

表層地盤と地震動の性質

吉田 望
●東北学院大学

1. はじめに

断層で発生した地震動は、断層→地震基盤→工学的基盤→地表の様に途中で地震基盤と工学的基盤を介して地表に伝播していると考え、これらによって区切られる三つの領域の挙動はそれぞれ独立して扱われるのが一般的である。このうち、工学的基盤より上の部分は、工学の分野では表層と呼ばれる。

これら三つの領域は工学的には、次のように意味づけることができよう。まず、断層から地震基盤までは地震動が空間的に広がり、拡散する挙動で、いわゆる距離減衰が支配的な現象である。これに対して、地震基盤以降では、拡散せず波動は一方向に進行していく。この中で、地震基盤から工学的基盤までは一方通行の過程で、この間では地震動は増幅する。また、この間では挙動は弾性的である。これに対して、表層では地表で反射した波も挙動には支配的であり、波の進行は双方向である。また、表層では非線形挙動が卓越したり、液状化が起こったりするが、これにより地震動は大きな影響を受ける。

本論では、特に表層の地震動に焦点を絞り、地盤の力学的挙動が波動に与える影響を述べる。

2. 地震動増幅のメカニズム

軟弱地盤では地震被害が多いことはよく知られているが、これは、軟弱地盤では地震動が増幅することによる。議論を簡単にするために、地盤を水平成層と考え、地震波が鉛直下方から入射すると設定する。すなわち、一次元にモデル化できるとして、増幅のメカニズムを考える。

地盤が弾性的に挙動するときの地震動増幅のメカニズムには次の三つの要因がある¹⁾。

① 波動の伝播速度の変化

地表に近いほど波動の伝播速度は遅くなる。このため、後ろの波が前の波に追いつくので、波動のエネルギーが集中する。このエネルギーはひずみエネルギーとして消費されるので、波動の振幅が大きくなる。

② 地表における反射

地震波は地表で反射するが、反射波の位相は入射波と同じであるので、入射波と反射波が重なると、振幅

は2倍になる。すなわち、反射したとたんに地震動は2倍に増幅すると考えることができる。なお、地下に行くほど位相はずれるので、増幅度は小さくなる。

③ 地下での反射

地表で反射して下に向かう波動は、速度が異なる層に達すると境界で一部が反射する。反射率は二つの層のインピーダンス比が大きいほど大きいので、地盤が軟弱なほど反射する量が多くなる。すなわち、地下逸散減衰が少なくなり、地表には多くの振動のエネルギーがたまり、地震動の継続時間が長くなる。

このうち、①は波動伝播速度の差があればどこでも起こり、地震基盤→工学的基盤の間で地震動が増幅する原因となっている。これに対して、②、③は表層に特有の現象である。また、軟弱地盤ほど①による増幅が大きくなる。図1は1989年ロマプリエタ地震の際の余震観測の例であるが、軟弱地盤の地震動増幅の特徴がよく表されている。すなわち、地表まで岩の地盤では揺れも小さいし、継続時間も短いのにに対して、表層が軟弱地盤である沖積層では、振幅が大きく、また、継続時間も長くなっている。

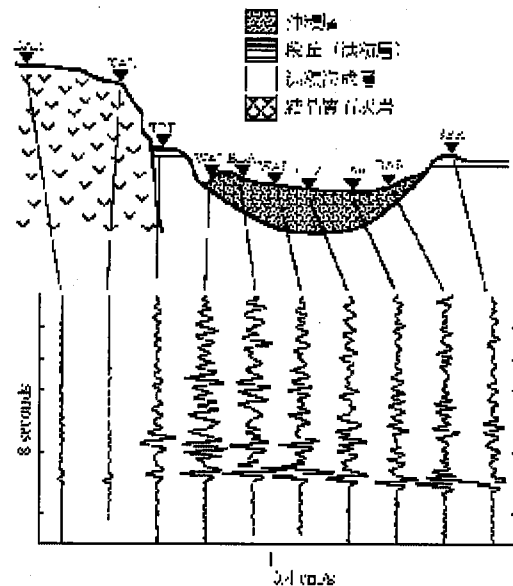


図1 地震動増幅の観測例(文献²⁾を修正)

