着目して、武村らによる木造家屋被害に基づく震度分布との関係を分析する。なお、建物用途は構造的特徴と、建物階数は建物の周期特性と、それぞれ関連があると考えられる。
- 3) 上記2)の分析の結果、建物階数により震度分布との対応に差異が認められるのを受けて、旧東京市域の地盤ボーリングデータを収集すると共に、新たに53か所で単点常時微動計測を行ってH/Vスペクトル分析から地盤卓越周期を求め、地盤特性と周期特性、さらに震度分布との関係を分析する。さらに、この結果を用いて、階数による被害地域の差の原因を検討する。

ただし、先にも述べたように、両資料を合わせても被害の特徴や傾向の検討を詳細に行うには棟数が十分ではないため、別報にて個別建物の地震応答解析に基づく詳細な検討を行うことにより、以上の分析結果を補完すると共に、本論の妥当性に関する追加検証も行う予定である。なお、これらの分析を効果的に実施するため、対象とする資料をGoogleEarth上で検索・分析できるWebGISを開発しており⁴⁾、本論ではこのシステムを用いた表示結果を利用している。

2. 建物被害調査資料の特徴

ここでは、検討を行う被害調査資料の概要と特徴を整理する。

清水組による『大正十二年九月一日 関東地方大震災火災による建物の被害調査』⁵⁾は、当時の大手建設会社であった清水組の設計部によりまとめられたものである。その緒言に、「専ら設計部設計の建物につきてなせる調査に據り作製せしもの」とあるように、清水組が設計・施工に携わった建物についての調査結果が記されている。

清水組資料の目次を表1に示す。第一編では各建物の被害が記載されている。第一章では、190棟の建物を鉄骨造・鉄筋コンクリート造・煉瓦造・木骨造・日本家の五部に分け、階数、建坪、位置を記している。さらに、震災による被害、火災による被害、修繕の程度について、記号を用いて3段階に分類している。第二章から第四章にかけては、そのうちの49棟の建物(構造では鉄骨造・鉄筋コンクリート造・煉瓦造)について、各部材の、より詳細な被害や設計概要、周囲の状況などが記されている。第二編、第三編では、清

水組の構造技術者によって震災火災による被害分析が「研究」という形でまとめられている。第四編、第五編は「作成中」となっており記載がない。第六編は付録となっている。

被害の様子に関する記述は、表2に示す項目が網羅され、建築構造学的な視点からかなり詳細である。これは被害原因を特定するためというよりも、出来る限り多くの被害項目について客観的に詳細な記録を残すことに力点を置き、主に自社の将来のための資料的価値を重んじていると考えられる。また、同一の建設会社により設計された建物であることから、設計理念などについても推察することができる。

表1 清水組資料『大正十二年九月一日 関東地方大震災火災による建物の被害調査』の目次

第一編 設計部設計の地震及び火災による被害の調査
第一章 設計部設計建物の被害総覧
第二章 鉄骨造建物の被害の調査
第三章 鉄筋コンクリート造建物の被害の調査
第四章 煉瓦造建物の被害の調査
第二編 地震による建物の被害の研究
第一章 地質及び地勢と建物の震害との関係
第二章 基礎と建物の震害との関係
第三章 建物の形態と震害との関係
第四章 架構建築の構造別による被害の比較
第五章 鉄骨造建物の震害
第六章 鉄筋コンクリート造建物の被害
第七章 煉瓦造建物の被害
第八章 木造建物の被害
第九章 昇降機の被害
第一〇章 防火扉の被害
第三編 火災による建物の被害の研究
第一章 建物の防火設備と引火原因の実例
第二章 建物の引火原因について
第三章 鉄骨造及び鉄筋コンクリート造建物の被害
第四章 昇降機の被害
第五章 防火扉の被害
第四編 設計部設計以外の建物の調査による災害研究補遺(作製中)
第五編 建物の耐震耐火に関し設計者及び現場監督者の心得べき要項(作製中)
第六編 付録
第一章 地震について
第二章 東京の地質
第三章 建築諸材料の溶融点及び耐火強度

表2 主な被害調査項目

建物概要	・建物名・構造・種別・位置 ・地質・周囲の状況・竣工・用途
設計概要	・建坪・階数・軒高(尺)・基礎 ・外壁・根壁・仕上・間壁・床 ・屋根・天井・階段・防火設備 ・その他
使用材料	・鉄骨・鉄筋・コンクリート ・セメント・砂利・備考
震災に依る被害	・概況・基礎・外壁・間壁・床 ・屋根・天井・階段・造作類 ・防火扉類・昇降機・備考 ・その他
火災に依る被害	・概況・基礎・外壁・間壁・床 ・屋根・天井・階段・造作類 ・防火扉類・昇降機・備考 ・その他

一方、震災予防調査会の資料『震災予防調査会報告100号』⁶⁾は、構造種別毎に網羅的に調査されており、調査棟数は清水組資料と比較してはるかに多い。鉄筋コンクリート造は537棟の調査結果があ

り、うち個別に詳細な報告がある建物が95棟ある。報告書の内容は、技術者の調査に加えて、被害を受けた所有者・使用者からの現地聞き取り調査が含まれており、技術的視点だけではない情報が記述されている点に特徴がある。

震災予防調査会報告は既往の研究においても数多く引用されており、関東地震における建物被害調査の最も基本となる資料と位置付けられる。また清水組資料と共通の建物も含まれているため、異なる側面からの調査内容・記載に基づいた相互分析が可能である。

3. 関東地震における鉄筋コンクリート造建物の被災度の分析

本章では、上記2調査資料について、まず基本的な特性を検討したうえで、両者を比較検討して建物被災度に関する分析を行う。

3.1 資料別にみた調査建物と被害の傾向

図1に清水組資料による調査棟数および両資料を統合した全調査棟数を、階数別・被害程度別に示す。また表3はそれらのうち大破以上の被害率を示す。全調査建物数は547棟であり、うち清水組の調査棟数は32棟である。なお、震災予防調査会資料については、3.4節に示すように新たに被災度分類を見直している。

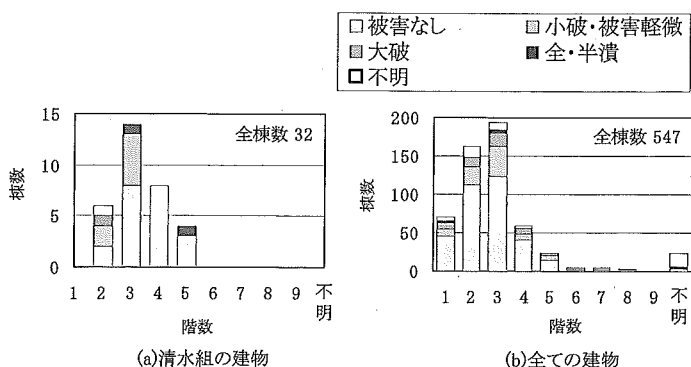


図1 鉄筋コンクリート造建物の被害調査資料

表3 鉄筋コンクリート造建物の被害率(%)

