地震時における構造被害・室内被害の分布特性
およびその評価に関する研究ESTIMATION OF DISTRIBUTION CHARACTERISTICS OF STRUCTURAL
OR INDOOR EARTHQUAKE DAMAGE IN URBAN AREA

北原 昭男*, 藤原 悌三**

Akio KITAHARA and Teizo FUJIWARA

This paper presents distribution of structural damage or indoor damage of houses (including overturning of furniture, scattering in the room and so on) in the city area as to earthquake damage of the 1993 Kushiro-oki Earthquake. The estimation method which has been developed for structural or indoor damage was also adopted into the damage in Kushiro City. Structural damage occurred on the diluvial plateau and there was few damage on the alluvial soil. On the other hand, indoor damage occurred severely in some area and its distribution characteristics was very complicated. Distribution of structural and indoor damage were strongly affected by the dynamic characteristics of surface soil with the exception of the damage by soil failure. General tendency of the damage distribution was reappeared by this method, however.

Keywords : damage distribution, structural damage, indoor damage, the 1993 Kushiro-oki Earthquake, urban area, damage estimation

被害分布、構造被害、室内被害、1993年釧路沖地震、都市域、被害推定

1. はじめに

都市防災の観点から都市建築物群の耐震対策や都市耐震計画を策定していくためには、構造被害などの直接被害を対象とするだけではなく、生活困窮や経済的困窮などの間接的な被害を考慮することが重要である。そのためには居住空間としての機能が地震によってどの程度失われていくかを評価していく必要がある。また、空間機能の損失に関連する2次被害としては火災や負傷者の発生、避難不可能な事態の発生などが考えられるが、これらは室内の散乱に起因するものが多いことが明らかにされており¹⁾、間接被害を評価するためにはまず地震時における室内の散乱状況を正確に評価することが必要不可欠である。

1993年1月15日に発生した釧路沖地震では、港湾や道路・鉄道において強い地震動による崖くずれ・地滑り・液状化などの地盤変状に起因する被害が多数発生した。建築構造物についても、大きな被害の大半はこの地盤変状によるものであり、地震動の加速度レベルが高

かったにもかかわらず振動による構造的な被害は小さかった²⁾。一方、家具の転倒や室内の散乱については多くの地域で発生し、これにより多くの負傷者が発生したことが報告されている³⁾。しかし、このような室内における被害を直接調査することは難しいため、筆者らは釧路・十勝支庁の建築士会の会員を対象にアンケート調査を行い、被害の傾向を明らかにすることを試みた。

釧路沖地震による釧路市域における被害の特徴は、様々な地質・地形を持つ比較的限定された地域において、構造被害や室内被害などの様々な被害が発生していることであろう。都市域における建築構造物群の地震被害推定を行なうためには、被害の地域的な発生状況・分布特性を明らかにし、入力地震動の特性、地盤条件および構造物の条件と被害との関係を捉えていくことは不可欠であり、このためには本地震による被害データは非常に有益であるものと考えられる。

本研究では釧路沖地震による釧路市域における住家被害を対象として、上記アンケート調査によって得られた

本論文の一部は、文献2)で既に発表した内容に加筆・修正を行ったものである。

* 京都大学防災研究所 助手・工修

Research Assoc., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., M. Eng.

** 京都大学防災研究所 教授・工博

Prof., Disaster Prevention Research Institute, Kyoto Univ., Dr. Eng.

資料および釧路市などによりまとめられた被害統計資料をもとに、構造的被害・室内被害の地域分布についてその特徴を明らかにした。また、筆者らはこれまでに、建築物群の構造被害および室内における被害を物理的なモデルに基づき、様々なレベルの被害を統一的に評価することを試みてきた^{4) - 6)}。ここではこの地震被害推定手法を用いて構造的被害や室内被害を推定し、実際の被害分布との比較により推定精度の検証を行う。また、以上の被害分布特性に関する推定結果と実際の被害の比較を基に、建物の構造被害・室内被害に影響をおよぼす要因（建物の種別や耐力、表層地盤特性など）についての考察を行った。

2. アンケート調査による構造被害・室内被害の分布

2.1 アンケート調査の概要

アンケート調査は京都大学防災研究所、広島大学総合科学部、広島工業大学工学部のメンバーからなる調査チームにより、北海道建築士会釧路支部、同十勝支部の会員を対象として郵送によって行われた。調査内容には、自宅における構造的被害（建物全体・構造各部）・室内被害（家具の転倒・室内散乱・負傷・避難・火災発生など）を初め、勤務先の建物被害、建物の補修・補強等、ライフラインの被害とその影響、生活支障などに関する項目が含まれている。本論文では、これらのうち釧路市域（釧路市および釧路町）の住家における構造被害および室内の被害についてのみ取り上げる。なお、アンケート調査の総合的な結果・考察についてはできるだけ早い機会にまとめる予定である。

