解明された地震時の液状化現象のメカニズム

八戸工業大学　正会員　○塩井　幸武
八戸工業大学　正会員　橋詰　豊

１．目的と背景

東日本大震災で多くの地点で液状化現象が見られた。特に、東京湾岸や利根川下流部などで過去の地震では顕在化しなかった大規模な液状化現象が発生した。その理由も含めて液状化現象のメカニズムを明確にする。

現行の液状化現象の説明では、強い加速度の地震波動の繰り返しで土粒子構造の間の過剰間隙水圧の発生と有効応力の消失で発生するとされている。しかし、それでは説明できない次のような奇妙な点がある。

①液状化現象の継続時に観測される最大加速度は小さく（200gal 以下)、人体に感じないことも多い
②液状化現象の現場では、微少な加速度の地震波動は比較的長い時間、継続する
③液状化現象は主振動（主揺動）が過ぎた後に顕在化する（例えば、数 10 秒後の場合もある）
④液状化現象は地震終息後も長時間、継続するが、そのエネルギーはどこからくるか？
⑤液状化現象は飽和砂層だけでなく、時とすると砂礫層、シルト層でも見られる
⑥液状化発生地域では明確な噴砂や噴水が見られない場合でも地滑り現象が発生することがある

筆者等の研究は、これらの現象を解明して合理的な液状化対策の立案に資することを目的とするものである。

２．仮設と実証

2.1　仮説

過去の地震で液状化現象の見られた堆積地盤では、液状化した砂層の下に粘土層やシルト層のようなひずみ追従性の顕著な粘性土層が分布している。飽和した砂層の液状化現象は地震波動による粘性土層の大きなせん断ひずみによって発生する。

地震波動は堅い基岩から堆積層を通って地表面に達する。地震波動は硬い地層から軟らかい地層には容易に通過して伝播するが、軟らかい地層から硬い地層には容易に伝わらずに反射して戻る。震源から基岩層に届いた地震動は堆積地層の相互間で重複反射を繰り返し、分散しながら地表面に達する。その過程で軟らかい粘性土層に波動エネルギーが蓄積され、粘性土層は固有周期で揺れることになる。粘性土層の上層が緩い飽和砂層であれば下層の粘性土層の揺動時のせん断ひずみで液状化現象が惹起される。粘性土層が余震等を含めて波動エネルギーを吸収して揺れ続く間、液状化現象は継続する。

2.2　仮説の立証

上記の仮説を立証するために過去に大規模な液状化現象で被害のあった地点での地震波動の伝達に関する、等価線形法を用いたＦＥＭによる応答解析を実施した。

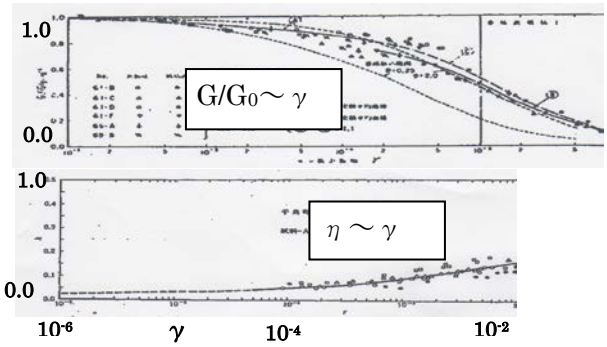
最初に三陸はるか沖地震（1994 年、M＝7.5）により八戸港の第二工業港で発生した液状化現象を対象とした。約 400m の沖積層、洪積層が堆積している古生代の基岩層に八戸工業大学の地下 20m の古生代の硬岩で記録された波動を入力して等価線形法により FLUSH で応答計算を行った。各層のせん断剛性、減衰定数はひずみレベルに応じて画一的にモデル化し、固有のせん断剛性（G_0）は弾性波探査のせん断波速度から算出した。

更に、過去の地震による液状化地点（福井地震、新潟地震、日本海中部地震）で八戸工業大学の地下の記録を用いて各々の地盤構成に即して応答計算も行って、各地域の液状化現象の発生の可能性を検証した。

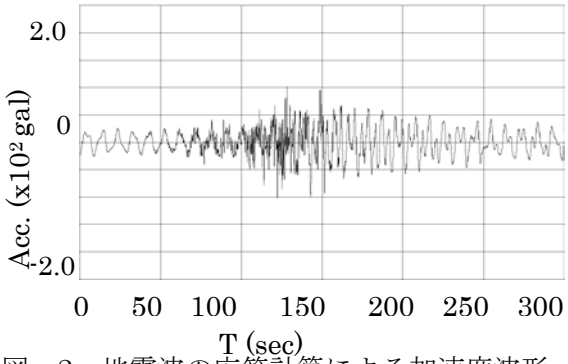
しかし、これらの液状化している現地点での地震記録がないので応答計算結果と照合できなかったが、東日本大震災で東京湾沿岸の幕張地区で液状化地盤上の地震記録が得られたので、地下 2000m の基岩から図－1 を用いて SHAKE により応答計算を行った。地震入力には岩槻の地震観測所の地下 3500m の観測記録を用いた。応答計算で得られた地表における加速度波形を図－２に、そのスペクトルと入力波のスペクトルを図－３に示す。また、幕張地区で記録された加速度波形を図－４に、そのランニングスペクトルを図－５に示す。