3. 非線形挙動の影響

前節は弾性挙動を想定した説明である。しかし、土は小さいひずみから非線形を示す。ここでは非線形挙動が地表の応答に与える影響を検討する。

3.1 地震動の上限

図2はIdrissによる1985年メキシコ地震および1989年ロマブリエタ地震による観測と数値計算の結果³⁾に筆者らによる1995年兵庫県南部地震の整理結果⁴⁾を重ねたものである。北米では工学的基盤という概念をあまり用いないので、図の横軸は岩盤サイトとなっているが、同じようなものと考えてよい。図によると、入射波の最大値が小さいうちは地表の最大加速度は3倍程度に増幅しているが、入力が大きくなるに従って、増幅比は小さくなり、やがては地表の方が最大加速度は小さくなる(減衰する)。地震動が大きくなれば、非線形性のために剛性が小さくなるので見かけ上軟弱

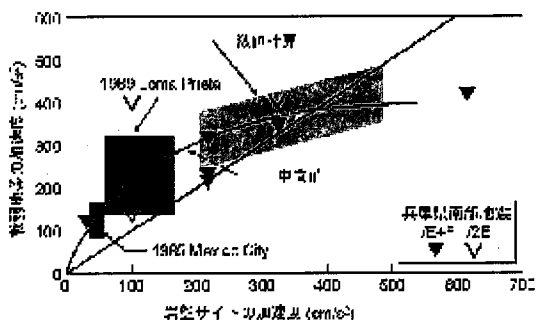


図2 地震動増幅と入力加速度の関係

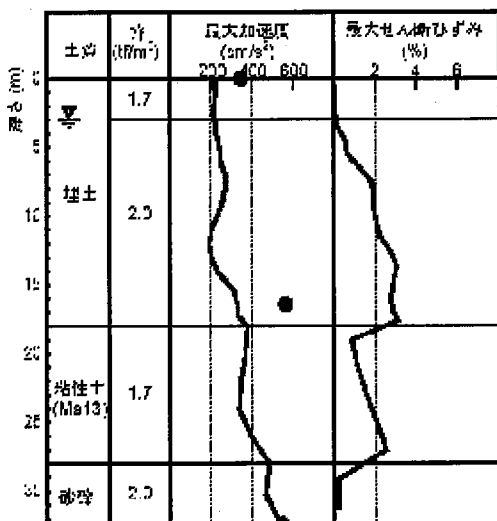


図3 最大加速度分布 (ポートアイランド)

地盤の条件に近くなるので、この現象は前項の説明と矛盾しているように見える。

この原因を考えるための例題を図3に示す。この図は1995年兵庫県南部地震の際鉛直アレー記録が得られたポートアイランドの解析である⁵⁾。このサイトでは液状化が話題となったが、筆者はその下にある軟弱な沖積粘性土層 (Ma13) が表層の挙動に大きく影響していることを指摘してきた^{4) 5)}。図では最大加速度が示されているが、最大加速度は粘性土層で大きく低下している。すなわち、地震動が減衰している。これが、図2で入力地震動が大きくなると地表の最大加速度が小さくなる現象である。図3には最大ひずみも示しているが、最大ひずみは粘土層で2%を超えている。粘土層でひずみが大きい層の応力-ひずみ関係を図4に示すが、応力-ひずみ関係はほぼ完全塑性状態を示し、著しい非線形挙動をしていることがわかる。

