

## 1. 1923 年関東地震の再現記録に基づく東京低地での地震動周期

Estimation of Predominant Periods in Tokyo Lowland on the bases of Compensated Seismograph during the 1923 Kanto Earthquake

技術支援課 栗塚一範、小川 好

### 1. はじめに

沖積層の層厚が地震時の木造建物の被害と密接に関係することをはじめ解析的に明らかにしたのは、河角 廣<sup>1)</sup>の研究によるものである。河角は 1923 (大正 12) 年関東地震での旧東京市内の建物被害と、関東地震後に復興局によって実施された地質調査報告書をもとに、沖積層の層厚が 25m を越すと全壊率は急に増加するとしている。この結果は大崎順彦によって追試されており<sup>2)</sup>、沖積層の層厚として新たに作成されていた東京地盤図<sup>3)</sup>を参照するとともに、沖積層厚と全壊率との関係を各区分での分散の逆数に比例した重みをつけた最小二乗法により近似関数を求めている。大崎の報告でも、沖積層の層厚が 25m から 30m を越えると被害率は急激に上昇するという同様の結果となっている。

一般に、地震によって木造建物が大規模に被災するメカニズムとしては、次の二段階のプロセスとして説明される。第 1 のプロセスは建物の固有周期と地表面での地震動の卓越周期との関係であり、固有周期と卓越周期が一致すれば建物は大きくゆれることから、被害が多発すると考えられる。第 2 のプロセスは沖積層など軟弱な層の卓越周期と基盤層に入射する地震動の卓越周期との関係であり、この 2 つの周期が一致すれば地表面でのゆれは大きく増幅されることになり、結果的に建物被害はきわめて大きくなる。

注 1) 地盤の平均的な S 波速度を 100m/秒としたときの 4 分の 1 波長則から計算される卓越周期は 1 秒となり、強震時での地盤の非線形性を考慮すれば卓越周期はさらに長周期となる。

このうち第 1 のプロセスについては、河角と大崎による沖積層厚と被害との関係は、ひとつの矛盾を長い間抱えていた。すなわち、関東地震当時の二階建て木造建物の固有周期は長くても 0.5 秒程度であり、沖積層厚が 25m 以上の地盤の卓越周期よりも明らかに短周期である<sup>注 1)</sup>。しかし、この矛盾については、近年、別の考え方が定説となりつつある。1995 年兵庫県南部地震以降に強震計の観測網が充実され、きわめて強い地震動記録と観測点周辺での建物被害調査データが蓄積された結果、木造建物や中低層のコンクリート造建物の被害は、地震動の卓越周期が 1 秒から 1.5 秒、特に 1.2 秒から 1.5 秒の場合に被害が発生しやすいことが明らかになっている<sup>4,5)</sup>。一方、第 2 のプロセスである沖積層の卓越周期と基盤層に入射する地震動の卓越周期との関係については、関東地震では完全な波形として地震動が残されていないことなどから、解析的な報告は管見する限り発表されていない。

平成 25 年に公表された東京の液状化予測<sup>6)</sup>では、想定する地震のゆれとして特定の地震を想定していないものの、ゆれの強さのめどとして関東地震での都心部のゆれとしていることから、この地震の再現波形を基に都内の低地と埋立地、台地を刻む河谷底の 300 地点での応答解析を行っている。そこで、応答解析の結果から低地でほぼ均等に分布する 66 地点を選んで応答スペクトルを求め、沖積層の層厚と速度応答スペクトルで卓越する周期との関係を考察したので報告する。