両者間の加速度波形はよく似ており、主揺動が 50 秒前後の入力波に対して地表の波動の継続時間が数 10 分になるのは 2000m の堆積層の間の重複反射で到達時間の分散による。通常の地震の波動は 2000m の地層を

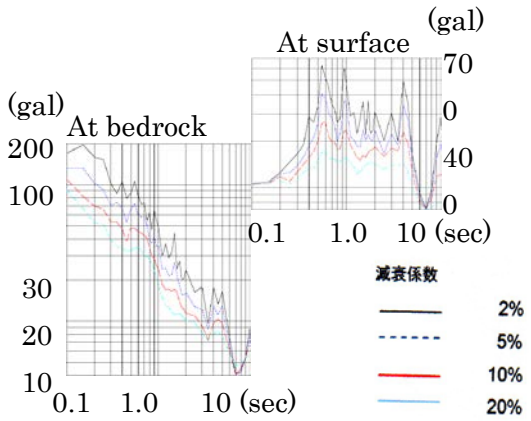
キーワード　液状化現象、せん断ひずみ、応答解析、重複反射、波動エネルギー
連絡先　〒031－0813　青森県八戸市新井田字松山中野場 33－38　ＴＥＬ0178－25－7724



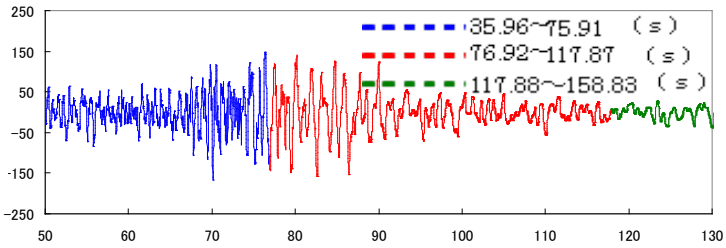
図―１　せん断剛性曲線と減衰定数曲線



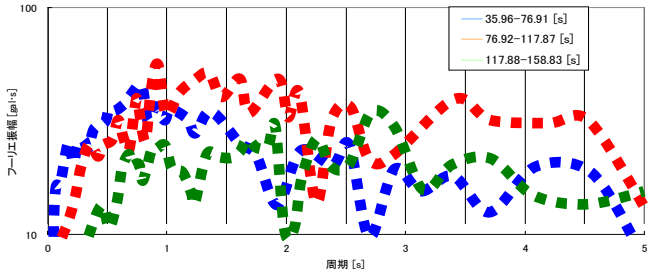
図－２　地震波の応答計算による加速度波形



図―3　基岩と表層の加速度スペクトル

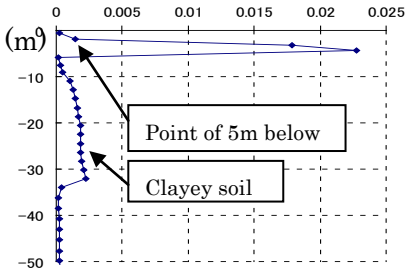


図―４　幕張地区花見川公園での地震波動

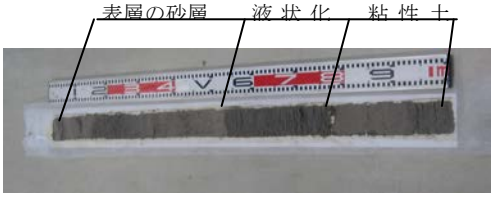


図―５　幕張地区の波動のランニングスペクトル

図―6　液状化による地滑り



図－7　粘性土層上面で増大化するせん断ひずみ



図－8　粘性土地盤上で局部的な液状化砂層

通過する途中で減衰してしまうので東日本大地震のように大きなエネルギーがなければ液状化を生じない。

液状化地盤で噴砂や噴水がなくても地滑りが発生することがあり、2011 年の東日本大地震やニュージーランドのクライストチャーチ地震でも見られた（図－６）。幕張地区での応答計算の結果、液状化層と粘性土層の境界付近でせん断ひずみが極大化することが分かり（図－７）、ボーリング試料からもその部分が局部的に液状化していることが立証された（図－８）。この部分が滑り面になると考えられる。

３．結論

堆積地盤の基岩（硬岩）からの地震波動の伝達に関する応答解析で液状化現象のメカニズムが解明される。

即ち、地表近くに粘性土層のような軟らかい地層に波動エネルギーが蓄積されるとやや長周期の波動となり、大きなせん断ひずみを表層の緩い飽和砂層に伝えて液状化現象を生じる。そこでは、加速度が大きくなくとも周期が長いために大きなせん断ひずみとなり、蓄えられた振動エネルギーが減衰するまで液状化現象は継続する。逆を云えば、小さな地震ではエネルギーの蓄積が出来ないので液状化現象は生じない。震源が近く、大きな地震では砂層だけでなく砂礫層をも液状化することもあり、四川大地震では玉石層まで液状化したとの調査報告もあった。また、局部的な液状化層のために地滑り等の現象が発生することも明らかにできた。

ここで述べた液状化現象のメカニズムから発生の予測や定量的な判定、合理的な対策の立案等ができる。その場合、弾性波探査、ボーリング、土質試験等の地盤調査が必要となる。対策としては過剰間隙水圧の消散、表層の強化、基礎の剛性の確保、地盤のせん断変形防止、地下水位の低下などが考えられる。