釧路支部へのアンケート配布数は349件で、160件（回収率45.8%）の回答が寄せられた。この内釧路市域に住家があるのは151件であった。釧路市は一般に図1中に太い実線で示した7つの地区に分けられる。

本研究ではこれらの地区毎に結果をまとめるが、区域の広い春採、橋南、愛国、鳥取の各地区については、地形や地質条件などの変化をより詳細に考慮するためさらに2～3分割した。

図2には地区別の回答数及び、回答のあった住家の構造種別、建物種別、建物階数、建築年の分布を示す。回答のあった住家はほぼ各地区に分散しているが、橋北地区は業務地域であり夜間人口も少ないため、回答数は非常に少なかった。表1には回答数の地区別分布と平成2年度国勢調査による各

地区の世帯数の地区別割合を示す。両者を比較するとほぼ同じ値を示しており、回答の地域的なばらつきは少ないものと考えられる。

アンケートの結果から釧路市域の住家の特徴を記すと、建物種別では1戸建てが圧倒的に多く全体の76%を占めている。構造別では木造軸組工法によるものが多く、RC造は10%程度である。建物階数は2階建てが多い。また、建築年は比較的新しいものが多く、特に建築基準法の改正以後のものが約30%を占めている。

2.2 構造被害の地域分布

アンケートの結果をまとめるに先立ち、釧路市災害対策本部より得られた資料（1993年2月19日現在）

表1 アンケート回答数と国勢調査による世帯数の割合の比較

地区名	春採	橋南	橋北	鉄北	愛国	鳥取	大楽毛	全域
アンケート回答数	31	28	3	23	25	17	6	133
割合(%)	23.3	21.1	2.3	17.8	18.8	12.8	4.5	100
国勢調査による世帯数	17190	14040	3205	11966	12798	9296	5665	74160
割合(%)	23.2	18.9	4.3	16.1	17.3	12.5	7.6	100

図2 アンケートの回答における地区別、建物種別、構造種別、建物階数別、建築年代別の割合

図1 釧路市における地区区分

をもとに、釧路市内の各町ごと（緑ヶ岡・武佐については各丁目ごと）に一部壊以上の被害件数を求めた。さらにこれを各町（各丁目）の推定住宅戸数で割って被害率を求め、図3に示した。各町の住宅戸数は平成2年度の国勢調査の結果（各町の人口、住宅種別ごとの構成比など）を用いて推定した。崖崩れなどによって被害が多く発生した洪積台地上の緑ヶ岡6丁目では24.3%と最も高く、ついで同5丁目、武佐2丁目、材木町などで10%以上の値を示している。旧釧路川以東の地区は主に洪積台地上に存在するが、若松⁷⁾が示したとおり、被害の大きかった上記の地域では、以前谷であった部分を埋め立てた造成地が複雑に入り組んでいる。この様な人工改変された地盤が地震によって破壊し、構造物の被害につながったものと考えられる。その他の旧釧路川以東の地区では、橋南(南)の各町や武佐2丁目、貝塚など、台地の縁端部の地点で7%程度の値を示しているが、春採や桜ヶ岡などの地域では比較的小さな値となっている。

旧釧路川より西の地域では釧路川や旧釧路川などによる沖積平地が広がっている。被害率は、釧路駅南の北大通り周辺で11.8%と大きな値を示しているが、その他は比較的低い値であった。釧路川と旧釧路川間の地域

図3 釧路市内の一部壊以上の被害率（1993年2月19日現在）

図4 被害統計による地区別の被害率

では、被害率は旧釧路川に近いほど大きく、離れるにしたがって小さくなる傾向を示している。釧路市域における沖積層基底の等深度図を参照すると、基底は橋北地区で10～30m程度、釧路川近傍では70m程度と、基本的には西へ行くほど深くなっており、沖積層が厚くなるほど被害率は小さくなる傾向を示している。基盤地震動の卓越振動数が比較的高かったと考えられるため、軟弱層が薄い（固有振動数が高い）地盤における増幅率の方が大きくなった可能性が考えられる。また、美原・芦野や鳥取の北などの北部地域は釧路湿原に近く地盤は相対的に軟弱であるが、被害率は大きくはなかった。図4にはこれらの被害率を各地区毎に求めたものを示した。

図5には、アンケート調査による家屋全体の構造被害の分布状況を示す。全壊・半壊と評価された住家はそれぞれ1棟のみであった。また、一部壊と評価された住家については、各部位の被害状況を参照し、一部壊と軽微な被害に分類した。一部壊の住家は橋南(北、南)の台地縁端部に多く存在しており、被害統計との傾向は一致している。また、軽微な被害はかなり広い地域に分布している。図6には各地区毎の被害程度の割合を示す。一部壊以上の被害に関しては、被害統計（図4）と同様に橋南地区で他地区に比べて大きな被害率を示しているが、全般的にはやや大きめの値を示している。しかし、軽微な被害まで含めて被害発生率の分布をみると、アンケートの結果はほぼ図4と同様の傾向を示していることが読み取れる。母数は少ないものの被害分布の傾向をほぼ表現