	清水組	清水組以外	全体
1, 2 階	20.0	11.4	11.6
3, 4 階	4.5	13.6	12.8
5 階以上	25.0	18.2	18.9
全体	9.7	13.6	13.4

全体では3階建の建物が最も多く、次いで2階建が多いが、清水組資料では4階建も多くなっている。両資料を合わせると1・2階建の建物数234棟、被害率11.6%、3・4階建は252棟、12.8%、5階建以上は37棟、被害率は18.9%となっている(表3)。5階建以上の建物は少数であるが、4階建以下はある程度の棟数があり、被害率の評価ができると判断した。清水組資料では1・2階建の調査数の割合が小さく、被害率は大きくなっているが、これは清水組が比較的規模の大きい建物を施工していたこと、したがってそれらを主に調査した上で、低層建物の調査は被害の大きい例を中心に詳細に行われたのではないかと推察される。

3.2 当時の建物総数から見た調査建物の傾向

本論で扱う調査資料について、既往の資料・研究との関係で検討する。清水組資料および震災予防調査会報告において調査された被害建物数が、地震発生時の鉄筋コンクリート造建物の総数に対してどの程度の割合であったのかに関する記述は、資料中には見られない。そこで、「東京市統計年表」⁴⁾および「東京府統計書」⁵⁾に記載されている建物数を利用して建物総数を検討した結果を表4に示す。文献4には、各区について建物用途、構造種別、階数ごとに建物棟数、建築面積等が記されている。鉄筋コンクリート構造については大正11年12月末時点で、427棟となっている。また、文献5は、表5に示すように、各区について構造種別ごとの建物棟数が示されている。鉄筋コンクリート構造は分類に明記されていないが、文献5との対応から「其他」に分類されていると推察され、表4にはこの値を記載した。その総数は大正11年12月末で852棟であるがすべてが鉄筋コンクリート造とは限らない。以上の資料と比較して、本論文で分析する清水組資料および震災予防調査会報告は、当時の鉄筋コンクリート造建物の全体像をほぼ網羅していると判断できる。

表4 本論文で扱う被害調査建物数と統計資料の関係

区名	調査棟数		記載棟数	
	全ての建物 文献2+3	清水組以外 文献2	東京市調査 文献4	東京府調査 文献5
	鉄筋コンクリート構造			其他
麹町区	76	70	116	277
神田区	74	72	21	21
日本橋区	92	77	83	83
京橋区	82	77	38	225
芝区	29	29	38	38
麻布区	3	3	31	31
赤坂区	12	12	7	7
四谷区	14	13	3	3
牛込区	10	10	12	15
小石川区	29	27	23	23
本郷区	21	21	10	31
下谷区	18	18	6	6
浅草区	32	30	4	4
本所区	31	29	13	13
深川区	50	49	22	75
合計	573	537	427	852

表5 東京市における建物数(東京府調査 文献5)

都市区名	棟数	土蔵	煉瓦造	石造	木造	其他
東京市						
麹町区	16,498	152	570	69	15,430	277
神田区	22,683	3,584	526	122	18,430	21
日本橋区	26,269	5,818	753	190	19,425	83
京橋区	26,332	2,591	1,623	342	21,551	225
芝区	29,656	1,214	481	168	27,755	38
麻布区	15,177	507	200	57	14,382	31
赤坂区	12,259	411	111	39	11,691	7
四谷区	12,073	550	55	48	11,417	3
牛込区	19,957	693	133	43	19,073	15
小石川区	24,544	591	202	42	23,686	23
本郷区	22,654	937	296	69	21,321	31
下谷区	31,533	995	214	79	30,239	6
浅草区	34,882	2,415	263	149	32,051	4
本所区	34,488	1,007	375	145	32,948	13
深川区	27,970	1,193	1,055	77	25,570	75
計	356,975	22,658	6,857	1,639	324,969	852

北澤⁶⁾、大崎⁷⁾、武村⁸⁾らにより集計された鉄筋コンクリート造建物数との比較を表6に示す。本論文では、鉄筋コンクリート造として分類された建物から詳細資料により別構造とみなせるものを除き、一方で同一建物とされていても明らかに別棟とわかるものは算入したことなどにより、ほぼ同一の資料に基づいた他の研究とは若干の差がある。大崎の資料で合計棟数が多いのは、本論文の資料に加えて、警視庁保安部建築課および震害調査委員会発行の資料による建物が算入されているためと考えられる。

表6 調査建物数の比較 (文献6, 7, 8)

都市区名	筆者	北澤	大崎	武村
麹町区	65	65	78	72
神田区	74	73	79	73
日本橋区	87	82	97	88
京橋区	77	73	82	82
芝区	27	25	43	27
麻布区	3	13	14	3
赤坂区	12	12	19	12
四谷区	14	10	20	12
牛込区	10	10	21	10
小石川区	29	26	41	29
本郷区	21	21	35	21
下谷区	16	18	21	18
浅草区	32	29	41	33
本所区	29	29	43	29
深川区	51	30	57	34
計	547	516	691	543

3.3 被害調査記録による鉄筋コンクリート造建物の被災度評価

複数の被害調査資料を合わせて検討するためには、被害程度や被害状況を表す被災度の分類を整合させる必要がある。清水組資料では、第一篇第一章の冒頭に、構造種別にかかわらず、震災による被害程度を①被害なきもの、②被害あるもの、③全潰するもの、に分類しており、これに加えて修繕可能性の程度により④小修繕を有するもの、⑤大修繕を有するもの、⑥使用不可能なもの、としている。また、第二編第六章の鉄筋コンクリート造建物の被害では、被害程度を①被害なし、②小破・被害軽微、③大破、④全・半潰の4段階で分類している。一方、震災予防調査会報告では第一章の冒頭の表において、①無被害、②小破損、③大破損、④半潰、⑤全潰の5段階に分類されている。

これらの関係を考察するに当たり、被害程度の定義や分類は時代と共に変化してきていることを踏まえて、被災度分類の変遷を確認するために、当時から最近までの被害調査資料における鉄筋コンクリート造建物の被災度の定義を検討した^{9), 10), 11)}。