よりわかりやすくするために、図5に土柱に作用する慣性力とせん断応力との釣合を示す。(a)は力学等でもおなじみの厚さdzに作用する力で、これより波動方程式が得られることはよく知られている。これに対して(b)はある深さzより上の全体に対する釣合である。この土柱に全体として作用する慣性力 $m\ddot{u}$ は深さzの位置のせん断応力 t と釣り合うので、次式が成立する。

$$\tau = m \ddot{u} \quad (1)$$

ここで、 m は上部土柱の質量、 σ_v は上載圧、 G は重力の加速度である。この式は、図4の様にある層が完全

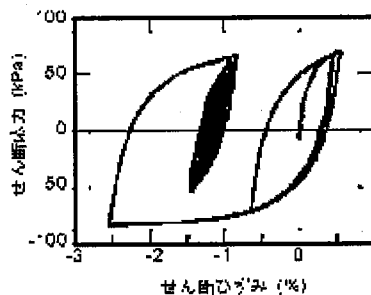


図4 応力-ひずみ関係

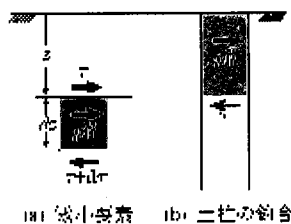


図5 土柱の力の釣合

ているところがあるが、これが、震災の帯の南限に当たっている。一方、図9の断面図を見ると、この位置は図3、図4でも示した軟弱な地盤である沖積粘性土(Ac)層の北限に対応している。すなわち、震災の帯の南限は沖積粘性土層の非線形挙動によって決まっている可能性がある。実際、地質的な調査によれば震災の帯の南限より北では沖積粘性土層は見つかっていない⁷⁾。なお、図10で最大速度は低下していないが、その原因はすでに述べたとおりである。

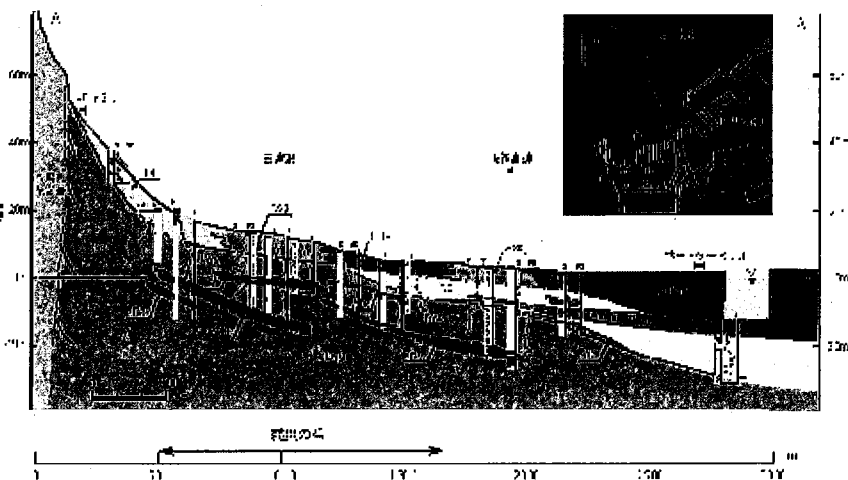


図9 三宮付近を通る断面図

4. 液状化の影響

液状化は地盤の破壊現象と考えられるので、先と同じような現象が発生する。液状化サイトの地震記録が初めて得られたのは、1964年新潟地震で、8棟すべてが転倒、傾斜した川岸町アパートの2号棟の地下と屋上に加速度計が設置されていた。図11にその波形を示す。ここで、7秒を境に地震動が急激に長周期化しているが、これが液状化の開始と考えられてきた。

この記録は、その後、工藤ら⁸⁾が再解釈を試み、7秒から始まる地震動は断層からの直達S波であること、地下と屋上の記録からロッキング挙動を調べると、12秒付近から特性が変わることから、7秒からの長周期化は液状化でなくても説明できると議論をした。その後、筆者が解析により確かめたところ、やはり同じ結論が得られている⁹⁾。すなわち、液状化の発生は12秒付近と考えられる。液状化が発生すると周期は著しく長くなり、また、振幅は小さくなる。これは、地盤の非線形の時と同じメカニズムである。