### 2. 関東地震の再現波による応答解析

関東地震の際に東京で観測された本震の記録は、地

震計自体の損傷のため完全な波形としては残されていないが、森岡<sup>7)</sup>と山原ら<sup>8)</sup>によって復元された波形が公表されている。森岡はユーイング円盤記録式強震計によって記録された波形のうち、起動から数回の短い中断のある2分間のSW-NE(南西-北東)成分の記録を再現している。この地震計は当時、すでに正規の観測からははずされていたが常に整備されていたものであり、地震動は直径約60cmの回転式円盤に記録されている。一方、山原らは今村式の2倍強震計の記録から再現波形を作成している。この記録は関東地震の振り切れた地震記録としてよく紹介されているものであり、NS成分と上下成分は主要動の初期に描針が逸脱して記録がとれていないが、EW成分は、初動から16.45秒後(主要動に入ってから4.05秒後)に描針が逸脱したものの、約10秒後に回復している。復元されたのは、このEW成分であり、約10秒間の補完は、本震ときわめてよく似ていたとされる9月1日午後2時22分49秒の余震記録のEW成分を比例拡大して空白部分をうめている。山原らはNS成分の最大加速度はEW成分の1.6倍程度と推定していることから、再現されたEW成分を1.6倍した波形を再現波とした。

東京の液状化予測では、この2つの再現波から工学的基盤での入射波の最大加速度を設定している<sup>9)</sup>。2つの地震計は東京帝国大学地震学教室によって計測されていたことから、本郷付近の地盤モデルを作成し、等価線形解析プログラムDYNEQ<sup>10)</sup>によって工学的基盤での入射波形を計算した。東京礫層を工学的基盤としたときの入射波(解放基盤での波形2E)の最大加速度は、森岡の波形で195Gal、山原らの波形では200Galとなった。

今回の解析では、関東地震での入力波として山原らの再現波形を採用した。関東地震については当時の地震学科助教授の今村明恒によって、東京帝国大学地震学教室(本郷)でのゆれについての緻密な観察文が残されており<sup>11)</sup>、ゆっくりとしたゆれであるという記載の内容<sup>9)</sup>が山原らによる地震動のスペクトルとよく一致するためである。また、東京の液状化予測では入射する地震動による地表での最大加速度の違いを評価するため、工学的基盤に5種類の地震動を入力しているが、図-1の応答スペクトルに見られるように、森岡の

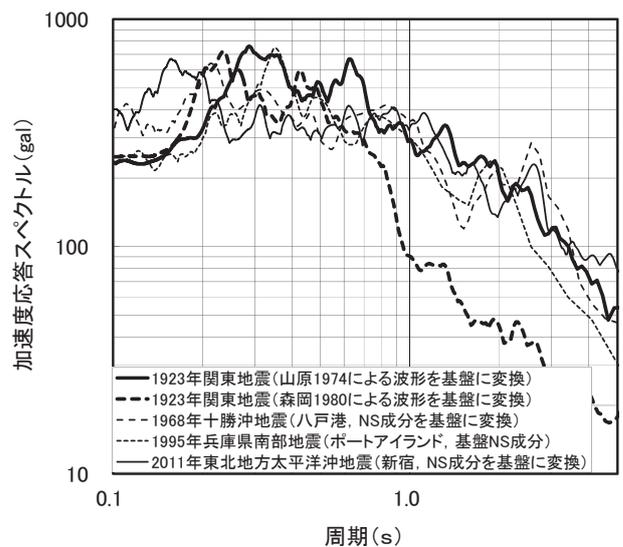


図-1 液状化予測での入力地震動の応答スペクトル

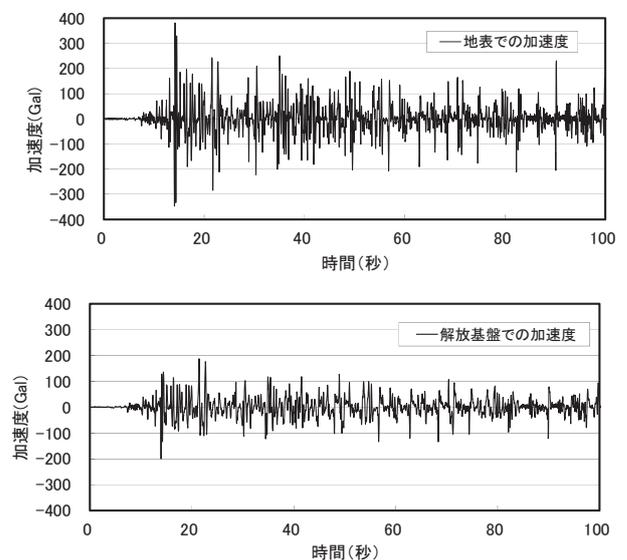


図-2 山原らによる再現波と本郷で計算された入力波

再現波形は建物の応答に影響を与える1秒以上の周期帯での振幅が、他の4地震動に比べてかなり小さくなっている。山原らによる再現波と本郷の地盤での解析から求めた入射波の波形を図-2に示す。