図5 アンケート調査による構造被害の分布

図6 アンケート調査による構造被害の地区別割合

しており、回答数の分布と併せ考えると、本アンケート調査の一般性は十分にあるものと考えられる。

つぎに、建物各部の被害について各地区での被害発生割合を図7に示す。なお、これらの割合は、ひび割れ発生程度の軽微な被害も含めた被害発生率を示している。春採(北)、橋南(北、南)などの地区では、基礎・床の被害が多く発生しており、地盤変状によって被害が多く発生したことを示している。壁の被害は多くの地区で50%近く発生しているが、その多くは外壁のひび割れなどの軽微なものであった。煙突の被害は橋南(北)・春採(北)で多く発生したことが読み取れる。大楽毛地区では図6、図7共に周辺の地区と比べると、やや大きな被害を示している。

2.3 室内における被害の地域分布

室内の被害に関して、アンケートでは各家具の転倒・移動状況、散乱状況、負傷や火災の発生可能性、室外への避難状況、耐震対策等についての調査を行なった。ここでは、室内被害のうち家具の転倒・移動および室内の散乱の地域分布についてまとめた。各家庭の家具の転倒・家具や机上の物の移動(滑り)については各家具の転倒・移動状況より、室内の散乱状況については収納物の落下の程度、室内の散乱面積などのアンケート結果を用いて、レベル0(被害無し)から4(重い被害)までの5段階に評価することを試みた。各レベルの評価は表2に示した被害状況を目安として行なった。

これらの結果をもとに図8(a)には家具の転倒に関して、(b)には室内の散乱状況に関して、それぞれの被害の地域分布を示した。家具の転倒に関しては、レベル2以上の大きな被害は局所的に発生しており、その多くは湿原を埋め立てた場所や河川の縁などの地盤が軟弱であろうと考えられる場所で発生しているように見て取れる。また、洪積台地上の春採(西)にも被害が集中している。一方、橋南(北、南)や春採(北)では構造被害は大きかったが、家具は転倒しなかったケースも見られる。沖積地の西方(鳥取・大楽毛地区)では家具の転倒はほとんど発生していない。室内の散乱については洪積台地上

図7 アンケート調査による構造各部の被害の地区別割合

や湿原に近い地区で多く発生している。しかし、家具の転倒に比べると被害は全市域に広がっており、ほとんどの地域でレベル2程度の散乱が発生している。

家具の転倒、家具の移動、室内散乱のそれぞれの評点を、各地区で平均して図9に示した。各項目のうち1Fと記したものは戸建ての1階または集合住宅で居住階が1階の場合、2Fは戸建ての2階以上の部屋または集合住宅で居住階が2階以上の場合を示している。室内の散乱については春採(西)・橋南(北、南)で平均2以上の値を、ついで春採(北)、愛国(北、南)、釧路町が大きな値を示した。家具の移動についてもほぼ同様の傾向を示した。しかし、散乱の大きかった地区のうち、春採(西)では家具の転倒も2程度であったのに対し、春採(北)や橋南(南)では転倒は1以下の小さな値であった。この様に、釧路川

表2 家具の転倒や室内散乱のランク付けの目安

評点	家具の転倒	移動・すべり	室内の散乱
4	部屋中のほぼ全ての家具が転倒	部屋中のほぼ全ての家具がかなり移動	部屋中が足の踏み場もないほどに散乱
3	幅厚の物は転倒せず本棚などはほぼ転倒	ほぼ全ての家具が少し移動	部屋の床面積の半分以上に収納物が散乱
2	比較的厚みの薄い家具がいくつか転倒	いくつかの家具が移動・机上の物が落下	部屋の床面積の数10%に収納物が散乱
1	不安定な物などのいくつか転倒	机上の物などのいくつか滑って落下	机上の物や不安定な物が落下して散乱
0	転倒物無し	移動した物無し	散乱せず

図8(a) アンケート調査による家具の転倒被害の分布

図8(b) アンケート調査による室内の散乱被害の分布

以東の地区では散乱のみが卓越して発生する地域、家具の転倒も同時に発生する地域がそれぞれ存在することが読み取れる。1階と2階以上の被害の傾向はほぼ似通ったものとなっている。