1925年但馬地震において、今村¹²⁾、谷口¹³⁾は、鉄筋コンクリート造の被害を木造被害の分類である全潰、半潰、破損に対応付けている。ただし実際には鉄筋コンクリート造は無被害、または小破損程度であり、被災度の分類が有効であるか判断できない。1948年福井地震における日本建築学会の被害調査報告では、鉄筋コンクリート造の被災度分類は大破、中破、小破、無被害の4段階としている¹⁴⁾。また、1968年十勝沖地震では、鉄筋コンクリート造に関して倒壊(全壊または半壊)、大破、中破、小破、無被害の5段階で評価を行っている¹⁵⁾。1978年の宮城県沖地震被害調査では、3つの異なる調査方法が適用されている¹⁶⁾。1985年の総合技術開発プロジェクト¹⁷⁾では、地震被災後の建物について迅速かつ安全に対応するため、

部位別の損傷度(5段階)に基づいて層の被災度区分を軽微、小破、中破、大破、倒壊の5段階としている。また、日本建築防災協会の指針(1991)では、上記検討結果を踏まえて5段階の被災度が示されている¹⁸⁾。1995年兵庫県南部地震においては、1978年宮城県沖地震における構造的被災度ランクに沿って鉄筋コンクリート造の被災度が評価されており¹⁹⁾、5段階とみなすことができる。

3.4 調査建物の被災度評価

以上の検討に基づいて、本論で扱う資料の被災度について検討し、現在一般に使われる区分との整合を試みる。清水組資料における4段階(被害なし、小破・被害軽微、大破、全・半潰)について、各建物で表2に示す詳細調査項目に関する被害記述との対応を確認した。結果として、全、半潰は、その部分または全体が修繕不可能なもの、また、小破、被害軽微は小修繕が必要なレベルであり、大破は大修繕が必要な状況と判断している。これらを兵庫県南部地震の調査における被災度区分(括弧内)と対応付けると、おおむね①被害なし(軽微、無被害)、②小破・被害軽微(小破)、③大破(中破、大破)、④全・半潰(倒壊)となる。この区分では現状の中破と大破の区別はされていないが、修繕方法により小破と大破の被害状況を区分することは経験的に判断しやすい。

以上から被災度の定義は清水組資料を基本とし、4段階で評価することとした。震災予防調査会報告については、清水組資料と整合をとるため、同一建物について両資料により調査された建物について相互の記述を比較評価し、被害の記述については矛盾がないことを確認した。そこで、表7のキーワードをもとに4段階に被害程度を分類した。

表7 被災度評価に用いたキーワード

被災度	キーワード
被害なし	「被害ヲ認メズ」、「震害ヲ認メズ」、「震害ナシ」、「被害極メテ軽微」
小破・被害軽微	「(軽微ナル)亀裂」、「小破損」、「被害軽微」、「震害軽微」、「数多ノ小亀裂」
大破	「大(ナル)亀裂」、「大破スル」、「数多ノ亀裂」、「甚シキ亀裂」、「傾斜」、「基礎ノ(不同)沈下」、「フェール」、「クラッシュ」
全・半潰	「全潰」、「崩壊」、「半潰」、「部分倒潰」、「一部崩壊」、「辛ジテ全潰ヲ免ル」

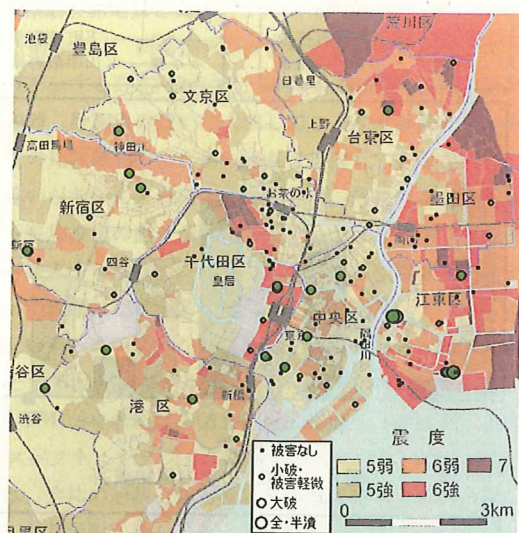
関東地震における被災度の調査分析では、北澤^{6), 20)}、および大崎⁷⁾が、それぞれ地域毎の建物被害一覧を示している。また、武村²¹⁾は震災予防調査会報告の調査結果を用いて、被害の記述や写真をもとに、①全半潰、②大亀裂や一部倒潰など大破損、③壁に亀裂程度の破損、④軽微な被害も含め無被害、⑤震災の被害の程度不明、の分類を行なっている。これらは本論文の分類におおむね対応すると考えられる。

4. 鉄筋コンクリート造建物の被害の地域特性

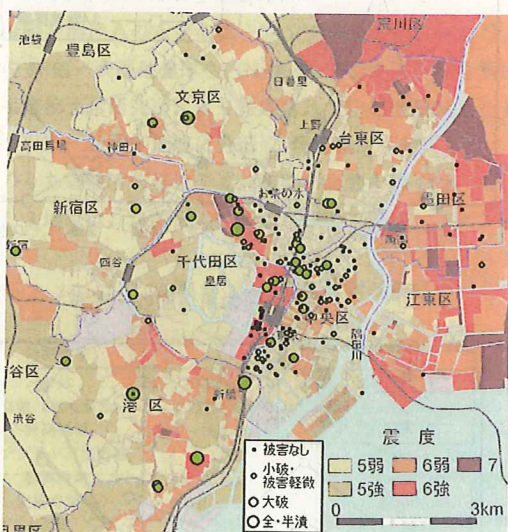
前章で考察した被災度に基づいて、鉄筋コンクリート造建物の被害の傾向を検討する。特に地域による被害の相違に注目し、木造被害地域とも比較している。

4.1 調査建物の地域分布

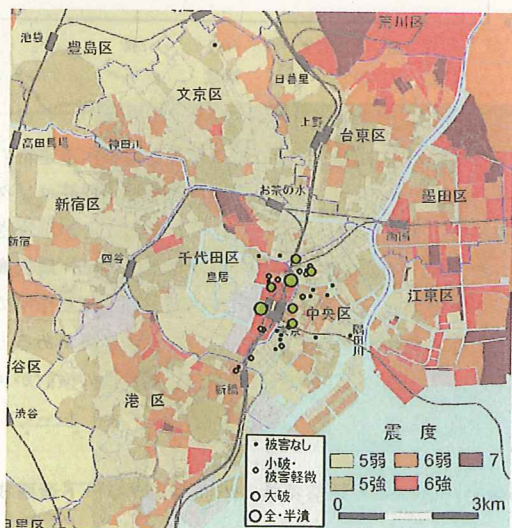
まず、調査資料にある建物の地域分布について検討する。清水組資料、震災予防調査会報告に記載された建物について、資料にある