解析の対象とする地表での地震動は、低地の66地点のボーリング資料を基に作成した地盤モデルについて、等価線形解析プログラムDYNEQによる応答解析の結果である。入力条件としては、最大加速度を一律に200Galとした本郷での基盤波形(解放基盤での波形2E)を、モデルの工学的地震基盤に上昇波として入力している。この報告では地盤の応答特性を解析することを目的としていること、および関東地震の震源断層は東京低地から距離が離れているため影響は少ないと

考えられることから、震源断層からの距離減衰は考慮していない。

東京低地の一般的な地質構造は、表層の下位に完新世の地層である有楽町層上部と有楽町層下部が分布している。有楽町層上部は砂層を主体としたN値5から10の地層で、ところによって礫層が分布する。また、有楽町層下部はN値が0から2の軟弱な粘土・シルト層から成る。また、有楽町層下部と工学的な地震基盤との間には、場所により、埋没谷を埋める完新世から更新世の地層である七号地層や、いずれも更新世の地層である埋没段丘礫層や埋没ローム、ところによってはN値の低い東京層などが分布している。東京地盤図が作成された当時の沖積層と下位の洪積層（更新世の地層）については、平成21年度当センター年報<sup>12)</sup>に言及した通り定義が必ずしも現在の地盤図と対比できるわけではない。大崎の論文では、軟弱層を沖積層と捉えていることから、有楽町層下端から工学的な地震基盤の間に位置すると考えられるが、はっきりと位置を断定できるものではない。そのため、今回の解析では有楽町層上部と下部の層厚を「沖積層」の層厚と規定<sup>13)</sup>するとともに、工学的な地震基盤までの深さも検討の対象とした。

### 3. 応答スペクトル解析による検証

前述を踏まえて、沖積層の層厚が大きくなるごとに木造建物の被害率が増える傾向にあるのか否かという疑問を解消するため、応答スペクトル解析を実施し検証することとした。検証手順は以下の通りである。①東京低地66地点のボーリング資料を基に、DYNEQによる応答解析を液状化予測のために事前に実施、②DYNEQによる応答解析から得られた66地点の地表面加速度データを基に、減衰定数を5%と10%の2種類（木造建物で考慮した値<sup>14)</sup>で応答スペクトルを解析、③得られた速度応答スペクトルに対し、周期が1.2~1.5秒の最大速度応答と沖積層厚、基盤までの深さの関係を調査である。

応答スペクトル解析を実施した結果について、沖積層の厚さごと、もしくは工学的な地震基盤までの深さごとにおける速度応答スペクトルを図-3~6に示す。沖積層において、減衰定数5%、10%ともに10

$\leq L$ (沖積層厚) $<30$ の範囲ではほぼ同じ形状を示すが、 $0 \leq L < 10$ 、 $30 \leq L$ ではやや異なる形状を示した。基盤までの深さは沖積層深度よりも深いところに位

