

地震時の飽和砂地盤の液状化現象のメカニズム

塩井幸武*・橋詰 豊**・深田 久***

Mechanism of Liquefaction Phenomena of Saturated Sandy Ground in Large Earthquake

Yukitake SHIOI*, Yutaka HASHIZUME** and Hisashi FUKADA***

Abstract

Many phenomena have been observed during the past large earthquakes that the liquefied saturated sandy layers give large damage to the various structures and the life lines. Hachinohe Institute of Technology (HIT) has succeeded to clarify the generation mechanism of liquefaction by the all-out investigations on the liquefaction appeared at the Hachinohe Port during the 1994 Far-Off Sanriku Earthquake. Furthermore, the analyzing method developed in this study was applied to the severely liquefied sites in the 1948 Fukui, the 1969 Niigata and the 1983 Mid-Japan Sea Earthquakes. Consequently, the analyses can make the reasonable explanation for the phenomena at that time.

Key words: large earthquake, liquefaction, response analyses, shear strain

1. 序 論

三陸はるか沖地震では八戸港周辺を主体に各地で砂地盤の液状化現象が見られた。大地震時の液状化現象については、これまで数多くの研究がなされてきている。しかし、その研究成果には今一步、釈然としないものがある。すなわち、これまでの研究は地震時の液状化現象に見られる事象を明確に説明し切れて居らず、そのために液状化に関わる耐震設計は必ずしも的確なものとはなっていない。

事象の具体的なものとしては次のようなものがある。① 液状化した地盤では液状化実験で加えるような大きな加速度は観測されない。従って、液状化した地盤では構造的な破損は見られず、転倒や沈下のような安定性を欠いたことによる被害が主体である、② 液状化現象は地震の主揺動の後に顕在化することが多く、地震動が治まった後も長く継続する、③ 液状化現象の見られた地盤では長周期波動が長く継続している観測記録が見られる、④ 液状化現象は砂地盤だけでなく、砂礫地盤、シルト層などでも見られる、⑤ 明らかな噴砂現象がなくても大きな地盤移動、地滑りが生じることもある。

これらの疑問の解明を含めて液状化現象のメカニズムを明らかにする研究を八戸港における現象を対象に実施した結果、現象のすべてをほぼ説明できる成果を得ることができた。

2. 液状化現象の仮説

液状化現象の調査、研究を進めるに当たり、むやみに範囲を広げては要点を捉えきれない恐れがあるので予め、液状化現象の発生する過程を合理的に説明できる仮説を最初に立て、それを立証する方法をとった。

地盤は上からの荷重を土粒子の骨格構造を介して下方に伝えている。飽和した砂層も常時は砂の骨格構造で荷重を支えているが、地震で揺すられて骨格構造が崩れるか、せん断変形すると、それまでの応力伝達経路が途切れ、荷重を支え切れなくなる。骨格構造が崩れると上載荷重は間隙水で負担され、高圧の間隙水圧が生じる。すなわち、骨格構造による有効応力が減少して過剰間隙水圧を発生させる。

その高圧の間隙水は表層を突き破って噴き出し、砂を伴う噴砂現象となる。その時点では砂層は支持力を失うか、減少するので直上の構造物は沈下、傾斜、転倒、滑り出し等の被害を受けることになる。地震が終わると砂分は沈殿して噴出した水は流下する。砂質地盤は沈下して新たな骨格構造を形成する(図-1 参照)。

このように大きなせん断歪みを引き起こす力はどこから来るのか? これまでの大地震で液状化現象のあった地点の地質構造を調べると、例外なく液状化層の下に粘土層やシルト層のような歪み追従性の大きい、軟弱な地層が分布している。

一般に、地震波は岩盤から上方に伝達される。波動は硬い地層から軟らかい地層には容易に伝わるが、軟らかい地層から硬い地層には境界面で反射されて伝わりにくい。すると、地震波動は軟らかい地層にどんどん集積されていく。多くの地震波動を受けた軟らかい地層はその