(a) 1, 2 階



(b) 3, 4 階



(c) 5 階以上

図2 鉄筋コンクリート造建物の階数別の被害分布

所在地を当時の地図で調べ、現在の地図や現存する当該建物と対応付けて位置を特定し²²⁾、緯度・経度を読み取ってGISで扱うデータとした。図2にそれらの位置分布を階数ごとにプロットしている^{注1)}。なお図2は次節で述べるように被害の程度を「○」の大きさで表し、図の背景には武村²¹⁾による「1923年関東地震による旧東京15区の震度分布(木造住家被害を中心に)」を重ねて示している。

図3に区ごとの鉄筋コンクリート造建物棟数を階数別に示す。また図4に建物用途ごとに建物棟数を階数別に示す。調査資料には工場、事務所、商店、住宅、病院、学校、倉庫、観物場、公共、其他の10項目に分類されており、ここでは建物数や構造概要などを考慮して、主たる用途として8つのグループに分けた。建物用途は建物階数、平面計画などに関連し、建物被害を分析する上で貴重な情報と考えられる。

図2から、1, 2階建の建物は対象とした旧東京市域全域に分布しているが、特に深川区に多いことが特徴的である。これらは、ほとんどが工場、倉庫である。3, 4階建は麹町、神田、日本橋、京橋の各区に多く、ほとんどが事務所である。5階以上の建物は、麹町、日本橋、京橋区にあり、特に東京駅周辺の丸の内、八重洲、日本橋地区に集中している。当時で言えば高層ビルであり、規模の大きな事務所がほとんどを占めている。

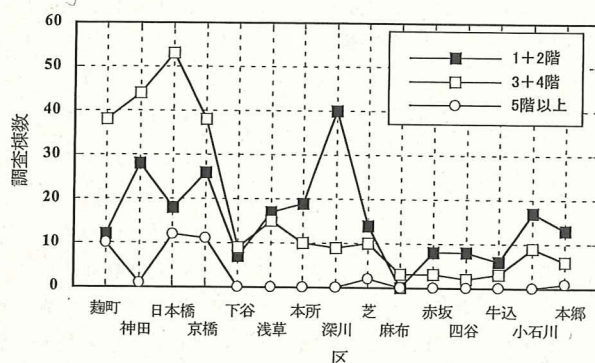


図3 区ごとの調査建物棟数

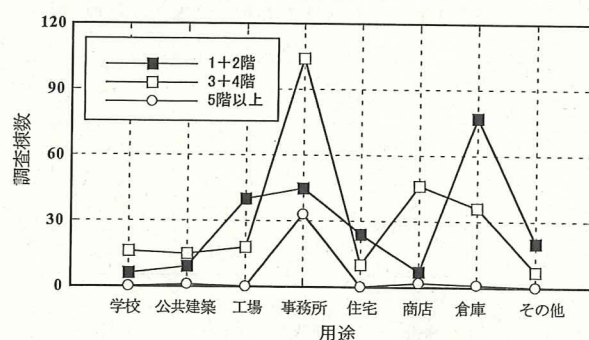


図4 建物用途別の調査建物棟数

4.2 被害建物の地域分布

建物の被害状況の地域分布を示すため、図5に区毎の被害率を階数別に示す。隅田川以東に位置する本所区、深川区に着目すると、深川区では1, 2階建の建物は40棟(図3)で被害率は15.8%だが、本所区では19棟、5.2%である。この地域の1, 2階建の被害は全て工場であり、本所区の1, 2階建は事務所が多いため、その分布の違いが両区の差となったと考えられる。工場の被害は、いずれも桁

行方向に長い外壁が倒壊する点が共通している。3 階建以上は建物数が少ないため、被害率の信頼性は高くない。

麹町、神田、日本橋、京橋各区は3、4 階建以下の建物棟数も多い。各区とも建物棟数が30 棟を超える3 階建に着目すると、被害率は麹町 6.9%、神田 9.7%、日本橋 13.5%、京橋 8.7%と、ほぼ同様の割合となっている。これらの被害建物の用途は様々なものが混在しており、区による差も特に認められない。

山手地域については、区別に考察するには建物数が少ないため、全体をまとめて山手と下町の比較を行う。大破、全・半壊の建物の棟数と被害率をそれぞれ棒グラフと折れ線グラフにして図6 に示す。下町は麹町区の東半分、神田区、日本橋区、京橋区、下谷区、浅草区、本所区、深川区であり、一方、山手は麹町区の西半分、芝区、麻布区、赤坂区、四谷区、牛込区、小石川区、本郷区を含めた。鉄筋コンクリート造の全建物数は、下町 421 棟、山手 126 棟である。

図6 から、2 階から4 階建では山手のほうが被害率がかかなり大きくなっている。5 階建以上は山手にはごく少数であり、比較できない。一般に木造住宅では下町のほうが被害率が高いとされるが、鉄筋コンクリート造では階数により逆の傾向になることがわかる。

次に、図7 に建物用途ごとの被害率を示す。4 階建以下で建物棟数が50 棟を超えるものは、工場 58 棟、事務所 188 棟、商店 55 棟、倉庫 114 棟となっている(図4)。これらのうち大破以上の被害率は工場が最も大きく、3、4 階建では30%を超えている。一方、事務所と倉庫は10%を下回っている。これらの差を個別建物の記述から検討すると、事務所や倉庫は住宅・商店や工場などに比べて整形な構造が多く、壁量や開口からも耐震性に有利な傾向があったためと考えられる。

以上の鉄筋コンクリート造の被害傾向を、既往の研究による木造建物の被害分布との関係で考察する。階数別にみた鉄筋コンクリート造建物の被害率と、武村らによる木造建物被害に基づく震度との関係を図8 に示す。震度7 地域での被害率はほぼ定義のとおり30~50%に達しており、明確に大きい。震度5 弱から6 強までは必ずしも震度に対応して被害率が大きくなっていない。

隅田川以東を中心とした震度の大きい(木造建物被害の多い)地域では、鉄筋コンクリート造建物の大きな被害は少ない。この地域にある建物はほとんどが低層で、5 階建以上はなく、大破以上の被害を受けた建物は101 棟中の僅か8 棟で、すべて工場である。他の地域に比べても被害率は低い。

