

# 造成地における地震被害のモデル化

宮城県仙台第三高等学校

地震の被害は様々ある。今回我々は造成地での建物倒壊の被害に注目した。造成地の中では盛土部や切土盛土の境界部で被害が多いことと、盛土の深さと震度には比例関係がみられるといったことが研究から明らかになっている。我々は、実際の地震発生時のようなふるまいを見せる造成地モデルの製作を目的に実験を行った。モデルは吸水スポンジと粘土を使い地盤に見立て作成した。モデルの再現性を検証し、修正を重ね、結果として完成したモデルは、盛土と切土の境界付近に限ってのみ現実にも即したといえるものであり、深く盛土が積まれた場所での再現性が認められなかったが、モデルのサイズを見直すことでこの点については改善する余地があり、1つのモデルで造成地を再現できると推測される。

## 1 背景

日本は世界的に見ても有数の地震大国であり、津波や火災、土砂災害等、二次被害を含め様々な種類の被害がみられる。我々は今回、地震被害の中でも建物の倒壊に注目した。建物の倒壊は、即時的に我々に被害を及ぼすものであり、なおかつ宮城県沖地震や東日本大震災の際に宮城の様々な地域でみられたものだ。この事象に関して研究を進めることで、地震の一次被害を小さくし、減災へと繋げることができるのではないかと考えた。

建物の倒壊はどんな場所でも起こりうる事象であるが、実際には住宅造成地での発生の割合が非常に多い。その原因は造成地内で土地の性質が大きく2つに分かれていることにある。その2つとは切土と盛土である。それぞれ土地を平坦にするために行われる操作、あるいはその操作によって変化した地面そのものをいうが、今回は後者の意味でこれらの用語を使用する。切土とは斜面部分を切り取って平らにした部分であり、もともと存在する部分であることから比較的堅固な地盤としては強固である。対して盛土とは谷地形や斜面部分を埋めるよう外部から持ってこられたもので、これは切土で削り取られた土を流用することもあるから、性質は切土とあまり変わらないことが多い。しかしながらこれは人工的に土を載せたものであるから、地盤としては非常に脆弱であると言われている。東日本大震災後の仙台市南光台での被害調査では、盛土のほうが切土よりも地震被害(全壊)の割合が約25倍との結果が出ている(文献1)。また、同調査においては地震被害の割合はさらに切土と盛土の境界線上で大きく、切土地盤上の約26倍であった。また、日本は平地の面積の割合が少なく、1億を超える人口すべてがもともとある平野・盆地だけで生活することは難しい。日本の大規模盛土造成地の概数は、令和2年に公表された調査結果によると51,306カ所(面積約10万ha)で(文献2)、これが東京二十三区の1.5倍ほどの面積にもなることからその大きさを理解することができるだろう。このように住宅造成地は現在、私

達にとってなくてはならない、非常にありふれたものとなっている一方で、その必要性の大きさに反して危険性も孕んでいるのだ。

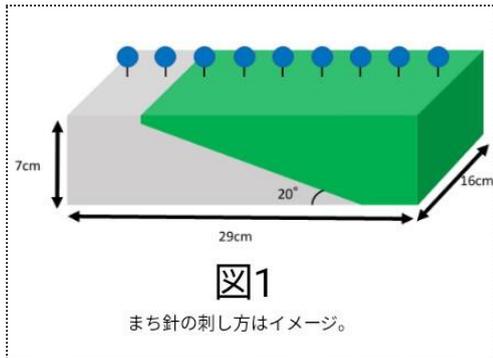
本研究の目的は、実際の被害の結果や地盤の性質を再現した実験モデルを作成することで、地震発生時の地盤や建物の状況を再現して、地震の被害を定量的に評価できるようにすることである。しかし、地形や地質など地震被害の程度が変化する条件は多様であり、それらを一括で表現し制御するのは困難であると判断した。そこで「盛土の深さ」だけに注目したモデルを作成することを目的とし、それが地震の被害の規模にどのような影響を及ぼすのかを明らかにしようとした。実際の造成地で見られる、盛土の深さと関連のある性質で、今回再現を目指すのは次の2つとする。