これまでに述べてきた被害の地区別の分布特性をまとめると概略以下の通りとなる。構造被害は、橋南(北)、春採(北)で最もひどく、ついで洪積台地上のその他の地区の順となった。また、橋北地区でもやや大きな被害を生じた。家具の転倒は橋南(北)や春採(西)で多く発生し、ついで湿原近傍の鳥取(北)に多く見られた。一方、室内の散乱は洪積台地上の各地区の程度が大きかったが、転倒被害と比べると春採(南)では被害は小さく、逆に橋南(南)では被害が大きかった。また、橋北の2階以上や愛国地区でもやや大きな被害が発生していた。

3. 住家の構造被害および室内における被害の推定

これまでに構築してきた地震応答推定手法⁴⁾、⁵⁾を用いれば概略的に構造物の地震応答を求めることができ、これらの推定量を用いて構造的な被害や室内の散乱状況を明らかにすることも可能である¹⁾、⁶⁾。ここでは釧路沖地震による構造被害、室内被害に影響を及ぼしている要因を探ると共にこの手法の妥当性を検証することを目的として、上記の推定手法を釧路沖地震の場合に適用することを試みた。

3.1 解析手法

本解析手法の概要を順をおって以下に記す。

(1) 工学的基盤面での入力地震動

地盤の応答解析を行うためには、まず基盤地震動を設定する必要がある。ここでは、釧路市域に広く存在する

図9 アンケート調査による室内被害の地区別割合

安定した浦幌層群および釧路層群(N値50以上)を共通基盤と考え基盤地震動を設定する。しかし、現状では適当なデジタルデータは見あたらないので、ここでは釧路気象台の地表における建築研究所の観測記録⁸⁾を参考にして地震動を作成した。その設定手順を以下に示す。

基盤動としては開放基盤での波形として、金井・田治見フィルターを用い、位相に一樣乱数を与えて模擬地震動を作成し、用いることとする。また、本解析で対象とする地盤および構造物の振動数は1Hz～4Hz程度の範囲にあり、この範囲で精度が得られるように基盤動を設定する。まず、この基盤動および気象台に最も近いボーリングデータを用いて以下の(2)(3)に記した手法で表層地震動を推定し、建築研究所の記録(N153E成分)と比較する。両者の比較には、加速度および速度の応答スペクトルの形状およびそれらを周期0.1～2.0sec.の範囲で積分した値を用い、これらが一致するように繰り返し計算を行なってフィルターの卓越振動数、減衰定数および基盤動の最大加速度を決定した。その結果、それぞれ3.9Hz、0.5、445galという値が得られた。図10には応答スペクトルの比較と設定した基盤動のフーリエ振幅スペクトルを示す。川瀬⁹⁾は北海道内の気象台における8つの観測記録より原地動スペクトルを求めているが、これを見ると4Hz程度をピークとした特性をもっており、上記の振動数に関する設定はほぼ妥当であると考えられる。波形の包絡線については気象台における表層動の主要部の継続時間が観測結果と同程度になるように指数型の関数を用いて設定した。

(2) 表層地盤のモデル化

北海道建築士会釧路支部のまとめたボーリングデータ集¹⁰⁾を参照して解析地点の表層地盤を成層地盤としてせん断質点系にモデル化した。しかし、これらのボーリングデータは比較的浅い地盤までしか得られていないので、ここでは地質断面図が得られている図1中の橋南(南)から愛国地区(地点1～11)、春採(南)から春採(北)(地点12～17)、春採(北)から大楽毛(地点17～26)の3つの測線上の地点および橋南(北:緑ヶ岡)の2地点(18、19)を対象としてモデル化を行った。ボーリングデータと基盤の間は地質断面図や数本ある深井戸のデータを参照して推定した。各層のせん断波速度は鏡味・後藤¹¹⁾による推定式を用いて、各層のN値、層厚、地盤種別により求めた。

(3) 表層地震動の推定

上で設定した基盤動と地盤モデルを用いて、弾塑性地震応答解析を行い表層地盤における地震動を求めた。各層の復元力特性には大崎・原ら¹²⁾による土の非排水強度で規準化されたR-Oモデルを用いた。数値積分にはRunge Kutta Gill法を用い、時間刻み0.01secで4096ステップについて応答解析を行った。

(4) 構造物の動的特性のモデル化^{4)、5)}

これまでの研究では木造住宅及びRC造構造物の動的特性のモデル化を行ってきた。ここでは、その内、解析の対象として在来軸組工法による木造住宅(記号WSで表す)および一般的な低層RC造物(記号:RC)を選び、それぞれをせん断質点系にモデル化した。各層の復元力特性はスケルトンカーブと履歴特性に分けて、既往の実験結果や設計例を参照して設定した。構造物のせん断耐力は建物の壁量に応じてせん断耐力係数 C_y (ベースシア係数に相当)を算出し、設計の基準点においてこの係数に応じたせん断耐力を持つものとした。実際の構造物の高さ方向のせん断耐力分布については、構造物が旧基準法(記号:O)、新基準法(記号:N)の考え方にそって設計されているものと仮定し、これによって各層の層せん断耐力を算定した。その他の諸量(各階の重量、粘性減衰など)は設計指針や既往の実験結果などを参照して設定した。なお、宮城県沖地震による構造物の応答・被害を本モデルを用いて推定し、実際の被害と比較することにより、精度の検証を行なっている。