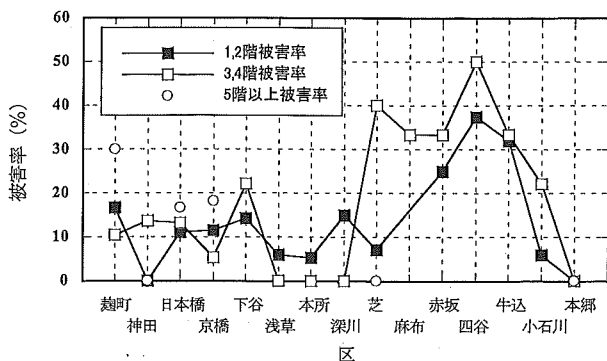


図5 区ごとの建物被害率

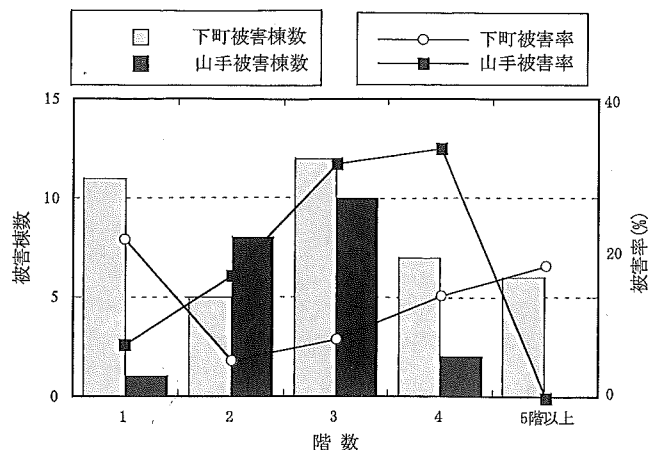


図6 下町、山手の建物被害

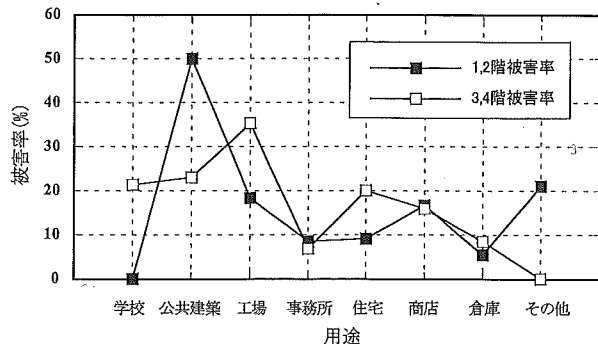


図7 建物用途別の被害率

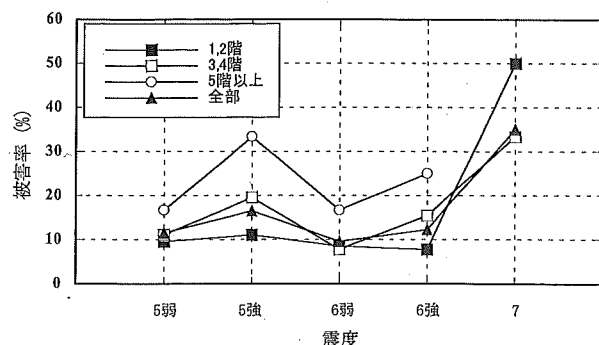


図8 震度強さと被害率の関係

これらの結果から、ほぼ同様の構造特性を持つ木造建物の被害から評価された震度分布は、多様な周期特性を持つ鉄筋コンクリート造の被害とは必ずしも整合しない可能性があることが示唆される。鉄筋コンクリート造の被害傾向の分析に当たっては、建物高さ(固有周期)と地盤条件(表層地盤の卓越周期、動的相互作用効果)などに基づく応答特性の差に着目した分析を行う必要があると考えられる。そのうえで個別建物の記載に基づく耐震性の検討が可能になると考えられる。

5. 常時微動計測による地盤特性と鉄筋コンクリート造建物被害の関係

前章の考察を受けて、旧東京市域で新たに50 地点以上の常時微動計測を行うとともに、周辺の地盤ボーリングデータを収集した。これより地盤特性と周期特性、さらに震度分布との関係を分析し、鉄筋コンクリート造建物の階数による被害分布と対応付けて検討を行う。

5.1 常時微動計測地点と概要

常時微動計測は、関東地震の被害調査資料と対応付けて、旧東京市域をカバーする計 53 地点で行った。計測概要を表 8 に示す。計測期間や機器、計測者の違いで大別して 3 通りの計測結果があるが、測定精度の比較確認のため同一地点で重複して測定を行い、相互に大きな違いがないことを確認している²³⁾。機材により、関東平野で卓越する長周期側の感度が必ずしも十分ではない場合があるが、本論文で対象とする鉄筋コンクリート造の被害や震度分布を評価するにあたって問題はないと考えられる。

計測記録から車両通行などの明確なノイズ部分は除き、水平 2 成分合成と上下動のスペクトルをアンサンブル平均で推定した後に H/V スペクトルを求めた。図 9 に全計測地点の位置と、主な測定点の H/V スペクトルをデジタル標高²⁴⁾と共に示す。H/V スペクトルについては、全体の形状（長周期側と短周期側のピークの有無やピーク高さ）から地盤特性を、それぞれ検討している。

5.2 H/V スペクトルの特徴と地域分布

常時微動計測地点の近傍のボーリングデータを収集し²⁵⁾、表層地盤の平均 N 値、表層地盤厚さ（N 値 50 までの深さ）を算定した。また、東京都土木研究所により整理されている表層厚さを基に、対象地域を以下に示す 5 地域に分類し、測定地点と対応させた。なお、測定点のうち近接する崖地や高速道路の影響を強く受けていると判断された 3 地点は、この後の分析から除いている。

表 8 常時微動計測の概要

計測番号	1	2	3
日付	2008/7/25, 26	2008/12/14	2008/12/13, 14
地点数 (地点番号)	33 (1~33)	15 (34~48)	11 (50~60)
計測機器	MicOn	T-seis	速度 5 秒計
サンプリング振動数	100Hz	100Hz	100Hz
計測時間	10 分	10 分	10 分, 13 分, 30 分
実施時間帯	日出～日没後	日出前～夕方	夜間, 日出前～日没後
天気	晴れ	雨のち晴れ	晴れ, 雨のち晴れ