平成 17 年 1 月 7 日受理

* 八戸工業大学教授

** (株) 出雲 博士課程後期終了

*** 不動建設(株) 博士課程後期

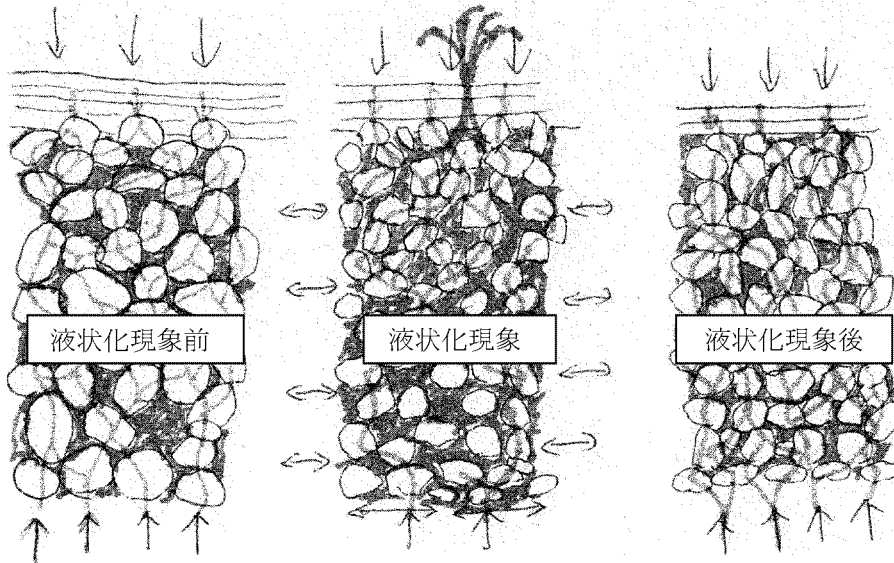


図-1 液状化現象の前後

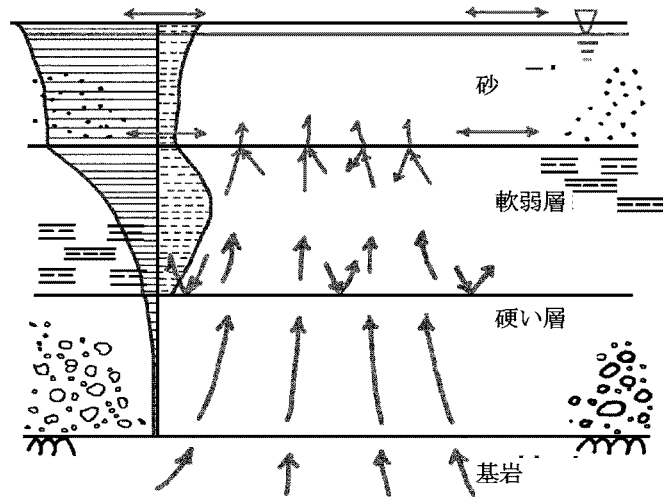


図-2 液状化現象のメカニズムの概念

エネルギーを最大限に吸収するために地層の持つ一次ないし二次の振動モードで揺れることになる。上の地層が硬い場合は軟弱層の上面を拘束するので二次の振動モードに、軟らかい場合は拘束が弱いので一次のモードになる。そして、軟弱層が厚いとそれだけ多くのエネルギーを吸収し、振動時間、歪み量、変形量も大きくなる(図-2参照)。

液状化現象は飽和した、比較的ゆるい表層の砂地盤で発生している。下の粘土層などから大きなせん断歪みを伝達されると、図-1のように砂の骨格構造は崩れて液状化現象が発生する。これが研究に先立って設けられた液状化現象発生概念(仮説)である。

3. 八戸港における液状化現象と地盤

マグニチュード7.5の三陸はるか沖地震は八戸沖200

kmを震源として1994年12月28日に発生し、八戸地域を中心に大きな被害をもたらした。¹⁾ 八戸港では最大加速度676galが観測され、港湾施設は大きな被害を被った。²⁾

液状化現象は第二工業港で著しく、第一工業港では比較的軽微であった(図-3)。1970年代初頭に埋立造成された第二工業港は大地震の洗礼を受けて居らず、各所に大きな噴砂、地盤や道路の亀裂や沈下、岸壁の迫り出し、ガントリークレーンや建物等の傾斜など、大きな被災となった。第一工業港は1950年代の埋立(1962年完成)で、1968年の十勝沖地震を経験している。液状化現象は噴砂、地盤の小規模な亀裂や沈下等を齎したが、シーガルブリッジ等の大型構造物には目立った被害はなかった。