(5) 構造物の応答の推定

上で設定した表層地震動と構造物モデルを用いて(3)と同じ条件で弾塑性地震応答解析を行い、構造物各階における最大地震応答(加速度、速度、変位など)を求めた。なお、基盤地震動は位相情報として一様乱数を与えているので、ここでは一様乱数を変化させて30個の基盤地震動を作成し、それぞれの地震動に応じて地盤および構造物の地震応答解析を行い、応答量はこれら30回の計算結果の平均値として求めた。

(6) 各フロアでの家具の転倒・室内散乱の推定¹⁾

家具のロッキング振動は、地震時におけるフロアの加速度、速度に依存する。加速度に関しては家具の端が浮き上がる時の重心でのモーメントの釣合より、また、速度に関しては家具の重心が鉛直線を越えるとき(重心が元に戻らずさらに回転してしまう場合)のエネルギーの釣合よりそれぞれその下限値を示す尺度が求められ、振動台実験などによっても検証・修正されている¹³⁾。ここでは、家具の転倒率をこの尺度を下限(平均 $\sim 3 \times$ 標

準偏差)とする正規分布で仮定し、震度階の表現にも合致するように平均値を設定し、家具の転倒率とフロアの最大加速度・最大速度との関係を求める。また、加速度に関する下限値は家具の端が浮き上がり始める状態、すなわち家具がロッキングをし始めそれに伴い収納物が落下を始める状態を示すものと考えられる。そこで、ここでは加速度の尺度を用いた正規分布を収納物の落下率とフロアの最大加速度との関係にも用いることとした。これらの関係式により、フロアの最大加速度・速度が求めれば、家具の転倒率、収納物の落下率が求められる。

室内の散乱面積は上で求めた家具の転倒率に、転倒によって占められる面積を掛け合わせたものと、収納物の落下率に、落下物の散乱する面積を掛け合わせたものの集合和で得られる。ここでは、得られた散乱面積を室内の可住面積(部屋面積から家具などによって占められる面積を差し引いたもの)で割ることによって散乱率を定義している。

3.2 表層地盤・表層地震動の特性

表層地盤の周波数特性を調べるために、3.1の(2)で作成したモデルを用いて各地点の伝達関数を求めて図11に示した。なお、Q値はすべての層で20と仮定した。各図中の数字の内、最上段は地点番号を示し、その下の数値は1次、2次のピークの振動数をそれぞれ示している。また、これ以降、地区名・地名のあとの括弧内の数字は図1中の地点番号を示している。1から11の測線では、橋南(南)(1,2)ではピークは2Hz程度であるのに対し橋北(3,4)の南部では2.5~3Hzと高くなっている。鉄北地区以北(7~11)では1~1.5Hz程度の低い値を示した。松岡・翠川による常時微動観測の結果¹⁴⁾では、橋南(南)で3Hz以上、橋北で1.2~2.0Hz、鉄北以北で1.2Hz以下となっており、本モデルは橋南地区でやや低く、橋北南部でやや高い評価となっている以外は観測結果と良い一致を示している。地点12から19では春採(南)(12~14)で3Hz以上の高い数値を示している。地点20から26にかけては湿原に近い地点でもあり、1~1.5Hz付近に第一のピークがある。微動観測結果では、春採南で2.2~4.0Hz、湿原近傍で1.2~1.8Hz程度と、これらも良く一致している。

つぎに、3.1の(3)で求めた表層地震動の最大加速度および最大速度を図12に示す。図の横軸は各地点の相対的な距離を示している。釧路気象台近傍(記号:K)では表層動の加速度および速度の応答スペクトルの面積が観測値と等しくなるように基盤動を設定したにもかかわらず、最大加速度は

図10 設定基盤動のフーリエスペクトルおよび釧路気象台における推定地震動(太線)と観測地震動(細線)の加速度・速度応答スペクトルの比較

517 gal となり、観測値 (637 gal) よりは小さな値となった。この原因としては、観測波には高い振動数に小さなピークがあること、表層動の推定手法には誤差が含まれていることなどが考えられる。相対的には、春採(南)の各町 (12~14) や武佐2丁目 (16)、緑ヶ岡5丁目 (18) で最大加速度は500 gal を越える大きな値を示し、北部・西部の沖積地盤上の地域 (7~11、21~26) では300~350 gal 程度であった。詳しい設置場所や設置条件が不明なため詳細な比較はできないが、西部の大楽毛橋 (地点25付近) で350 gal、釧路川堤防 (地点11付近) で300~320 gal という最大加速度が観測されており、推定結果はこれらの値について良い一致を示している。

