

地盤の振動性状と地震応答

橋 詰 豊

要 旨

大きな地震のたびに、様々な形で被害が発生する。特に土木構造物や建築構造物被害は、人々の財産に損害を与えたり、人命に直結するも少なくない。また、社会全体に与える影響も非常に大きい。

地震による構造物の被害を防ぐためには、所要の強度や柔軟性等を設計上付与しなければならず、構造物に作用する力（地震エネルギー）の規模や形態を的確に把握する必要がある。そのためには地震動を伝達する地盤の動的性状を明らかにすることが求められる。

地震の本質は、衝撃を含む振動エネルギーの形態であるところから、その伝達過程で地盤の振動性状によって多様に変化する。地表面付近で発生する地震被害は、その下の地盤の振動性状と強く結び付くが、そのメカニズムは必ずしも明確ではない。

本研究ではこれらの関係を常時微動及び砂地盤の液状化現象の観点から捉えることとした。前者は地盤振動のひずみが 10^{-6} 以下のほぼ弾性領域の振動応答であり、後者は地盤が破壊に至る弾性領域から塑性領域に至る現象（一種の破壊現象）である。

地盤の常時微動は不特定の距離や方向の様々な震動源（自然・人工の両方）より発振された波が、伝わる個々の媒体（地盤）の性質によって、減衰、増幅、屈折、反射、合成を繰り返して、定常状態になったものを測定した振動である。そのため、地盤の固有の振動特性を調べる、有力な手がかりとなる。また、常時微動測定は精度の点ではボーリング調査や物理探査ほどではないが、調査地点を痛める事をせず、簡便にかつ低コストで多数の地盤情報を得る事が出来る。そのため、構造物被害の情報と照らし合わせる分析が可能である。本研究では三陸はるか沖地震時の構造物被害や地中に埋設されている水道管の被害と、地形、地盤の振動性状との関係を明らかにした。同時にボーリングによる地質データを用いた振動応答解析結果と常時微動測定結果を比較することにより、地盤の卓越周期の振動特性と地盤条件とのより細かい関係が得られた。

一方、地盤の塑性領域での破壊現象である液状化現象に関しては、数多くの研究成果が発表されているが、実際の液状化現象では、既応の研究の中の実験で再現されているような大きな加速度が観測されない、地震の主要動より遅れて液状化現象が発生する、加速度の小さい長周期波動が長時間観測される、砂地盤だけでなく砂礫地盤やシルト地盤でも観測される、明確な噴砂現象が観測されなくても大きな変位が残る事がある、などの点で強い地震波の繰り返し作用のみでは説明の付かない現象も見られる。

液状化現象は地震振動により飽和砂地盤が剪断変形し、過剰間隙水圧が生じて砂粒子間の有効応力が減少するために発生する。本研究では、この剪断変形をせしめる原因とその発生エネルギーの

学位と学位記番号：博士（工学）、博第9号

授与年月日：平成13年9月15日

授与時の所属：八戸工業大学大学院工学研究科土木工学専攻博士後期課程

メカニズムに着目し、次のような仮定を設けた。

一般に波動（地震動を含むすべての波動）は、堅い媒体から柔らかい媒体には伝わりやすい。しかし、柔らかい媒体から堅い媒体へは伝わりにくい。そのために堅い地殻を伝播し、基岩から入ってきた地震動エネルギーは、比較的軟らかい地表面付近の地層に集まってくる。

大きな地震で大量の波動エネルギーを吸収した柔らかい地層は、最終的にそれ自体の固有周期で振動することになる。入力波に応じて一般に1次モードで揺れるが、その上の地層が堅固であれば2次の振動モードで揺れることもある。また、その地層が厚いほど大きなエネルギーを蓄えることが出来る。この蓄積された巨大なエネルギーが上部層の飽和された砂層に大きな剪断変形を与えると、いわゆる液状化現象が発生することになる。

このような観点から過去の地震で液状化現象の生じた地盤を調べ直した結果、そのほとんどが粘土層やシルト層のような変形に対して歪み追従性の高い、柔らかい地層が液状化した砂層の下に厚く分布していることがわかった。

以上の考え方を三陸はるか沖地震時で被災した八戸港に適用し、八戸工業大学の地下20mの古生層（岩盤）で記録された三陸はるか沖地震本震の地震波（最大加速度約150 gal）を液状化地盤の基岩に入力して地盤応答解析した結果、軽い噴砂現象程度の被害しか見られなかった地盤（第1工業港）では、エネルギーの蓄積も少なく、最大歪みも 0.8×10^{-3} 程度であったが、大きな液状化被害を受けた第2工業港（基岩上約500mの砂、粘土の堆積互層）では、 6×10^{-3} の液状化現象の発生するレベルの歪みになった。また、このときの加速度応答は小さく、長周期の波が長く継続しており、上記の仮定や実地盤現象に沿った結果となった。

次に、過去に大きな液状化現象の見られた福井、新潟、能代、木造の地盤において応答計算をしたところ、同じ入力波（三陸はるか沖地震波）にもかかわらず、現地に見られた現象と同様の結果が得られた。従って、地盤の基岩に地震波を入力し、これ以浅の地盤の応答計算を行えば、実際の現象をほぼ再現出来る事が判明した。

これによって現状の液状化現象の予測方法、基礎の設計方法を大幅に合理化する事が出来る。すなわち、液状化地盤上の構造物の基礎の設計は加速度ではなく、変位、変形を主体とした設計上に改める事により、基礎の断面緒元を大幅に縮小する事ができる。

今後は、常時微動測定を前提とする地盤の卓越周期を考慮した構造物設計法の確立や、液状化現象に対する変形を対象にした構造物設計法の具体的な検討が必要である。なお、液状化現象についてはむずかしい事ではあるが、振動実験等で定量的な測定を行い、本研究で明らかにしたメカニズムの実証を行う必要もある。

主指導教員 塩井幸武

Relationship between Vibration Characteristics and Seismic Response of Ground

Yutaka HASHIZUME

Abstract

Every outbreak of a major earthquake inevitably results in damage of various kinds. Particularly, damage to civil engineering structures and buildings often affects peoples' assets and lives. Its impact on society as a whole can be tremendous.