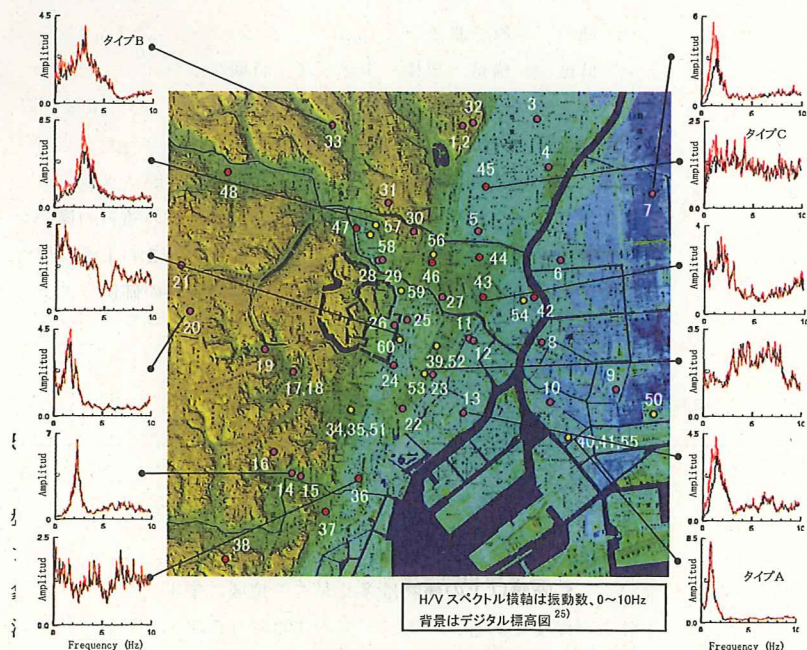


図 9 常時微動計測地点と H/V スペクトル形状

①山手台地

(1,2,16,20,21,30,31,32,38)

②山手の中で低地

(14,15,19,33,34,35,36,48)

③丸の内周辺

(24,25,26,28,29,37,51,59,60)

④銀座、日本橋、浅草など下町で沖積層が薄い地域

(3,4,5,11,22,23,27,39,43,44,45,46,47,52,53,56,57,58)

⑤隅田川以東、および隅田川周辺の低地

(6,7,8,9,10,13,40,41,42,50,54,55)

地域分類と計測地点における表層地盤層厚との関係を図 10 に示す。地点によりばらつきはあるものの、おおむね表層地盤の層厚によりグルーピングされていることがわかる。

次に H/V スペクトルの分析を行う。まず形状の特徴²⁶⁾を詳細に検討し、ピークの形状が明確な地点をタイプ A、ピークは明確であるものの裾野が広い形状を示す地点をタイプ B、ピークが明確ではなく平坦な形状の地点をタイプ C と分類した。図 11 にこの分類の地域毎の分布を示す。

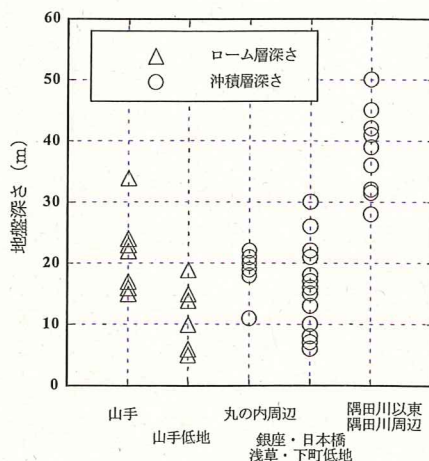


図 10 測定地点と表層地盤層厚の関係

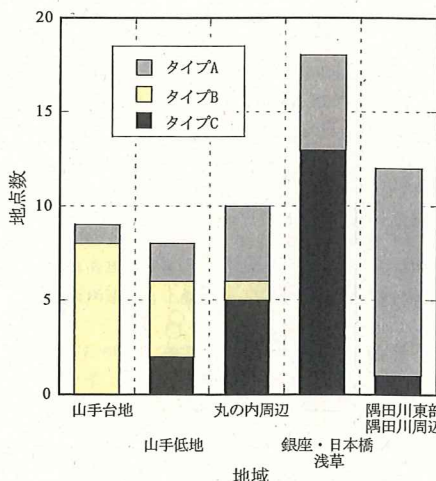


図 11 地域別の H/V スペクトルタイプ地点数

山手の地点はほとんどがタイプBとなり、図9も参照すると比較的短周期側にピークがある。一方、隅田川以東はほとんどタイプAで、長周期側に鋭いピークがある。その間の山手台地から隅田川の地域では、スペクトル形状は平坦となる地点が多く、卓越振動数のピークが明確でない傾向が見られる。これは表層と基盤のコントラストがはっきりしていないことを示している。H/V スペクトルのピークが明確な地点でピーク位置から卓越振動数を求め、地域ごとの分布を図12に示す。卓越振動数は山手台地では2~6Hz、丸の内周辺にかけて低下し1~2Hz、銀座、日本橋、浅草にかけて2Hz前後でやや高く、隅田川以東で1~1.5Hzともっとも低くなっている。沖積層厚が20m以上の地点に着目すると、隅田川以東の地点(6,7,8,9,10,40,41,50,55)および浜町周辺(42,54)のH/Vスペクトルには、それぞれ0.9~1.2Hz付近に明確なピークが見られ、ボーリングデータから概算した卓越振動数もおおよそ一致している。

地盤資料から各地点の平均N値(N値50までの地盤各層のN値の層厚重み付け平均)を求め、卓越振動数との関係を図13に示す。平均N値が増加するほど卓越振動数は高くなる傾向が明確である。

以上のように、ここで用いた5地域の分類について、H/Vスペクトルと地盤資料から、表層地盤の層厚や卓越振動数に明確な特徴があることがわかる。一方、武村ら²¹⁾により木造被害から推定された震度分布を見ると、震度6弱以上の地域は今回分類した山手低地、

丸の内周辺、隅田川以東・隅田川周辺の各地域に多く、震度5以下は、山手、銀座・日本橋・浅草地域に分布する。地震動の周期1秒前後の成分が震度や木造住宅の被害に影響すること、強震時は常時微動での地盤卓越振動数より低下する可能性などを考えると、武村らの震度分布と図12はおおむね整合する。一方、本論文の主目的となる鉄筋コンクリート造建物については、高さ(階数)や用途などにより固有周期が大きく異なるため、木造住宅被害から推定した震度分布を建物被害に関連する指標とすることは必ずしも適切ではなく、本節で検討した地盤卓越振動数なども参照する必要がある²⁷⁾。