最大速度は各地点で比較的大きな値を示し、釧路駅 (6) 付近で60 kine と最も大きくなった。一方、鉄北地区や武佐、緑ヶ岡などでは40 kine 程度の値を示した。

3.3 構造被害・室内被害の分布

3.1 で示した手法により、在来軸組工法による2階建ての木造住宅 (記号WS-N-2: 新基準によるもの、WS-O-2: 旧基準によるもの) および新旧基準によるRC造2階建て (RC-N-2、RC-O-2)、新旧基準による5階建て (RC-N-5、RC-O-5) の建物について、各階のフロアの最大応答加速度・層間変位 (RC造については層間変形角) を求めた。また、これらの応答量をもとに室内の散乱率を算出した。構造物のせん断耐力係数 C_y (ベースシア係数に相当) に関しては、RC造については壁量調査の結果を参照して平均的な値として1.0を用いた。また、木造住宅については C_y はパラメータとして考え、設計の基準値に相当する0.2とその倍の0.4を用い、記号末尾の括弧内の数字で表した。基準法改正以後の構造物を対象として、本州の数都市において行なわれた壁量調査の結果をまとめると、 C_y の最頻値は0.2を越えたところにある⁴⁾。

図1-1 各地点の表層地盤の伝達特性

図1-2 表層地震動の最大加速度・最大速度の分布

一方、北海道の木造住宅は屋根が軽い、開口部が小さい、断熱材を壁内に配置するため壁が2重構造となり強度も増している、などの理由よりせん断強度は本州などの住家よりは高くなっていると考えられる。北海道の家屋の C_y 分布については未だ明らかにはなっていないので直接対応付けることはできないが、ここではせん断強度が高くなった場合に地震応答・被害がどのように変化するかを調べるため、 $C_y = 0.4$ の場合も併せ考慮した。

(1) 構造被害の地域分布の推定

図13には各建物の最上階の層間変形(RC造の場合は層間変形角)を図12と同様に示した。木造住宅については、 C_y が0.2の場合は橋南(南)から橋北にかけて(1~6)、春採(北、南)(12~17)、橋南(北)(18,19)の地点で非常に大きな応答を示している。層間変形5cm程度で半壊、10cm程度で全壊という従来の経験的な被害評価尺度を当てはめてみると、これらの地区では半壊程度の被害は発生することとなる。しかし、 C_y が0.4の場合は全体的に応答は小さくなり、ほとんどの地区で半壊以下の評価となる。しかし、この場合でも、橋南(北、南)や春採(北、南)では他地区に比べると相対的には応答は大きくなっており、これらの地区より被害が発生し始める可能性が示されている。一方、鉄北から愛国(7~10)、鉄北から大楽毛(21~25)にかけては応答量は非常に小さくなっている。ただし、大楽毛西(26)や湿原の近傍(11)ではやや大きな応答を示している。建物の新旧で比較すると、ほとんどの地点で旧基準による建物は新基準のものに比べて2~3cm程度大きな応答を示している。

2章で述べた実際の構造被害の対象はほとんどが木造住家であったので、この被害の傾向(図3~図6)と上記の推定結果を比較する。釧路市域における木造住家の耐力分布、構造形式、年代分布などを厳密に評価するには、現状ではデータ不足なので、ここでは上記パラメータ(C_y 、建物の新旧)のもとでの相対的な被害の変動に着目して比較を行なう。旧釧路川より東の洪積台地上では、実際の被害は弥生・宮本町(橋南南)、緑ヶ岡東部・材木町(橋南北)、武佐西部(春採北)などで大きかった。推定でもこれらの地点では、上に記したとおり、相対的に大きな応答量を示しており、実際の被害の傾向と一致している。しかし、推定では橋南(北、南)、春採(北、南)でほぼ同程度の値を示しているのに対し、実際には春採(北:武佐)、橋南(北:緑ヶ岡)で相対的に大きな被害を生じている。2章で記したように、この地域では地盤の破壊による被害が多く発生したため、このような差を生じたものと考えられる。このような地域では振動による被害だけでなく、地盤変状による被害の推定をも併せ行なうべきであろう。

一方、旧釧路川以西の沖積地では実際の被害は洪積台地上の被害よりかなり小さかったが、推定でも同様の傾向を示した。また、旧釧路川に近い橋北(3~6)・鉄北や愛国の東部(7、8、20)および湿原に近い鳥取(北)(11)では、釧路川に近い地区(9、10)よりやや大きな被害を生じているが、この傾向は推定でも良く表現されている。このように、沖積地では、表層地盤の増幅特性を考慮した地震応答推定法による結果は、実際の被害分布傾向を良く表現しているものと考えられる。

