

堆積盆地への入射角が地震動増幅に与える影響

年縄 巧¹・山口 亮²・増井大輔³

¹正会員 工博 東京工業大学助教授 大学院総合理工学研究科 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259)

²工修 損害保険料率算定会 地震保険部業務グループ (〒105-0014 東京都港区芝 2-31-19)

³学生会員 工学 東京工業大学大学院 大学院総合理工学研究科 (〒226-8502 横浜市緑区長津田町 4259)

1923 年関東地震の際、甲府盆地には特異な被害分布の偏りが生じた。この原因を調べるために、同盆地を対象として強震動のアレイ観測、2 次元数値解析を行った。強震観測の結果、岩盤上や盆地北部、南部丘陵地上で地震動強さが小さめ、盆地内で大きめとなること、地震によっては盆地内の観測点においても地震動強さの分布が異なることがわかった。弾性波速度構造、長周期微動のアレイ観測結果及び長・短周期微動の観測結果から、盆地中心部を通る直線上での地盤構造を推定し、これに基づき 2 次元の数値モデル化を行った。このモデルを用いた数値解析の結果、鉛直入射の際には、盆地内で顕著な地震応答の違いが見られないが、斜め入射の際には盆地端部付近で顕著な地震動増幅が生じることがわかった。

Key Words: earthquake damage, incident angle, sedimentary basin, ground-motion amplification, 1923Kanto earthquake, strong-motion observation, numerical analysis

1. はじめに

堆積盆地内で地震動強さの分布に偏りが生じるとは、過去の地震被害の分布、地震動のアレイ観測などから指摘されている。このような地震動強さの分布に偏りが生じる原因は、地盤構造の空間的な偏りや盆地端部で 2 次的に生じた表面波などが挙げられる。本研究では、1923 年関東地震の際、地震被害の分布に空間的な偏りが生じた甲府盆地において、地震動のアレイ観測、2 次元数値解析を行い、被害分布の偏りの要因について検討を行った。

2. 強震観測

本研究で対象とする甲府盆地の位置を図-1 に、その表層地質図を図-2 に示す。甲府盆地は東西約 20km、南北約 15km の逆三角形をしており、四方を山地で囲まれた閉じた内陸盆地である。周辺山地の隆起と共に北西部及び東部からの河川によって土砂が供給され、盆地は形成された。盆地内は山地に沿って丘陵、台地が形成されており、広い範囲で扇状地が発達している。盆地中心部の表層地質は主に粘土、砂で構成されている。西部及び南部の山地と盆地の境界には活断層が見られる。

図-2 中の○や●は、盆地内の集落での 1923 年関東地震の際の木造家屋の全壊率を示し¹⁾、これを基に全壊率が 10%以上及び 1%以上のコンターを引いたものが図中の実線及び破線である。また、点線は 1923 年関東地震の震央距離を示す。木造家屋の全壊率は震央距離と明確な対応は示しておらず、

地盤条件などの地域的な要因が被害に影響を及ぼした可能性を示唆している。

この被害分布の偏りの原因を調べるため、盆地内で強震観測を開始した。図-3 に強震観測点の位置を示す。図中の▲が本研究で設置した観測点、●は K-net の観測点、■は気象庁の観測点を示す。観測点はほぼ南北に一直線上のアレイを形成しており、関東地震の際の木造家屋全壊率が 1%から 10%に変化している地域に属している。表層地質の分類で見ると、北部の点 IID は砂泥礫上、AOI~SMI は砂あるいは粘土上、SON は南部丘陵地の砂泥礫上、東部の点 ENZ は礫上に位置している。