ZeghalとElgamel¹⁰⁾は別の観点を持ち込んだ。彼らは1987年Supersition Hills地震の際にWildlifeの鉛直アレー記録で得られた過剰間隙水圧の記録に表れた振動波形と、加速度記録から求めた応力-ひずみ関係との対応から、図12に引き出し線で示した部分はサイクリックモビリティによるものである可能性を指摘した。サイクリックモビリティとは、液状化の過程で粒子構造の再構成に伴い強度、剛性が急激に上昇する現象である。すなわち、液状化すると、強度が0になるのではなく、そのような領域もあるが、骨格構造が再形成

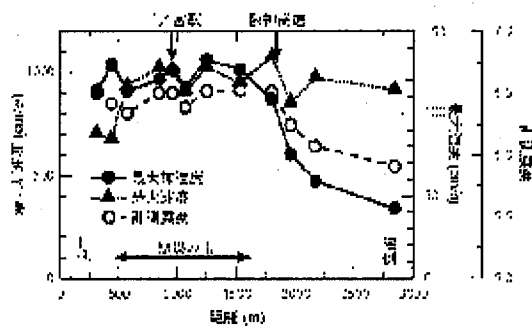


図10 最大応答値の変化



図11 川岸町で得られた液状化時の加速度時刻歴

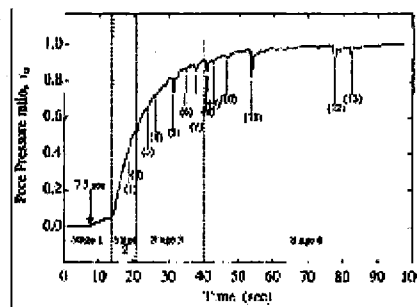


図12 Wildlifeサイトの記録と解釈

され、剛性が上昇する領域があり、このとき、過剰間隙水圧が減少すると考えた。

同様な現象はその後の地震でも観測されている。図13では30秒以降で長周期化と同時に鋭いピークを持つ現象が見られるが、これはサイクリックモビリティによるものである¹¹⁾。

このように液状化し、サイクリックモビリティが発生すると、長周期化に加え、応力-ひずみ関係と相似な形、すなわち、下に凸な形状で加速度が急上昇し、さらに、除荷に対応した部分で、急激に加速度が減少する波形が見られる。

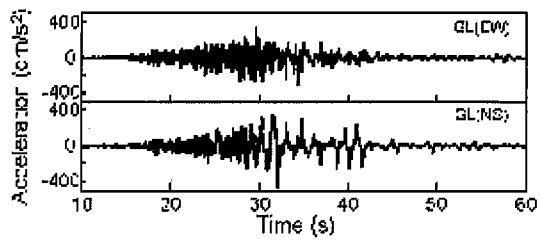


図13 1993年釧路沖地震の記録

5. 減衰の影響

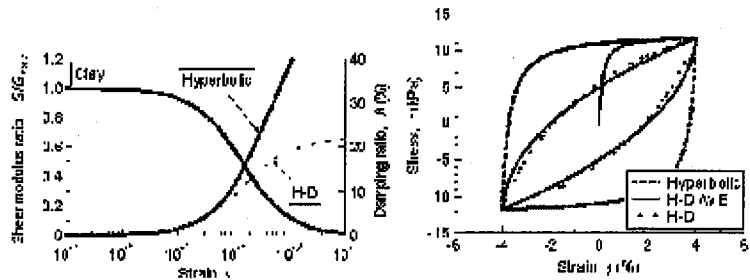
最後の話題は、実現象ではなく解析の解釈に関するものである¹²⁾。一般の振動系では減衰が大きいと応答が小さくなることが知られている。地盤の解析に使われる構成モデルの中で減衰が大きいののは双曲線モデルである。このモデルを使った解析では最大加速度が他と比べ小さくなることが多く、その原因はしばしば、減衰が大きいためであると説明されている。