両港の代表的な地盤柱状図を図-4、図-5に示す。¹⁾

第二工業港の基盤岩は古生層で、その位置は約400mの深さにある。その上には第3紀と第4紀の堆積層が積

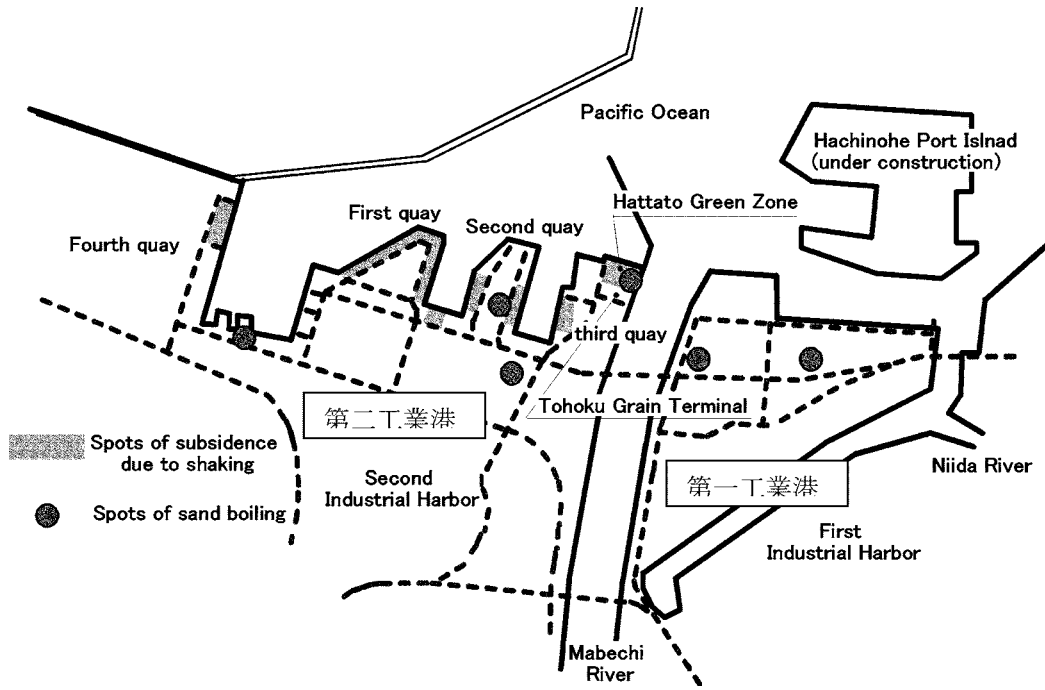


図-3 八戸港の平面図

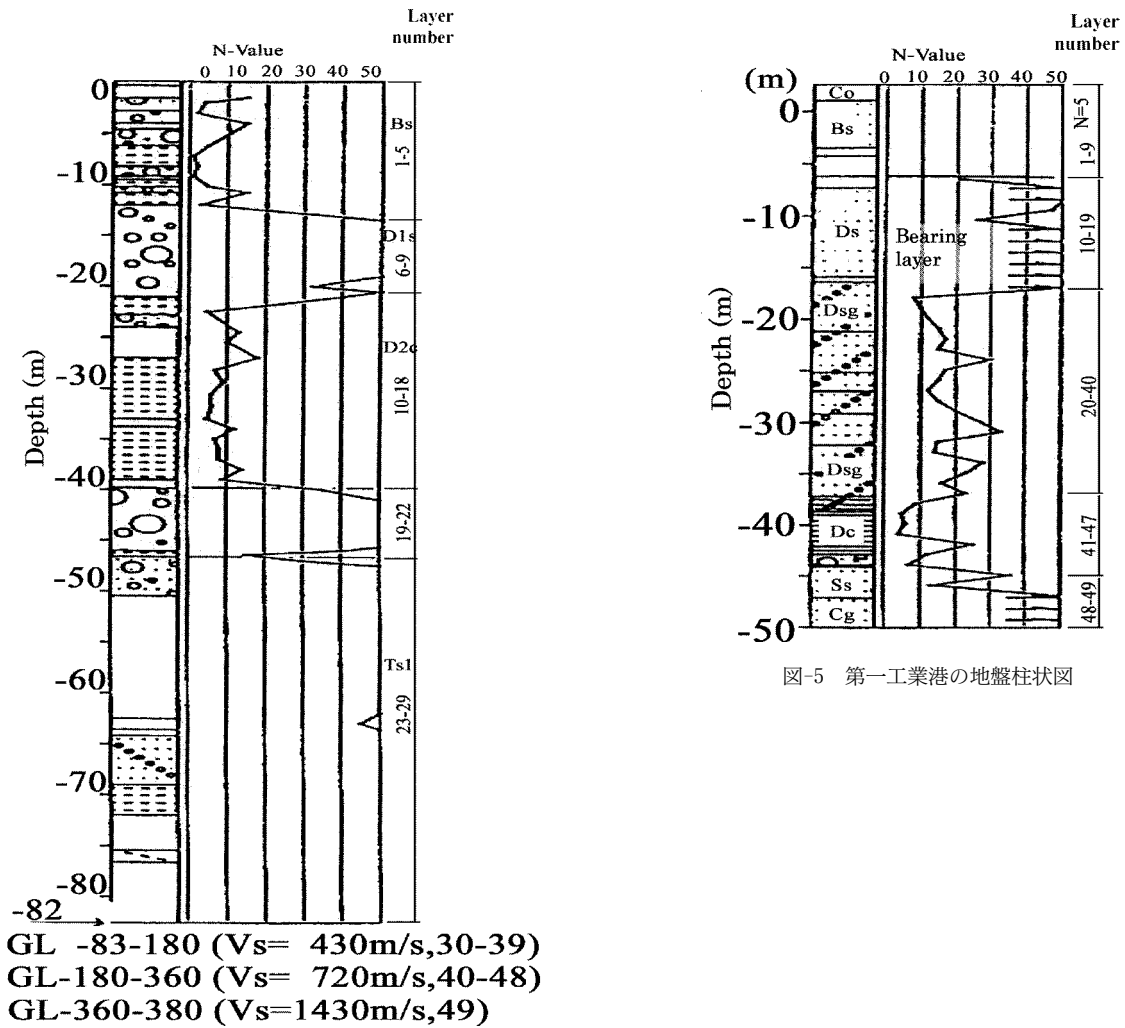


図-4 第二工業港の地盤柱状図

図-5 第一工業港の地盤柱状図

み重なっている。ここで、-25 m~-40 m と-10 m 付近の粘性土層の存在が目される。第一工業港の基盤は砂岩で約-50 m 付近にあり、その上に数 m の粘性土層が分布するが、それ以浅は砂層と埋立土である。

4. 地震波の応答計算³⁾

これらの地盤における地震波動の基岩から表層までの伝達過程を第一段階として、重複反射理論に基づく一次元の応答計算(SHAKE)で追跡した。その際に用いた地盤のせん断剛性と減衰定数の値は図-6 に拠った。これらの値は地盤の相違による変動幅よりは歪みの大きさによる変化の方が大きいので一義的に使用した。

第二段階としては二次元有限要素法に基づく応答解析(FLUSH)により追跡した。この場合の地盤のせん断剛性、減衰定数はSHAKEによる応答計算と同じものを用いた。

応答計算で基盤に入力したのは三陸はるか沖地震で八戸工業大学の地下-20 m に位置する古生層の岩盤の中

で記録された東西方向の地震波とした(図-7)。最大加速度147 gal で、主揺動は約20秒間である。¹⁾

両港の各地層のせん断剛性は次式により算出した。

$$G = V_s^2 \cdot \gamma / 2g$$

G: せん断弾性係数 (kN/m²)

V_s: せん断波速度 (m/sec)

γ: 単位体積重量 (kN/m³)