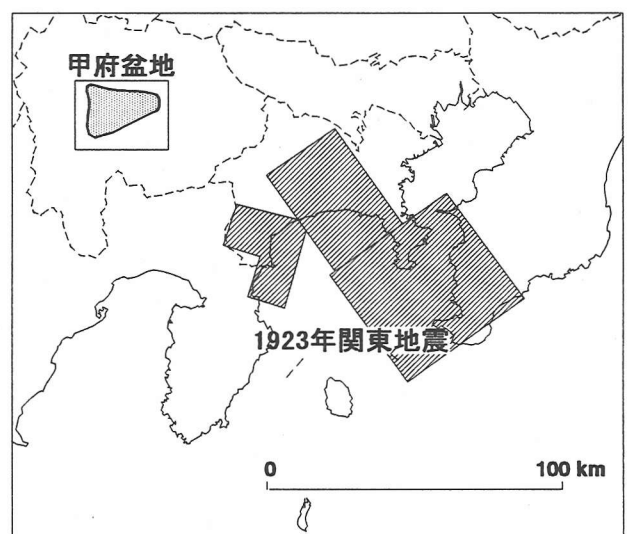


図-1 甲府盆地の位置と 1923 年関東地震の断層面

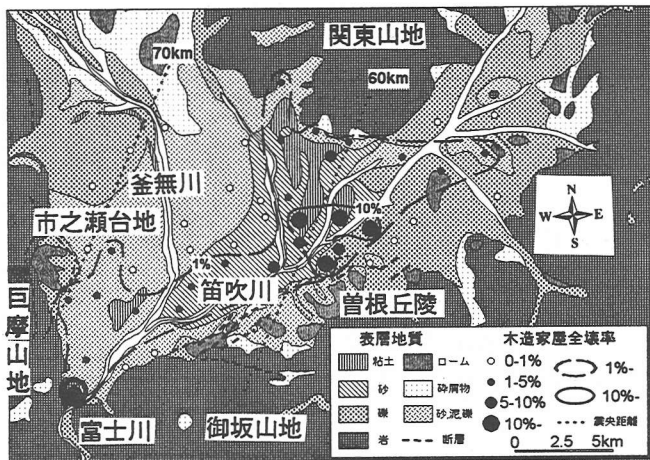


図-2 甲府盆地の表層地質と 1923 年関東地震の際の木造家屋の全壊率

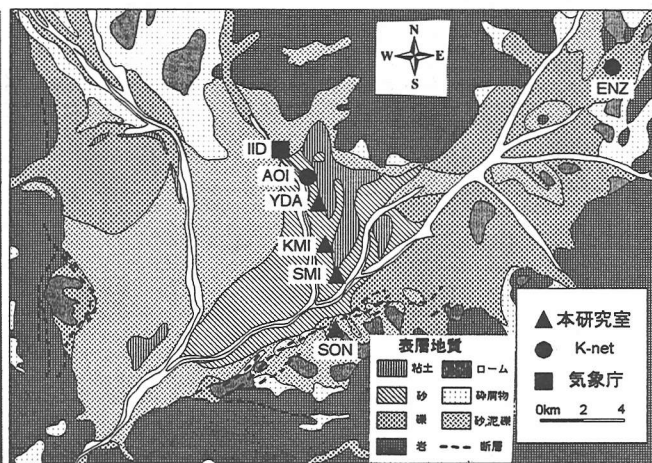


図-3 甲府盆地における強震観測アレイ

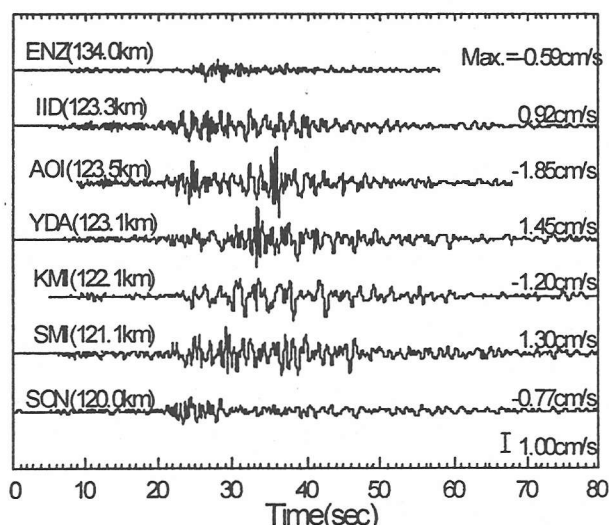


図-4 1997 年 3 月 16 日愛知県東部の強震記録

これらの強震観測点でこれまでに多くの地震記録が得られたが、それらのうちの代表的なものを図-4、-5 に示す。図の時刻歴波形は観測記録を積分して速度にし、震央直交方向に座標変換したものである。図-4 の速度波形（愛知県北東部、 $M=5.8$ 、 $D=39\text{km}$ ）を見ると、盆地東部の ENZ、南部丘陵地上の SON が最大速度 $0.6\sim 0.8\text{cm/s}$ 程度と振幅レベルが比較的小さいことがわかる。IID は最大速度値が 1cm/s 程度で AOI、YDA、KMI、SMI と比較すると振幅レベルはやや小さい。また、KMI や SMI は他の点と比較すると短周期成分が少なく長周期成分がやや多い。図-5 の速度波形（伊豆半島東方沖： $M=5.7$ 、 $D=2\text{km}$ ）を見ると、盆地東部の ENZ と南部丘陵地上の SON が最大速度 0.2cm/s 程度と比較的小さい。盆地内の IID、YDA、SMI が最大速度値 $0.3\sim 0.4\text{cm/s}$ 程度と比較的大きい。図-5 の波形は図-4 と比較して後続波群が見られ、後続波群の振幅レベルで比較すると YDA、SMI が IID よりも大きく盆地内でも振幅レベルが異なることがわかる。同規模の地震でこのように観測記録の形状が異なるのは、伊豆の地震は地震規模の割に長

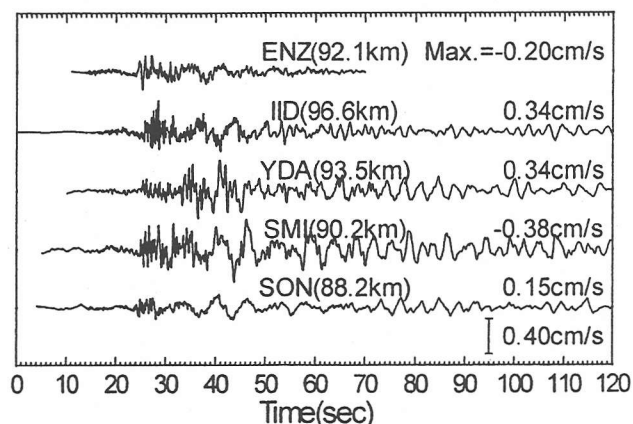


図-5 1997 年 3 月 4 日伊豆半島東方沖の強震記録

周期成分を多く含むという特徴を持っていることが挙げられる²⁾。また、伊豆の地震は震源深さが浅く、地震波が盆地に浅い角度で入射し、後続波が励起されやすくなることも一因と考えられる。