(1) 盛土の深さとその地点の震度に正の相関がみられるということ(文献3)。

(2) 造成地の中でも、盛土部や、切土と盛土の境界部での被害が比較的顕著にみられるということ。

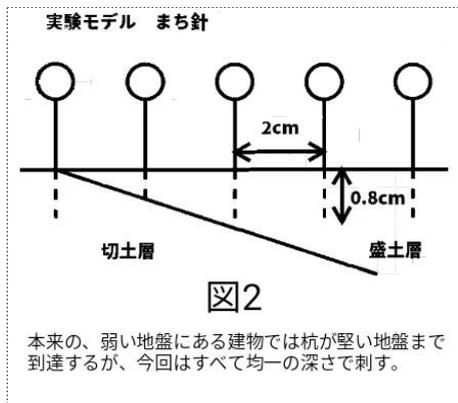
## 2 モデル1号の規格と実験方法

モデル地盤の作成にあたって、用いた素材は2種類ある。身近で手に入るような油粘土と園芸用吸水スポンジである。これらの素材は強度差が非常に大きく、形をある程度自由に変形できることから、造成地のモデルとして最適であると判断し使用した。以降油粘土を粘土と、園芸用吸水スポンジをスポンジと表記する。はじめに製作したモデル(図1、以降モデル1号または1号と表記)では、粘土を切土として、スポンジをふるいで細かく砕いたものを盛土として使用した。これらを透明なケースの中に入れ、切土の斜面の角度は実際のものに近い値とすることを目的に、仙台三高の切土の斜面の角度(文献4より)をもとに約20°になるよう調整した。



モデル1号で造成地の性質が再現されているか検証するために、まち針を建造物に見立てて等間隔に地表に刺し、実際に揺らしてみること、盛土の深さが変化するとこのモデルでどのように被害に違いが生じるかを検証した。まち針の刺し方は図2の通りで、切土に3本、境界線に1本、盛土に6本(実験計12回のうち3回は盛土に4本のみ刺した)を1列に並ばせ、この並びを1つのモデルに2列並べた。またその際、揺れを起こす装置として振盪機を採用した。

振盪機は、本来は主に生物などで、試験管などの中の試料を振り混ぜるときなどに用いられる装置であり、一定速度・一定距離での回転運動を起こすことができる。今回は回転運動ではなく直線の往復運動を用いて、機械の上にモデルを固定して疑似的な地震発生実験を行った。そのため本実験での擬似的な揺れはすべて横揺れである。揺れは100rpm、150rpm、200rpmの3段階の強さで、さらにそれぞれ揺らす時間を30秒、60秒に設定した実験をそれぞれ2回ずつ、計12回試行した。1回の実験で2列ずつまち針を並べたため、最終的なデータの数は3(rpm)×2(時間)×2(回)×2(列)=24となる。rpmとは1分間の振盪機の回転数を示す単位(revolutions per minuteまたはrotations per minute)であり、本実験の場合は振盪機が左右に往復した回数である。rpmが上昇することで、振れ幅は変わらないが揺れる速さが大きくなる。

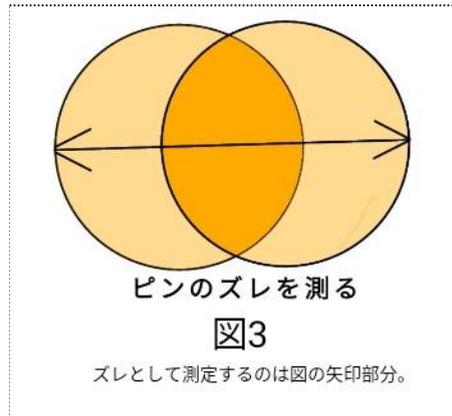


本実験の評価は次の手順で行う。

- (1) 実験の開始前と終了後に同じ位置、高さ、ズームの大ききで上から写真を撮影する。
- (2) 撮影した2枚の画像半透明にし、それぞれを重

ね合わせる(画像の加工にはOVERLAY CAMERAを使用した)。

(3) 実験前後でまち針がどのくらい動いたかを測定する。長さを測定するのは重ね合わせた画像で、2本のまち針の端と端とで最も長くなるような線分であり(図3)、まち針の実際に動いた距離ではない。この際、測定値は、画像内のズレをそのまま実測し、実際の距離になるよう倍率を掛けたものであり、細かい部分までの測定はできない。しかし本実験の目的は正確な値の導出ではないため、こうした手段で計測しても結果に影響が出ないと判断し、この測定方法を採用した。



### 3 モデル1号の実験結果と考察

結果のグラフは図4で示したものである。切土層では、境界線からの距離に関わらずまち針はほとんど傾かなかったのに対して、盛土層では元の位置からのまち針のズレが盛土の深さに比例するように大きくなっている。盛土層での相関係数はおよそ0.905となり、強い正の相関を示した。しかし、境界線での縦軸の値は切土層とほとんど変わらなかったことから、モデル1号は背景のなかで示した造成地地盤の性質のうち、「(1)盛土の深さとその地点の震度に正の相関がみられるということ」のみ再現できているものであるといえる。