5.3 鉄筋コンクリート造建物被害分布と地盤特性の関係

分類した5地域ごとの被害棟数を図14に、建物被害率を図15に示す。4章でも述べたように、隅田川以東では1,2階の低層工場建物の数棟の被害(8,9近傍)があるのみで、震度が大きい地域にしては顕著な被害が認められない。これは、この地域の鉄筋コンクリート造建物は低層がほとんどで、建物の固有周期が地盤の卓越周期とは異なることによるものと推察される。H/Vスペクトルの形状がタイプAの場合は、かなり狭い周波数で明確な表層の地震動増幅が予想され、工場など、桁行方向に長く張間方向に繋ぎ梁の少ない建物にのみ被害が生じていることも、これを裏付けている。

一方、山手台地ではH/Vスペクトル形状はタイプBが多く、ロームの表層で比較的短周期(数Hz)の成分が増幅される。この地震動増幅特性は、木造住宅の被害が少ないことと対応している。一方、鉄筋コンクリート造では3~4階(高さ10数メートル)の建物で被害が多い傾向があり、これらの固有振動数が数Hzであること整合する。

山手低地は、木造の被害が多かった地域である。H/Vスペクトルは2Hz前後のピークが多く、台地よりやや振動数が低い。鉄筋コンクリート造の被害傾向は、山手台地と同様に3~4階で被害率が大きくなっており、一方で1~2階の被害はほとんどない。これは固有振動数が地盤卓越振動数より高いこと、壁が多く耐力があり、弾性変形が少ないこと、さらには地盤との相互作用による逸散減衰の効果などの理由と推察される。

山手低地で、構造、規模、用途、竣工時期などがほぼ同じ2棟の建物(博文館印刷工場、精美堂印刷工場)が近接した地点にあり、前者は倒壊したのに対し、後者は内部に一部亀裂などがあるだけで軽微な被害にとどまった。これらの詳細な被害状況が清水組資料に記録されており、鉄筋の構成、帳壁構造、基礎地盤の傾斜の違いなどが被害程度の相違に関係したことが推察される。このような個別建物の構造詳細に基づいた被害分析は、清水組資料の価値を考える上できわめて重要であり、稿を改めて検討する予定である。

丸の内周辺と銀座・日本橋・浅草地域では、H/Vスペクトル形状はピークが不明確なタイプCが多く、卓越振動数は1~2Hz程度である。丸の内が古くからの入り江であるのに対し、銀座・日本橋・浅草周辺は自然堤防で卓越振動数もやや高めである。木造被害から推定した震度でも丸の内周辺が銀座・日本橋・浅草地域に比べ大きい。鉄筋コンクリート造では2階建以上で被害率にほとんど差はない。5階建以上の建物は多くがこの地域に集中しており、被害率は2割程度である。一方、平屋の建物では銀座・日本橋・浅草地域の被害率が顕著に大きくなっており、原因として表層地盤の特性

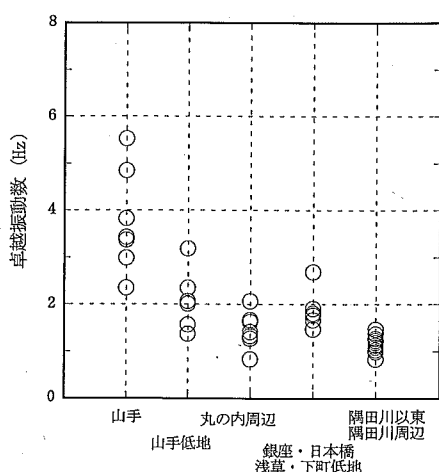


図12 地域別の卓越振動数の分布

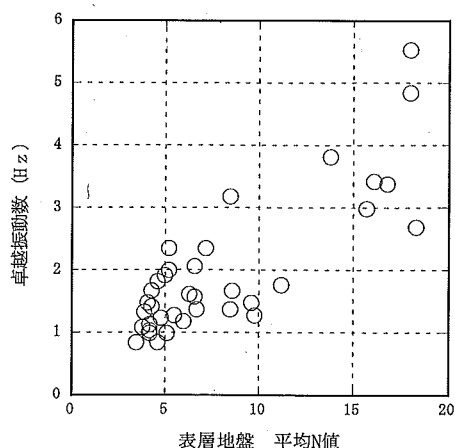


図13 測定地点における平均N値と卓越振動数の関係

に加えて建物用途による構造特性の影響（例えば商店建築で壁が少ないなど）の可能性もある。

以上のように、木造住宅の被害をベースにした震度分布と、H/Vスペクトルの形状の特徴や卓越振動数から、建物被害性状と地盤特性の関係を評価する上で有用な知見が得られたと考える。

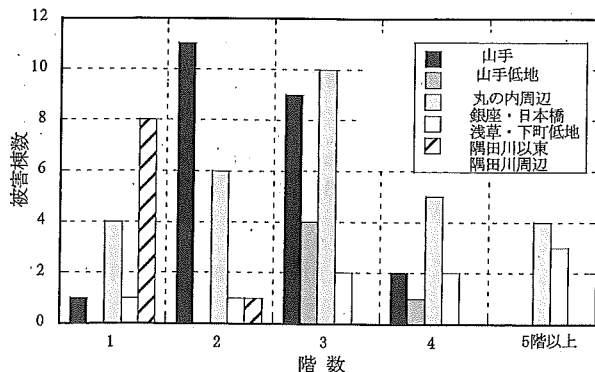


図 14 地域毎の階数別被害棟数

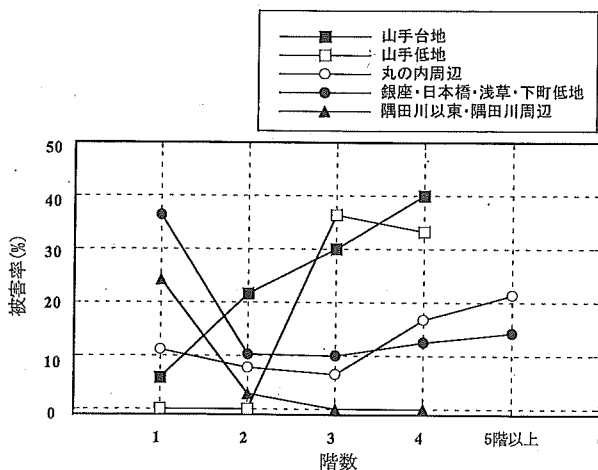


図 15 地域毎の階数別被害率

6. 結論

本論では、1923 年関東地震における鉄筋コンクリート造建物の被害について、清水組が当時行った調査資料を新たに用い、その内容を詳細に分析した上で、震災予防調査会の資料と合わせて被害性状の分析を行った。結論として得られた内容をまとめると以下のようになる。