図14 (a) に動的変形特性を示すが、双曲線 (Hyperbolic) モデルと実際の材料により近いHardin-Drnevich (H-D) モデルではひずみが大きいところで減衰が大きく異なる。対応して、図14 (b) に示す応力-ひずみ関係にも大きな差が見られる。なお、図14 (b) には二つのH-Dがあるが、 $1/w E$ とあるのはひずみに伴う弾性剛性の変化も考慮したケースで、今回の議論の対象外である。

図15に最大応答値を示すが、ひずみが5%以上にもなっているのに、最大応答値にはほとんど差がない。これは、前に説明した上限加速度に至っているためである。すなわち、大地震をターゲットとするのであれば、減衰の値は最大値にはあまり影響を与えない。

では、挙動に影響を与えないかというところではない。図16には地表の加速度から求めた応答スペクトルが示されているが、長周期応答は両者で差がないが、短周期応答では減衰の大きい、双曲線モデルの方が大きな加速度応答を示している。すなわち、短周期領域では双曲線モデルの方がよく揺れているのである。

この原因は図17の応力-ひずみ関係を見ると理解できる。双曲線モデルでは剛性の大きい履歴挙動が多いのに対して、H-Dモデルでは剛性の小さい履歴挙動が多い。これは、図14 (b) から理解でき、双曲線モデ



(a) 動的変形特性

(b) 応力-ひずみ関係

図14 双曲線モデルとH-Dモデルの比較

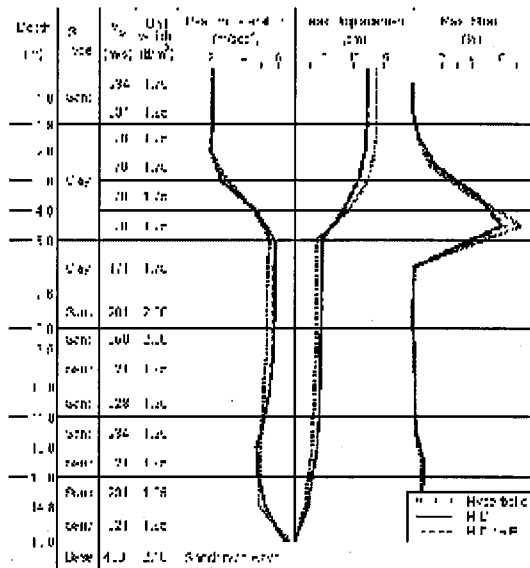


図15 最大応答値の比較

ルではせん断強度に近い大きさのせん断応力になるまでは剛性が大きいですが、H-Dモデルでは全体的に剛性が小さい。これが、短周期成分の応答を大きくしていることは容易に想像できる。