図13 各地点での構造物の最大応答変位(変形角)の推定

RC造に関しては、旧基準によって設計された構造物は洪積台地上の一部地区（春採(北)、橋南(北)）でやや大きな応答を示している。また、気象台近傍（K）や春採(南)でも層間変形の制限値（0.005rad）に近い応答を示した。しかし、その他の地点では応答は0.005radまでは達しておらず、被害は軽微であったと推定される。新基準による建物の応答量は非常に小さく、被害は発生しない程度の応答量に留まっていた。また、全般的に5階建ての構造物の方が2階建てに比べて応答が大きくなっている。RC造の実際の被害分布については被害統計、アンケート調査共にデータ数が少なく、現状では推定結果と比較することは難しい。今後のデータの蓄積を待って比較を行なっていきたい。

（2）室内における散乱率の地域分布の推定

図14には同様に各建物の室内における散乱率（ R_s ）の分布を示した。ただし、ここでは対象とする部屋は各解析ケースのすべてについて同じものとし、8畳間にタンスと厚みの薄い本棚がある場合を想定している。そのため、散乱率の絶対値については必ずしも意味のあるものではなく、ここではその相対的な分布特性に注目する。上段、下段はそれぞれ木造住家、RC造建物の最上階での散乱率を示している。また、図中の点線は1階フロアでの散乱率（各建物共通）を表している。

散乱率の算定にはフロアの最大加速度・速度が関与するが、1階フロアでの散乱率を見ると、ほぼ表層地震動の最大加速度・速度分布と相似の形状を持っているのがわかる。木造住家の最上階における散乱率の地域分布は複雑な性状を示し、 C_y の大小や建物の新旧による散乱率の変化は一概には言えない。また、必ずしも1階フロ

アの散乱率よりも大きいとはいえず、その関係は地域や構造物の種類により変化する。しかしながら、構造被害の小さかった沖積地（7～10、22～25）では C_y が0.4の場合の方が0.2の場合より、また旧基準による住家の方が新基準のものより散乱率は大きくなる傾向を示している。一方、構造被害の大きかった橋南、春採では新基準のものがやや大きくなる傾向を示した。このように、散乱率は各フロアの応答加速度や応答速度に大きく依存するため、構造物と入力（表層）地震動相互の周波数特性の関係により、大きく変化するものと考えられる。

2章で示した実際の散乱率（図8、9）と推定結果を比較すると、他地区に比べて散乱率が小さくなるのは、推定では1階、最上階とも鉄北、鳥取、大楽毛（7～10、22～25）などであり、これは2.3でまとめた実際の散乱率とも一致している。また、春採(西)や橋南(北、南)（1、2、18）では散乱率は比較的大きかったが、推定でもその傾向は示しており、散乱率のおおまかな分布性状は追うことができているものと考えられる。しかし、春採(北、南)（12～17）では実際の被害はそれほどではなかったにもかかわらず、推定値は大きな値を示したことなど、各地区における微妙な散乱状況の変化については十分に表現し得ているとはいいがたい。推定結果は構造物のパラメータ（耐力や建物の新旧など）に大きく依存しているため、より詳細に解析結果と実際の被害を比較していくためには、十分な被害データを収集し、これらを建物パラメータ毎に整理して行く必要がある。RC造建物については5階建ての最上階では、春採や橋南地区で散乱は非常に大きくなる傾向を示してい

図14 各地点での構造物の室内における散乱率 R_s の推定

る。また、沖積地においても5階建ての最上階では地区に係わらずかなりの散乱が発生することが読み取れる。

以上のように、実際の被害分布との比較により、本解析によって構造被害・室内散乱の分布特性のおおよそを定性的に追うことができたものと考えられる。特に沖積層の卓越した地域ではかなりの精度で推定することが可能であった。このことは、被害の分布特性は本解析で扱っているように、各地点の表層地盤の特性（表層厚および表層の柔らかさなど、言い替えれば表層地盤の周波数特性と増幅特性）および構造物のパラメータ（耐力や建物の新旧、階数など）を考慮することによって表現できることを示すものと考えられる。

4. まとめ

本研究では、建物の構造被害、室内被害の地域分布特性を、1993年釧路沖地震による被害を対象にして、被害調査およびアンケート調査によって得られた資料をもとにまとめた。さらに、これまでに開発してきた地震被害推定手法を用いて構造的被害や居住空間における室内被害を推定し、実際の被害分布との比較により推定法の妥当性を検証すると共に、これらの結果を基に、建物の構造被害・室内被害に影響をおよぼす要因（建物種別・耐力や表層地盤特性など）についての考察を行った。

本研究により、以下の諸点が明らかにされた。

1) 被害統計資料やアンケート調査結果を基に釧路市域における建物の構造被害の分布特性を明らかにした。構造被害は旧釧路川以東の台地上の地区で集中して発生し、緑ヶ岡6丁目では24%に達した。一方、旧釧路川以西の沖積地や湿原付近の埋立地では被害率はあまり高くなかったが、被害率は旧釧路川から西方および北方へ行くにつれ小さくなり、沖積層の厚さが薄いほど被害が大きくなる傾向を示した。