Structures must be appropriately designed and constructed with structural strength, flexibility, and other factors duly taken into consideration in order to prevent damage from earthquakes. Important is an understanding of the size or form of force, or seismic energy in this case, acting on the structure, as this requires clarification of dynamic characteristics of the ground that transmits seismic motion.

An earthquake is by nature a form of vibration energy that includes impacts. It changes in various vibrations due to the characteristics of the ground in the process of transmission. Earthquake on the ground surface is strongly depending on the vibration characteristics of the layers underneath, but its mechanism has yet to be clearly identified.

This study aims to clarify the relationship between earthquake damage and the vibration characteristics of the ground in the context of micro tremors and liquefaction of sandy ground. A micro tremor is a vibration response in an almost elastic domain where the strain of the ground vibration is 10^{-6} or less. Liquefaction is a phenomenon, a kind of failure mode, removing from the elastic to the plastic domain.

When wave motion generated by various vibration sources (both natural and artificial) with unknown distances and directions repeatedly undergoes attenuation, amplification, deflection, reflection, and composition depending on the nature of the medium (ground) through which the wave transfers, it finally settles into a steady state. Ground micro tremors are this wave motion measured at such a steady state. Thus, these tremors may be very important means to evaluate the natural vibration characteristics of the ground. Measurement of micro tremors is an easy-to-use and cost-effective means of obtaining a variety of ground information without damaging the investigation point, although the precision is somewhat less than that of a boring investigation or physical exploration. Micro tremor measurement allows us to make a comparative analysis of the ground with respect to structural damage. This study investigated the relationship between damaged structures and underground water pipes as a result of the 1994 Far-Off Sanriku Earthquake, and the topography and the vibration characteristics of the ground. In addition, the predominant period of the ground was precisely confirmed by comparing the results of vibration response analysis using boring data with the results of

micro tremor measurement, and a close relationship between vibration characteristics and ground conditions was identified.

Liquefaction, one of the failure phenomena in the plastic domain of ground, has been reported in a lot of literatures, but a number of cannot be explained by conventional theories of repeated action of seismic waves observed in actual liquefaction. For example, substantial acceleration, which is used to prove the phenomena in laboratory, is not observed; liquefaction occurs later than the main movement; following long-period wave motion with small acceleration is observed for a long time; liquefaction occurs not only on the sandy ground but also on gravel ground or silty ground; and sometimes substantial displacement occurs and remains even when no clear sand boiling is observed.

Liquefaction occurs when saturated sandy ground undergoes shear large deformation due to seismic vibration, causing excessive pore water pressure to reduce effective stress among sand particles. This study focused on the causes of such shear deformation and the mechanism of its accumulated energy. The following hypothesis is proposed.

It is generally easier for wave motion, which means all wave motion including seismic motion, to shift from hard to soft layers, while it is difficult to move from soft to hard. Therefore, seismic motion energy that went through the hard layer and came through the bedrock tends to concentrate in the relatively soft layer closer to the ground surface.

The soft layer, which absorbs a tremendous amount of wave motion energy from a major earthquake, makes vibrating at its own natural period. If that layer is under another hard layer, it vibrates in secondary vibration mode; if the overlying one is not hard, it vibrates in primary mode. The thicker it is, the more energy that's of layer can store. When such stored energy provides large shear deformation to saturated sandy layers above, liquefaction will result.

Grounds that liquefied in past large earthquakes were re-investigated from this viewpoint and results demonstrated that the majority of such ground sites had a thick and widespread soft layer underneath consisting of pebble clay or silt layer.

The hypothesis discussed above, was applied at Hachinohe Port, which was damaged by the 1994 Far-Off Sanriku Earthquake. Then, seismic waves with a maximum acceleration of about 150 gal in a Paleozoic stratum (base rock) 20 m below ground surface under the Hachinohe Institute of Technology were introduced into the bedrock of the ports where liquefaction occurred, and analyzed ground response. The results indicated that the ground at the 1st Industrial Port, where only minor damage such as sand boiling was observed, stored little energy with its strain of about 0.8×10^{-3} and that the ground at the 2nd Industrial Port, damaged major liquefaction with alternative bed sand and clay layers of about 500 m above bedrock, had a level of strain that reasonably caused 6×10^{-3} liquefaction. Acceleration response was small and long-period waves continued, producing results that agree with the hypothesis drawn above and the actual ground phenomena.

Next, response of ground at Fukui, Niigata, Noshiro, and Kizukuri where serious liquefaction had occurred in the past was calculated. Although the seismic waves introduced are same

as those from the 1994 Far-Off Sanriku Earthquake, the similar results as those seen at Hachinohe Port were obtained at those sites. Therefore, the results indicated that actual phenomena can be readily reproduced by seismic waves from the bedrock and calculating the response of the intermediate layers.

This procedure provides remarkable rationalization of the current prediction method of liquefaction and the current design method of foundation. In other words, the new procedure can reasonably reduce in the dimension of foundation by considering displacement and deformation, not great acceleration.

A structural design method based on the measurement of micro tremors and the predominant period of the ground is recommended and the current design method for liquefaction be done with regard to deformation of sand layer caused by seismic waves. Should be renewed farther more. It is desirable to prove quantitatively the mechanism of liquefaction in this study through shaking tests in laboratory, though difficult.

Yukitake Shioi, chief advisor