3. 盆地モデルの 2 次元有限要素解析

2. で示した盆地の地震応答の原因を調べるために 2 次元要素法を用いて数値解析を行った。地盤のモデル化は、短周期成分から長周期成分まで考慮するため、S 波速度が 200m/s 程度の表層地盤から 3000m/s 程度の地震基盤まで行った。表層地盤は、対象地域周辺で弾性波速度構造が得られている地点での工学的基盤までの深さと、その地点での地盤の卓越周期から平均的な S 波速度を算定し、これを対象地域の表層地盤の S 波速度と仮定し、常時微動の短周期成分 ($0.1\sim 1$ 秒) から各地点での表層地盤の厚さを推定した³⁾。深部地盤構造については、強震観測点 AOI と SMI において長周期微動のアレイ観測を実施し、Rayleigh 波の位相速度から地盤構造を逆解析して求め⁴⁾、この結果と各地点で得られた微動の長周期成分 ($1\sim 10$ 秒) の卓越周期から各地点での地盤構造を推定した。

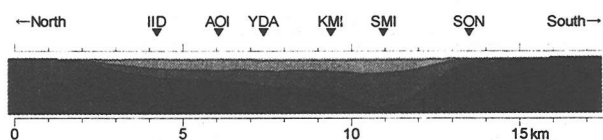


図-6 推定された地盤モデル

表-1 解析に用いた地盤モデル

層	S波速度(m/s)	密度(t/m ³)	ポアソン比
1	220	1.8	0.49
2	650	1.8	0.45
3	1260	2.2	0.39
4	3300	2.7	0.26

図-6 に推定された地盤構造モデルを示し、その物性値を表-1 に示す。この地盤モデルを有限要素分割し、Ricker wave を鉛直あるいは斜め入射して地表面での応答波形を計算した。尚、解析は無減衰で行い、面内・面外の両モデルを対象とした。

図-7 は面内モデルの中心周期0.5秒の Ricker wave の鉛直入射に対する地表面での速度応答波形（面内水平方向）である。盆地端部では入射波の振幅が増幅されるが継続時間は短く、盆地中心部では応答波の継続時間が長くなり、後続波群で最大を示すようになるなど、応答波は初動部で最大となる場合と、後続波部で最大となる場合がある。そこで各地点の初動部の増幅率を実線で、後続波部での増幅率を破線で図に示す。ここで増幅率とは、入射波の振幅に対する応答波の水平動の振幅と定義している。比較のために 1 次元解析の結果を一点鎖線で示す。このようにして、各モデル、各入射に対して増幅率の分布を求めた。