この例は、弱層があることによって生じる加速度の上限に伴う見かけ上の地震動の減衰と、履歴挙動による減衰を区別して論じることの重要性を示唆している。

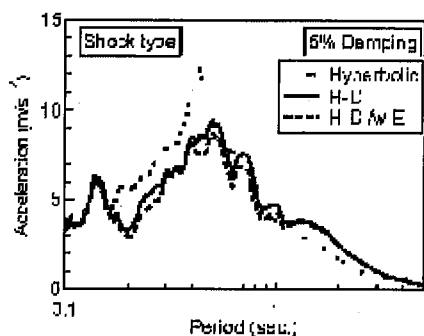


図16 応答スペクトル

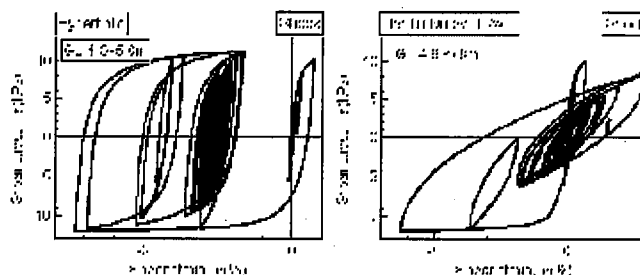


図17 応力-ひずみ関係

6. おわりに

地盤の非線形地震応答に関し、いくつかの話題を提供した。これをまとめると、以下のものである。

- 1) 表層では、三つのメカニズムにより揺れが大きくなる。非線形性が著しくない状態では、表層では地震動は増幅する。
- 2) 非線形挙動が影響するようになると、振動は長周期化し、表層の増幅も小さくなる。表層で地震動が減衰することもある
- 3) せん断強度に支配され、地表の最大加速度には上限がある。前項の減衰がこれが原因である。同様に、計測震度、SI値にも上限が現れる。一方、最大速度や最大変位には上限がない。
- 4) 小さい地震に対しては地盤全体の速度構造が応答に影響するが、非線形挙動が卓越すると、地盤全体の力学特性より、一番弱い層の挙動が地表の応答に与える影響が大きくなる
- 5) 地震動の増幅を論じる際には、履歴減衰と共にせん断強度によって支配される上限地震動も考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 吉田望 (1999) : 大振幅地震動と地盤-非線形の問題-、地震ジャーナル、地震予知総合研究振興会、第28号、pp. 66-74
- 2) 亀田弘行 編集 (1990) : 1989年ロマブリエタ地震によるサンフランシスコ湾岸地域の被害に関する調査研究、文部省科学研究費 総合研究 (A) 突発災害研究成果 重点領域「自然災害」総合研究班、347pp.
- 3) Idriss, I. M. (1990) : Response of Soft Soil Sites during Earthquakes, Proceedings, H. Bolton Seed Memorial Symposium, Berkeley, California, Vol. 2, pp. 273-289
- 4) Suetomi, I. and Yoshida, N. (1998) : Nonlinear

- behavior of surface deposit during the 1995 Hyogoken-nambu earthquake, Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu earthquake, No. 2, pp. 11-22
- 5) 吉田望 (1995) : 1995年兵庫県南部地震におけるポートアイランドの地震応答解析、土と基礎、Vol. 43、No. 10、pp. 49-54
- 6) 東畑郁生、Rontex, S. (1988) : N値から推定したVSの誤差が地震応答解析結果に及ぼす影響、第23回土質工学研究発表会講演集、pp. 825-826
- 7) 阪神・淡路大震災調査報告書編集委員会 (1998) : 阪神・淡路大震災調査報告書、共通編-2、地震・地震動、地盤・地質、(土木学会、日本建築学会)、丸善、p.389
- 8) Kudo, K., Uetake, T. and Kanno, T.: Re-evaluation of nonlinear site response during the 1964 Niigata earthquake, using the strong motion records at Kawagishi-cho, Niigata City, Proc. 12WCCE, Auckland, New Zealand, Paper No. 0969, 2000
- 9) 吉田望、工藤一嘉 (2000) : 1964年新潟地震における川岸町の液状化に関する地盤工学的再検討、日本建築学会学術講演概要集 (東北) 構造II、pp. 293-294
- 10) Zeghal, M. and Elgarnal, A.-W. (1994) : Analysis of site liquefaction using earthquake records, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 120, No. GE6, pp. 996-1017
- 11) Iai, S., Morita, T., Kameoka, T., Matsunaga, Y., and Abiko, K. (1995) : Response of a dense sand deposit during 1993 Kushiro-oki earthquake, Soils and Foundations, Vol. 35, No. 1, pp. 115-131
- 12) 吉田望、澤田純男、竹島康人、三上武子、澤田俊一 (2003) : 履歴減衰特性が地盤の地震応答に与える影響、土木学会地震工学論文集、第27巻、Paper No. 158