- 1) 清水組資料と震災予防調査会報告による調査建物数は、重複を除いて 574 棟であり、当時の行政による統計資料などから旧東京市域の鉄筋コンクリート造建物のほぼすべてを網羅していることを確認した。また両資料の特徴と関係を明らかにした。
- 2) 清水組資料の詳細な記載から、そこで用いられた 4 段階の被災度分類の意味を確認した。また、震災予防調査会報告も含む全調査対象建物の被災度を、被害の記述から 4 段階に分類・整理した。また、当時の住所をもとに地図上の位置を特定し、調査建物と被害の分布を明らかにした。
- 3) 2)の結果に基づき、調査建物と被害の傾向を詳細に分析し、建

物立地地域、階数、建物用途による被害の特徴を明らかにした。その際に、個々の建物に関する詳細な被害報告を参照しつつ検証した点に特徴がある。結果として、鉄筋コンクリート造建物の被害状況は、階数により地域分布が大きく異なること、木造建物被害に基づいて推定された震度分布とは必ずしも整合しないことなどを示した。

- 4) 3)の結果は建物と表層地盤の周期特性の関係に起因すると考え、新たに 50 地点以上で常時微動観測を行うとともに、地盤資料を収集した。H/V スペクトルの形状とピーク振動数が地盤資料と対応することを示した上で、鉄筋コンクリート造建物の被害特性と地盤条件との間に強い関連が認められることを指摘した。

以上の結果より、当時の鉄筋コンクリート造建物の関東地震における被害の実状を、地盤特性との関係で明らかにすることができたといえる。これは、当時の鉄筋コンクリート造建物の被害と耐震性能に関する有益な資料となることはもちろん、東京中心部の地盤性状と地震動特性の関係を検証するための知見としての意味もある。今後、特に清水組資料に含まれる詳細な被害に関する記述について、応答解析などを用いて検討することで、本論文の結果を再検証し、歴史的建物の保存や都市の地震被害評価に結びつく知見を目指したい。

謝辞

本研究にあたり、武村雅之氏および諸井孝文氏（鹿島建設小堀研究室）から関東地震の推定震度分布に関する貴重なデータを提供して頂きました。また、福元俊一氏（株式会社東京ソイルリサーチ）には、東京都の地盤構造に関する貴重なデータを提供して頂きました。以上、記して感謝申し上げます。また名古屋大学大学院准教授・護雅史先生には、ご多忙の中、常時微動測定をはじめ、様々な視点からのご指導いただきました。心より感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 武村雅之：関東大震災 大東京圏の揺れを知る，鹿島出版会，2003.
- 2) 永田念郎：鉄筋コンクリート造被害調査報告，震災予防調査会報告，第 100 号（丙）下，pp. 211-330，1925.
- 3) 合資会社 清水組設計部：大正十二年九月一日 関東地方大震災火災による建物の被害調査，1924. 11
- 4) 東京市：東京市統計年表 第 19 回，東京市役所，pp. 56-129，1923.
- 5) 東京府：東京府統計書 大正 11 年，東京府，pp. 62-76，1924
- 6) 北澤五郎：東京下町の震度分布，地震，地震学会，第 3 巻第 1 号，1950.
- 7) 大崎順彦 国安瑠子：鉄筋コンクリート造建物の震害と地盤—関東地震による被害の再検討—，日本建築学会論文報告集，第 148 号，pp. 33-39，1968.
- 8) 武村雅之：1923 年関東地震による旧東京市内での各種構造物の被害と震度，日本建築学会構造系論文集，577 号，pp. 153-159，2004. 3
- 9) 大橋雄二：日本建築構造基準変遷史，財団法人日本建築センター，1993
- 10) 佐野利器：家屋耐震構造論 上編，震災予防調査会報告，第八十三号（甲），1914
- 11) 宮腰淳一，林康裕，福和伸夫：建物被害データに基づく各種の被災度指標の対応関係の分析，構造工学論文集，pp. 123-134，2000. 3
- 12) 今村明恒：但馬地震調査報告，震災予防調査会報告，第 101 号，1927
- 13) 谷口 忠：但馬地震調査報告，震災予防調査会報告，第 101 号，1927
- 14) 日本建築学会 北陸震災調査特別委員会：昭和 23 年福井地震震害調査報告 II 建築部門，日本建築学会，1951

- 15) 日本建築学会：1968年十勝沖地震災害調査報告，1968
- 16) 日本建築学会：1978年宮城県沖地震災害調査報告，1980
- 17) 建設省建築研究所：被災度判定基準，昭和59年度総合技術開発プロジェクト震災構造物の復旧技術の開発報告書，1985.3
- 18) (財)日本建築防災協会：被災建築物の被災度判定基準および復旧技術指針，1991
- 19) 日本建築学会：阪神・淡路大震災調査報告 ①鉄筋コンクリート造建築物，1998.5
- 20) 北澤五郎：木造被害調査報告，震災予防調査会報告100号丙上，pp.1-53，1926.
- 21) 武村雅之：1923年関東地震による東京都中心部（旧15区内）の詳細震度分布と表層地盤構造，日本地震工学会論文集，第3巻，第1号，pp.1-36，2003.
- 22) 近藤和吉：古地図ライブラリー別冊 古地図・現代図で歩く 明治大正東京散歩，人文社，2003.
- 23) 飛田潤，福和伸夫，佐武直紀，原徹夫，太田賢治，小出栄治：地盤・建物振動特性の現地簡易評価のための常時微動観測分析システムの開発，日本建築学会技術報告集，第15巻，第29号，pp.61-64，2009.2
- 24) 国土交通省 国土地理院 航空レーザー測量
http://www1.gsi.go.jp/geowww/Laser_HP/digital_image.html（参照2009-01-15）
- 25) 東京都土木技術センター 「東京の地盤（Web版）」
<http://doboku.metro.tokyo.jp/start/03-jyohou/geo-web/00-index.html>（参照2009-01-15）
- 26) 中村仁，福和伸夫，高橋広人，飛田潤，堀啓輔：常時微動計測に基づく名古屋地域の地盤震動特性と地盤構造推定に関する研究，構造工学論文集，pp.413-421，2000.3
- 27) 境有紀，額綱一起，神野達夫：建物被害率の予測を目的とした地震動の破壊力指標の提案，日本建築学会構造系論文集，555号，pp.85-91，2002.5

注

- 注1) 林 章二，牧原慎一郎，倉田和己，福和伸夫，飛田潤：1923年関東地震の被害分析支援用ウェブ-GISの開発，日本建築学会技術報告集，第32号，2010.2（掲載予定）

（2009年3月10日原稿受理，2009年11月6日採用決定）