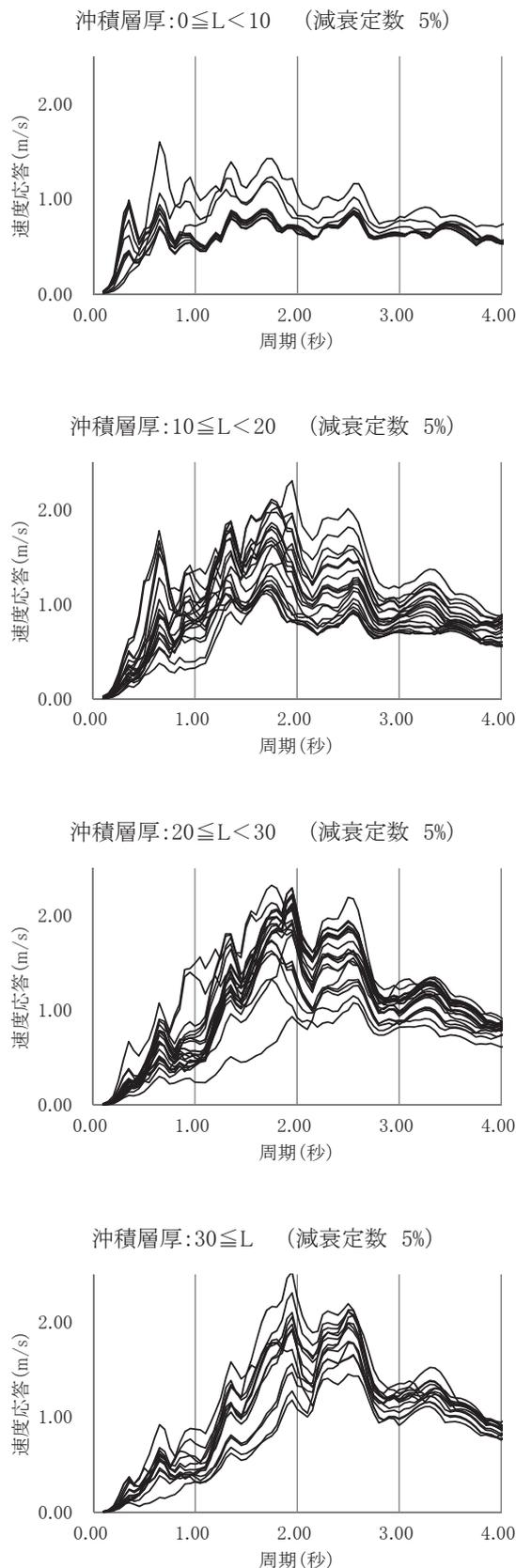


図-3 速度応答スペクトル(沖積層, 減衰定数5%)