ここで、境界線において被害がうまく現れなかった原因として考えられたのが、盛土と切土を再現する素材の硬さの差が大きすぎているため

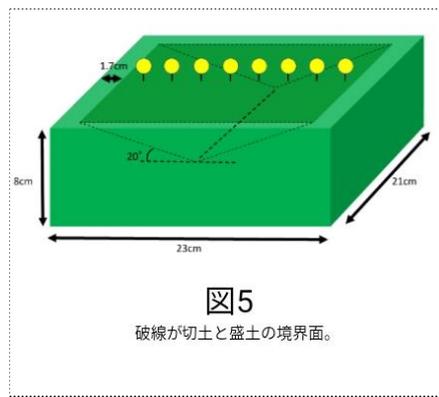
はないかということである。前述の通り、盛土は切土を作るため切り出された土であることが多く、素材としての性質に双方に極端な差は現れることは少ないはずであるが、今回使用した粘土とスポンジでは互いに質量、変形しやすさ、流動性に関してあまりに大きな差があった。粘土層は基本的に動くことはなく、境界での切土の影響が実際以上に大きくなってしまったのではないかと考え、我々はこうした観点から一度素材の見直しを実施した。

#### 4 予備実験

適切な素材の選定を実行するために、擬似的に対象となる素材のN値を測定した。N値とは、地盤の性質を調査するために行われる試験(標準貫入試験という)によって求められるもので、地盤の締まり具合などの指標となる数値である。実際の測定は63.5±0.5kgの重りを75cmの高さから自由落下させ、サンプラーを土中に30cm貫入させるのに要する打撃回数を数えるものであり、その打撃回数がN値である(文献5)。我々の実験では擬似的にN値を測定し、2種類の素材間にN値の差が出るような切土、盛土の組合せを探した。25.5cmの筒から1つのビー玉を落とし、素材でできた地盤が1cm沈む回数を測定した。参考として、仙台三高のN値は、盛土部分が40~50、切土部分が2~21である(文献4)。このように、実際の同じような地質条件でもN値の振れ幅が大きく、またN値の上限は50であることから、あくまでN値の値に差が出るような組合せを見つけるだけで、実際の値にそのまま合致するかどうかは求めなかった。実験の結果として、砕いていない状態のスポンジと、砕いて何もしていない状態から体積が10分の7になるように圧縮させたスポンジでN値にある程度大きな差がみられたことから、この2つをそれぞれ切土と盛土として2つ目の実験モデルを制作した。

#### 5 モデル2号の規格と実験方法

予備実験の結果から、砕いていない状態のスポンジを切土に、砕いたスポンジを盛土を表現する素材としてモデル2号を作成した(図5)。内側の濃い緑で表されている部分が盛土部であり、1号とは異なり谷を埋めたような地盤になっている。1号では盛土の最深部のすぐ横に壁(容器)があり、これが実験に何らかの影響を与えてしまう可能性を考慮して谷埋め型にした。なお、切土は流動性がないためモデルはケース等に入っていない。今回まち針は切土には刺さず、境界に1本、盛土に4本刺したものを5列用意した。実験は計30回行ったので、データの数は30×5(列)=150である。まち針の刺し方、測定方法、振盪機の使用はモデル1号の実験と同様である。



#### 6 モデル2号の実験結果と考察

2号の再現性を検証する実験の結果を示したグラフが図7である。3本の線は揺れる時間の長さの違いを示している。この結果から読み取れるモデル2号の特徴は2つ。1つ目としてはまず、境界直ぐ側の盛土部分において、揺れの長さに関わらずまち針のズレが最大であるという点。第2に盛土の深さとまち針のズレの間に正の相関関係がみられなかったということである。第2の特徴から、盛土の比較的深い部分に関してみたとときに、このモデルに再現性はないと考えられる。また、第一の特徴に関して、どこまでを盛土とみなすか、あるいは境界部分とみなすかによっては、再現を目指す性質のうち「(2)造成地の中でも、盛土部や、切土と盛土の境界部での被害が比較的顕著にみられるということ」を満たしているとの解釈も可能である。そこで、この性質に現実性が見られるか検証するために先行研究との比較を行った。