2) アンケート調査の結果に基づき家具の転倒や室内散乱などの室内被害の分布を明らかにした。その結果、地区によって建物の構造被害に比べて家具の転倒や室内の散乱等が激しく発生していることが明らかとなった。これらの室内被害は、家具の転倒が顕著な地区や室内の散乱が顕著な地区が存在するなど、非常に複雑な被害分布性状を示している。

3) これまでに開発してきた推定手法によって構造的な被害や室内の被害の分布の推定を行った。その結果、構造的な被害および室内散乱などの被害の分布傾向を概略追うことができた。これは、被害の分布特性は各地点の表層地盤の特性を考慮することによってほぼ表現できることを示すものである。しかし、構造物の被害、特に室内散乱については構造物の特性が大きく影響していることが明らかであり、これらについても十分に考慮してい

く必要がある。また、洪積台地上での地域では地盤変状による被害が卓越していることが明らかであり、地盤変状に起因する建物被害についてはその被害メカニズムに応じた推定手法を適用していく必要がある。

本手法により、地盤条件および構造物の条件が得られれば、物理的なモデルに基づいて構造物の応答さらには構造被害や室内被害の推定が可能となろう。しかしながら、構造物への入力地震動の評価には多くの不完全な点があり、またアンケート調査の結果にも不十分な点（母数の絶対的な不足、回答の不確実性など）が存在するため、現状では定量的な評価は難しいと考えられる。今後はより多くの被害データの集積を図るとともに、より詳細な検討を加え、本推定手法の精度向上を図っていく必要があるものと考えられる。さらには、本手法による結果をもとに、建物室内における2次被害の発生とその波及、生活支障や経済的困窮を推定する手法についても構築していく予定である。

謝辞

アンケート調査の実施には北海道建築士会釧路支部および同十勝支部の事務局に大変お世話になった。また、アンケートの回答には多くの会員の皆様のご協力を頂いた。この場をかりて深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 北原昭男、藤原悌三：居住空間の構造的・機能的な地震被害の推定、京都大学防災研年報、第35号B-1、pp.35-50、1992.4
- 2) 藤原悌三、岩井 哲、北原昭男：1993年釧路沖地震被害調査報告（その1 建築構造物の被害概況）および（その2 建築物および室内の地震被害の分布特性）、日本建築学会近畿支部研究報告集、第33号構造系、pp.341-348、1993.6
- 3) 村上ひとみ、坂井忍、村上公一、高井伸雄：1993年釧路沖地震の人間行動調査－負傷者の発生と病院の対応－、日本建築学会北海道支部研究報告集、第66号、pp.17-20、1993.3
- 4) 北原昭男、藤原悌三：都市における建築構造物の地震被害推定に関する基礎的研究（その1 木造構造物の地震応答推定）、京都大学防災研年報、第31号B-1、pp.105-126、1988.4
- 5) 北原昭男、藤原悌三：都市における建築構造物の地震被害推定に関する基礎的研究（その2）－低層鉄筋コンクリート構造物の地震応答推定－、京都大学防災研年報、第32号B-1、pp.149-163、1989.4
- 6) 北原昭男、藤原悌三：建築構造物群の震害予測に関する研究、京都大学防災研究所都市耐震センター研究報告、第5号、pp.11-39、1991.4
- 7) 若松加寿江：1993年釧路沖地震における宅地造成地の地盤変状と被害、第22回地震工学研究発表会講演概要集、pp.403-406、1993.7
- 8) 鹿島俊英、北川良和：平成5年（1993年）釧路沖地震強震観測速報、建設省建築研究所、1993.2
- 9) 川瀬 博：1993年釧路沖地震で釧路気象台の強震地動は何故大きかったのか？－表層地質効果（ESG）仮説の提案－、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造I、pp.15-16、1993.9
- 10) 北海道建築士会釧路支部：釧路市の地盤、1982
- 11) 鏡味洋史、後藤典俊、太田 裕：各種土質指標を含むS波速度推定式の系統的構成、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.509-510、1976.10
- 12) 大崎順彦、原 昭夫、清田芳治：地盤振動解析のための土の動力学モデルの提案と解析例、第5回日本地震工学シンポジウム、pp.697-704、1978
- 13) 日本建築学会：非構造部材の耐震設計指針・同解説および耐震設計・施工要領、pp.327-338、1985.11
- 14) 松岡昌志、翠川三郎：1993年釧路沖地震における釧路市内の地震動強さ（その2 常時微動特性について）、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造I、pp.3-4、1993.9

（1993年9月8日原稿受理、1994年1月25日採用決定）