置することから、同じサンプルでも沖積層厚より基盤までの深さの方が大きくなる。いずれにせよ、すべてにおいて卓越周期は2秒程度の位置に存在し、

沖積層厚もしくは基盤までの深さが大きくなるほど周期が長くなる傾向にある。これは、軟らかい地盤の層が厚くなるほど周期が長くなるためである。

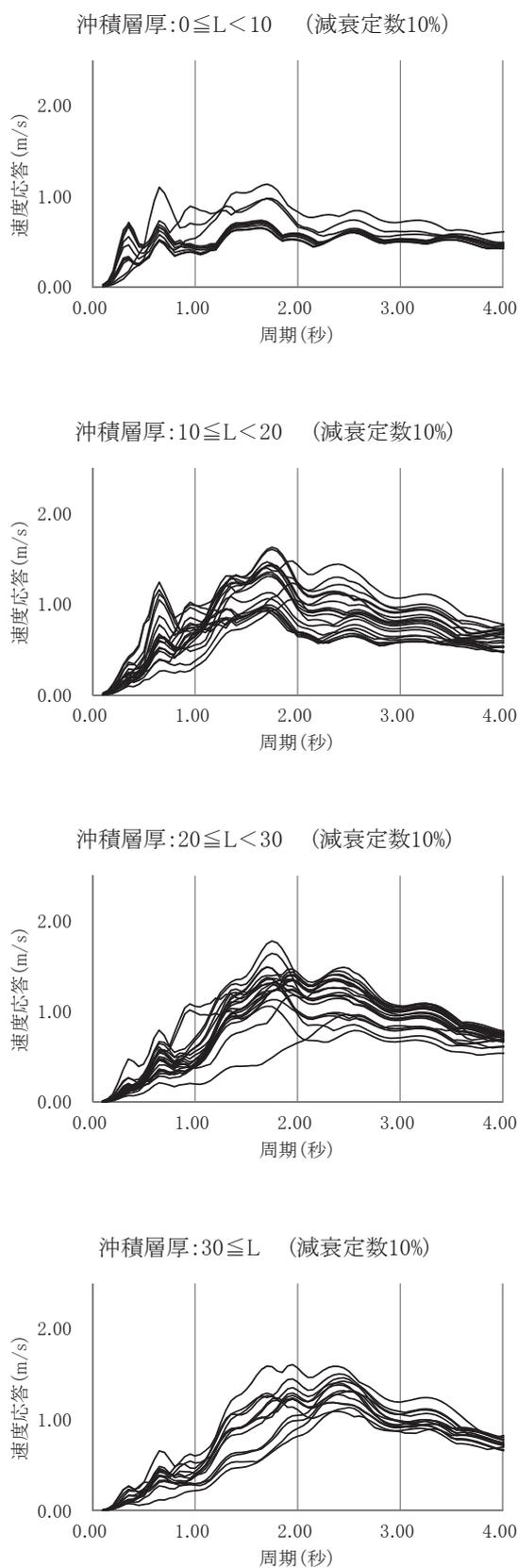


図-4 速度応答スペクトル(沖積層, 減衰定数 10%)

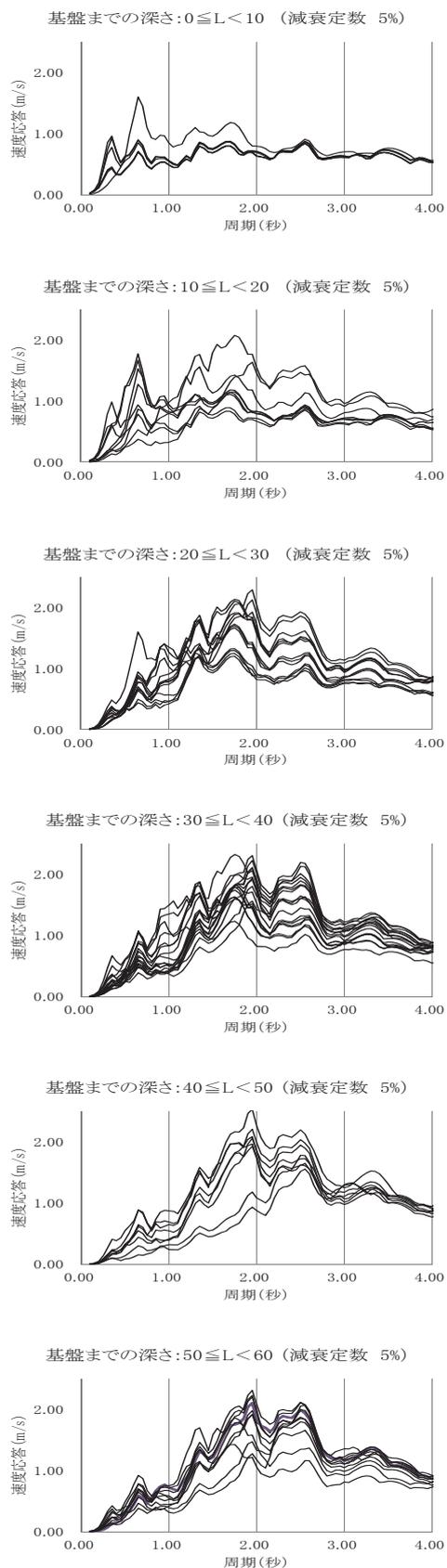


図-5 速度応答スペクトル(基盤, 減衰定数 5%)