図-8 に鉛直入射に対する盆地内の増幅率の分布を示す。図を見ると、実線と一点鎖線の違いはほとんどなく、鉛直入射の場合の初動部の増幅は 1 次元的な地盤構造が支配的であることがわかる。全体的に初動部の増幅率は、後続波部の増幅率と同程度かそれよりも上回っているが、面外モデルの盆地端部では、後続波の増幅率が初動部の増幅率を上回る地域があり、特に中心周期が 1 秒の入射の際、後続波の増幅の度合いが強くなっている。

図-9 に斜め（45 度）入射に対する盆地内の増幅率の分布を示す。1 次元の解析結果との違いは顕著であり、 $x=10\text{km}$ 付近を境にして初動部と後続波部の増幅率が大きく変化し、 $x<10\text{km}$ では増幅率が小さく、 $x>10\text{km}$ では大きくなる。面内モデルでは、鉛直入射の場合よりも後続波部分の増幅が大きくなる傾向がある。面外モデルでは、鉛直入射の場合と同様に盆地南部で後続波の増幅が大きくなる傾向がある。鉛直入射の場合と比較すると、斜め入射の場合は盆地南部で増幅率がより大きくなる傾向があり、特に初動部で増幅率が大きくなる地域がある。

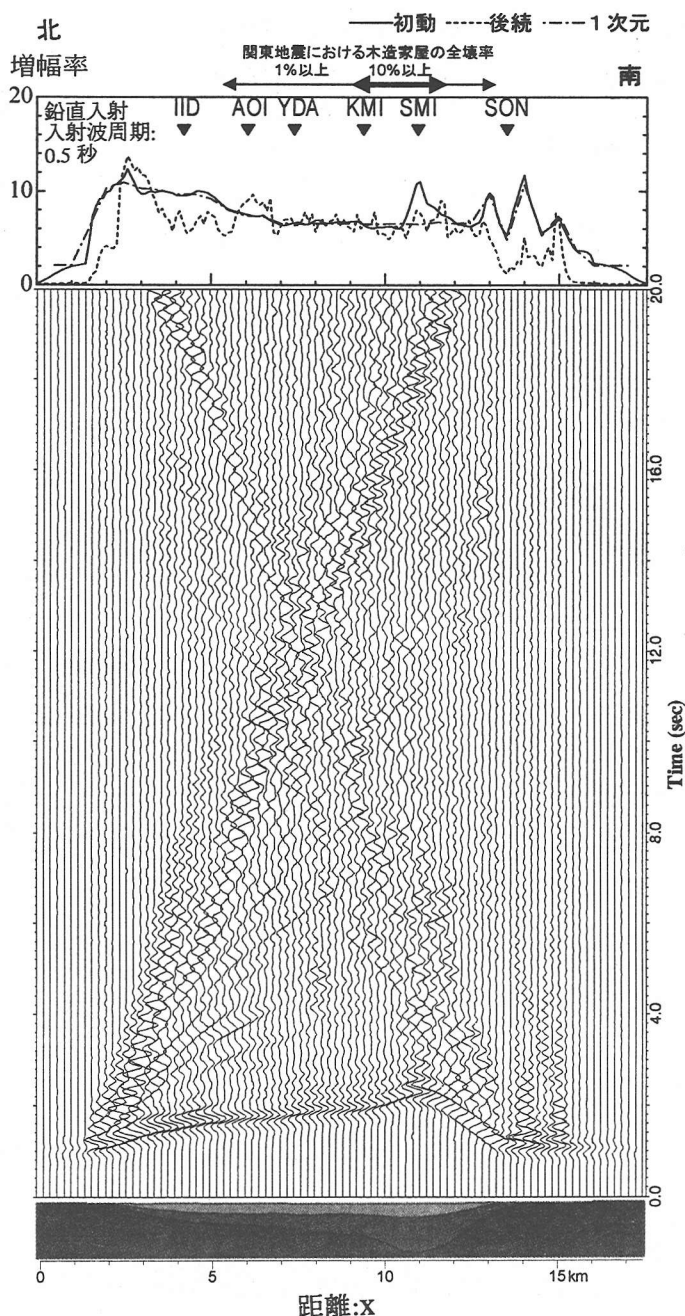


図-7 数値解析によって得られた地表面での応答波形と増幅率の分布（面内モデル、入射波の中心周期：0.5 秒、鉛直入射）

4. おわりに