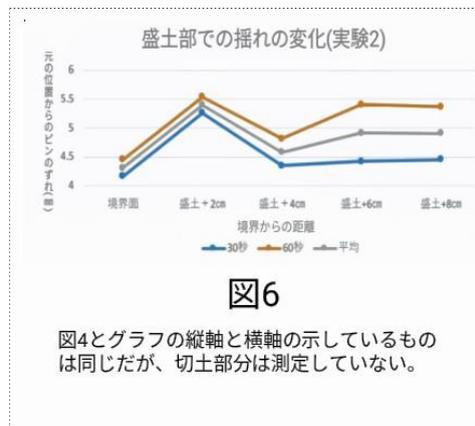
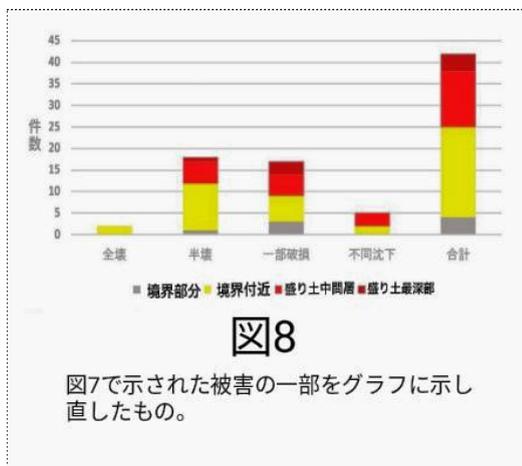


図7は仙台市南光台の盛土切土図に東日本大震災の際に損害を受けた家屋をプロットしたものである(文献1)。暖色が強くなると盛土が深く、寒色が強くなると境界から大きく離れた切土部分となる。図8は図7のうちエリア2と示されている地域での住宅被害件数を示したもので、盛土の深さを示す色は図8と概ね対応させている。



これらのデータから、境界直ぐ側の盛土部分を示す黄色部分において被害が集中していることがわかり、モデル2号は目標(2)の観点に関して、つまり境界付近においてのみ再現性を持つと結論づけることができる。

## 6 結論・今後の展望

モデル1号・2号それぞれの特性をまとめると以下ようになる。

(1)1号は盛土の深さとまち針のズレに正の相関関係がみられたものの、切土を基準にしたときには、境界では大きく動いたまち針の数の割合が小さかった。

(2)2号は境界付近においてはズレが大きく、地震発生時の再現性がみられたが、盛土が深い部分では再現性がみられなかった。

我々の作った2つのモデルは、その双方がモデルの一部分の領域でしか現実と同様の振る舞いをしないという結果になった。しかし、双方のモデルには補完性があり、互いに再現性のみられる部分だけを抽出した第3のモデルを作るとは比較的容易だろう。モデル2号は1号に比べ、振盪機で揺らせる物体のスケールの都合上、盛土の浅い部分までしか測定できない。2号の谷部分を加工し、両方の斜面を20°にするのではなく、片側の斜面のみ20°にして谷の筋となる地点をより深く

したモデルなら、全体のサイズを保ったままの、今回の目標となる性質をすべて持つモデルとなるであろう。

その他に今後の展望として挙げられるのは、1つのモデルでより複雑な地形を再現することだ。我々の実験は盛土の深さと地震被害との関係だけに焦点を当てて行ったが、前述の通り実際の地形は地盤の組成や構造にも様々な種類があり、盛土の硬さや広がり方といった要素も複雑に絡み合っていてきている。そういった複雑な土地を一括で再現することができれば、より総合的に、現実のあらゆる地盤の状況に対する地震被害を検証が可能になる。

加えて、実験の結果を用いて地震対策用のハザードマップを作成することも有効だと考えている。定量的に示された実験結果を実際の地盤に落とし込めれば、ある特定の地域でどこが危険なのかを具体的に割り出して有事の際に適切な行動を取ることができるようになると考えている。

## 7 参考文献

- 文献1) 2011年東北地方太平洋沖地震における仙台市泉区の谷埋め盛土造成宅地の被害調査  
森友宏、風間基樹 地盤工学ジャーナル Vol. 7, 2012
- 2) 全国に51,306カ所の大規模盛土造成地の存在が明らかに！～全国すべてで大規模盛土造成地マップが公表されました～ 国土交通省 2021/6/14 [https://www.mlit.go.jp/report/press/toshi06\\_hh\\_000049.html](https://www.mlit.go.jp/report/press/toshi06_hh_000049.html)
- 3) 造成地の旧地形形状が地震応答に及ぼす影響  
森友宏 第45回地盤工学研究発表会, 2010
- 4) 宮城県仙台第三高等学校校舎耐久度調査に伴う地質調査委託業務  
報告書 財団法人宮城県建築住宅センター 東北ボーリングさく泉株式会社, 1996
- 5) ボーリング標準貫入試験 地盤と向き合い、未来をみつめる ジオテック株式会社 2021/6/2 <https://www.jiban.co.jp/>
- 6) 大規模宅地造成による切土盛土地盤の地震動特性の評価 関口 徹、中井 正一 日本地震工学会論文集, 2015
- 7) 仙台市宅地造成履歴等情報マップ