前述したように、木造建物や中低層のコンクリート造建物の被害は、地震動の卓越周期が、特に 1.2 秒から 1.5 秒の場合に被害が発生しやすいとの見解から、

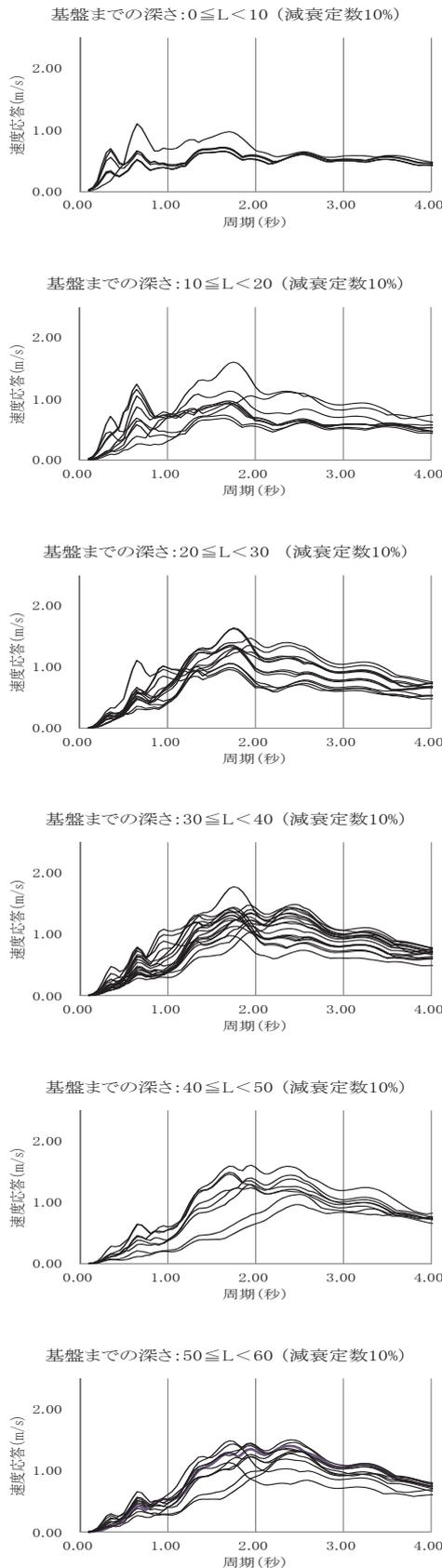


図-6 速度応答スペクトル(基盤, 減衰定数 10%)

周期 1.2~1.5 秒間に対する最大速度応答と沖積層厚さと工学的地震基盤までの深さの関係を図-7~10 に示す。なお、図中の実線は 2 次関数で近似したものである。沖積層の場合、減衰定数が 5%、10%ともに沖積層厚が 20m までは速度応答が大きくなる傾向であるが、20m を超えると速度応答が小さくなる傾向であった。工学的地震基盤までの深さの場合、減衰定数が 5%、10%ともに深さが 30m までは速度応答が大きくなる傾向であるが、30m を超えると速度応答が横ばい、もしくは小さくなる傾向であった。大崎の報告では沖積層厚(有楽町層下端から工学的地震基盤までの範囲にあると考えられる)が 25~30m を超えると被害率が急激に上昇するとされているが、本結果では沖積層厚 20m もしくは工学的な地震基盤までの深さ 30m 程度を超えると横ばいか低下しており、相反する結果になった。本結果より、沖積層の層厚が大きくなるごとに建物被害率が増すことは考えにくく、むしろ沖積層厚 20m~30m を境に低下することが考えられる。

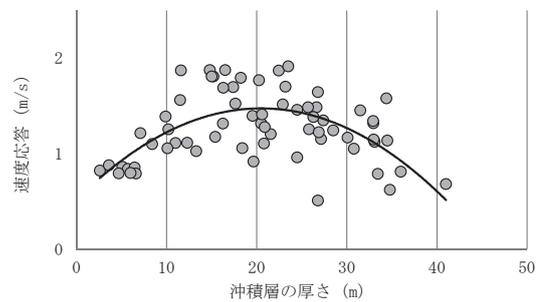


図-7 沖積層厚と速度応答(減衰定数 5%)

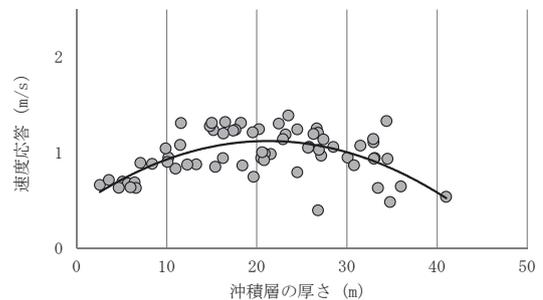


図-8 沖積層厚と速度応答(減衰定数 10%)

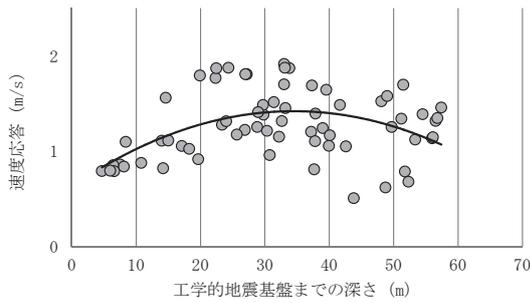


図-9 基盤までの深さと速度応答(減衰定数 5%)