甲府盆地を対象として強震動のアレイ観測、2 次元数値解析を行った。数値解析の結果、盆地への地震波の入射角が鉛直と斜めでは増幅率の分布が異なることがわかった。即ち、斜め入射の場合には盆地端部で 2 次的な波が発生しやすく、増幅率が大きくなる地域が生じる。この結果は伊豆半島東方沖地震の際、盆地南部で大きな後続波群が生じたことや、1923 年関東地震の際の盆地南部で木造家屋の全壊率が特に大きかったという結果と調和的である。

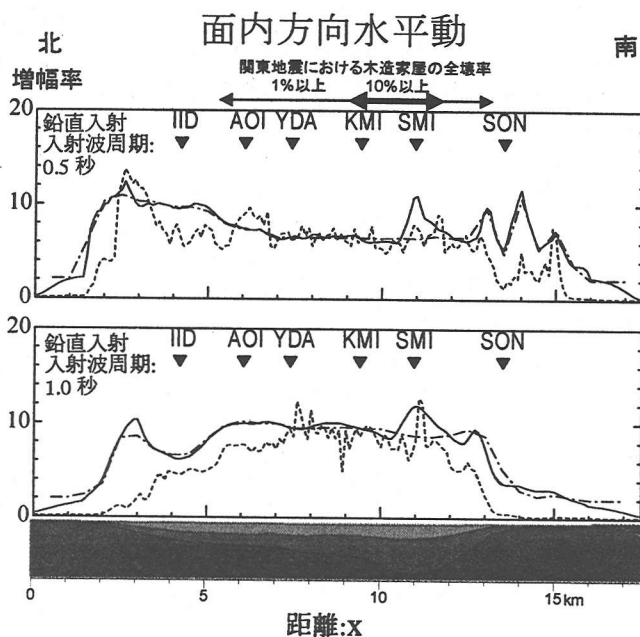


図-8 地表面での水平動の増幅率の分布（鉛直入射）

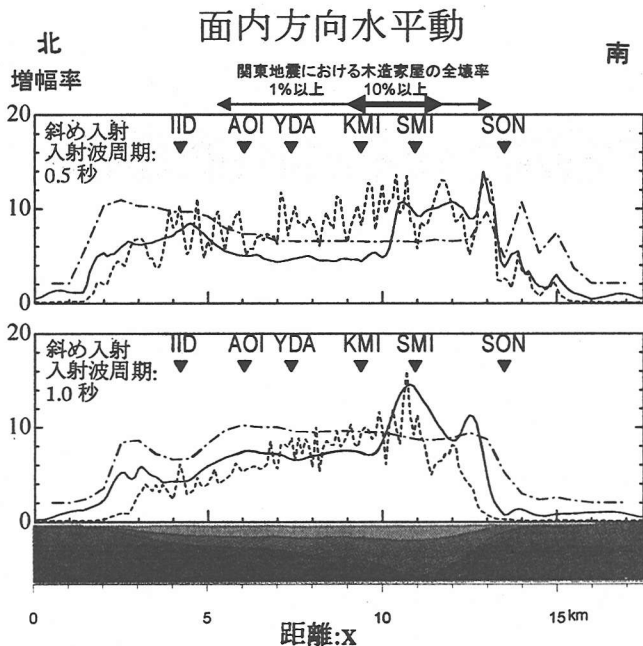


図-9 地表面での水平動の増幅率の分布（斜め入射）

謝辞：地震観測には、東京工業大学大町達夫教授・翠川三郎教授、地震防災フロンティア研究センター松岡昌志氏、甲府市防災対策課、山梨県消防防災課の協力を得ている。記して謝意を表す。

参考文献

- 1) 宇佐美龍夫：新編日本被害地震総覧増補改訂版，東京大学出版会，1996。
- 2) 長橋純男：地震動強さの距離減衰に及ぼす震源深さ

の影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.631-632，1983。

- 3) 山口亮，年縄巧：1923 年関東地震における甲府盆地の被害分布の成因；土木学会第 52 回年次学術講演会 [1-B] pp.490-491，1997。
- 4) 小池一之，山中浩明，栗田勝実，年縄巧：長周期微動アレイ観測による甲府盆地の S 波速度構造の推定；1998 年地球惑星科学関連学会合同大会 Sm-021，1998。