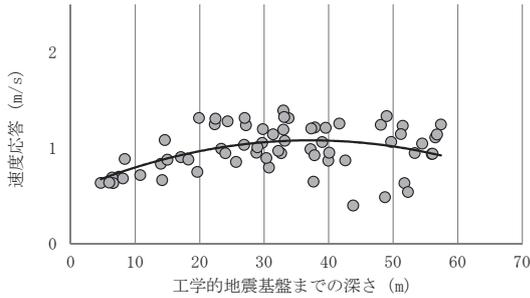


図-10 基盤までの深さと速度応答(減衰定数 10%)

#### 4. まとめ

沖積層の層厚と木造建物の被害率の関係性を検証するため応答スペクトル解析を実施し以下の結果を得た。

層厚が大きくなるほど、周期 1.2~1.5 秒の範囲における速度応答が必ずしも大きくなるわけではなく、沖積層の厚さ（有楽町層上部及び下部の厚さ）が 20m、工学的な地震基盤までの深さが 30m 程度を超えると横ばいか低下する傾向が見られた。

大崎の報告では沖積層厚が 25~30m を超えると被害率が急激に上昇するとされているが、本結果では 20~30m 程度で横ばいか低下しており、相反する結果になった。これは、軟らかい地盤の層が厚くなるほど、必ずしも建物被害が甚大になるわけではないことが示唆される結果となった。

最後に本報告を作成するに当たり、大崎順彦先生のプロプログラム<sup>15)</sup>を参考にさせていただきました。ここに記し感謝申し上げます。

#### 参考文献

- 1) 河角 廣 (1951) : 東京の震害分布と地盤に就いて 附 試錐結果より見たる大阪の地盤, 建築雑誌, Vol.66, No.773, 8-15
- 2) 大崎順彦 (1973) : 地域と地震・地盤と地震, 建築雑誌, Vol. 88, No.1067, 667-672
- 3) 東京地盤調査研究会 代表 北沢五郎 (1959) : 東京地盤図, 技報堂
- 4) 境 有紀, 神野達夫, 額野一紀 (2004) : 震度の高低によって地震動の周期帯を変化させた震度計算法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 585 号, 71-76
- 5) 境 有紀 (2009) : 建物被害と対応した地震動の周期帯の再検討, 日本建築学会構造系論文集, 第 642 号, 1531-1536
- 6) 東京都建設局・港湾局 (2013) : 東京の液状化予測 (平成 24 年度改訂版) 報告書
- 7) 森岡敬樹 (1980) : 1923 年関東大地震の地動, 日本建築学会論文報告集, 第 289 号, 79-91
- 8) 山原 浩, 伊藤哲次, 広瀬道孝 (1974) : 1923 年関東地震記録の検討, 清水建設研究所報, 第 22 号, 47-55
- 9) 小川 好 (2013) : 東京の液状化予測での地震動強度評価, -1923 年関東地震から推定した基盤最大加速度-, 平 25. 都土木技術支援・人材育成センター年報, 21-24
- 10) Yoshida, N., Kobayashi, S., Suetomi, I. and Miura, K. (2002) : Equivalent linear method considering frequency dependent characteristics of stiffness and damping, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 22, No. 3, 205-222
- 11) 今村明恒 (1925) : 関東大地震調査報告, 震災予防調査会報告第百号 (甲), 岩波書店, 21-65
- 12) 小川 好, 中山俊雄 (2009) : 1923 年関東地震での建物被害と沖積層厚との関係の再評価, 平 21. 都土木技術支援・人材育成センター年報, 33-42
- 13) 東京都土木技術研究所編 (1977) : 東京都総合地盤図 I, 東京都の地盤 (I)
- 14) 小野塚浩基, 原田直希, 大橋好光, 坂本功 (1999) : 常時微動測定による軸組構法木造住宅の振動特性に関する研究 (その 2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, 129-130
- 15) 大崎順彦 (1994) : 新・地震動のスペクトル解析入門