第二工業港では、上層の緩い砂層のせん断波速度を115 m/sec、次の硬い砂層を300 m/sec、次の軟弱な粘土層を215 m/sec とした。次の洪積層は上から300 m/sec、430 m/sec、720 m/sec とし、深い基岩層のせん断波速度は5,000 m/sec であるが、表層の劣化を考慮して1,430 m/sec とした。第一工業港では、埋立土層140 m/sec、その下の硬い砂層300 m/sec、緩い砂層200 m/sec、下の粘土層160 m/sec とした。基岩層は1,800 m/sec であったが、第二工業港と同様に1,430 m/sec とした。

これらの値を用いたSHAKEによる応答計算結果のうち、第二工業港のものを図-8 に、第一工業港のものを図-9 に示す。

第二工業港における加速度は上方に伝達する過程でもあまり大きくなり、地表面近くになっても200 gal 程度である。地震の規模から見ると意外に小さいが、この周りの構造物被害は液状化現象によるもののみで、加速度によって破壊したようなものはほとんど見られない。最大速度も30 kine 程度で、構造物破壊を引き起こすものではない。それに対してせん断歪みの最大値は地表面付近で急激に大きくなり、0.6% となった。この値は液状化を発生させるに十分な大きさである。

第一工業港では、加速度は地表に向かって低減し、地表で110 gal 程度になっている。速度も13 kine 程度で問題にならない。せん断歪みの最大値は基盤層の上の粘性土層で約0.4% となるが、表層の下では0.08% 程度となり、液状化現象が起きる限界値付近である。

図-8, 9 は地層を上層で1 m 間隔、80 m 以深で10 m 間隔、180 m 以深で20 m 間隔と細かく分割しているの

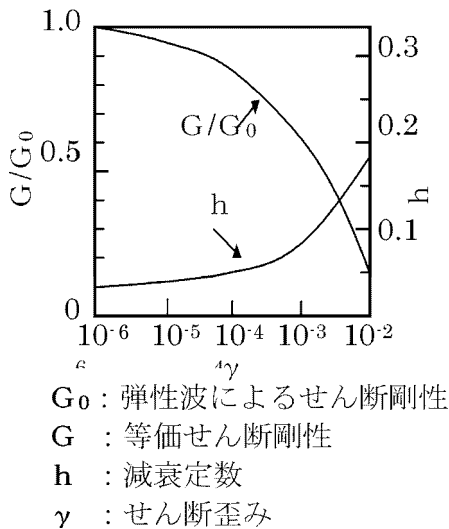


図-6 せん断剛性Gと減衰定数hの等価線型曲線

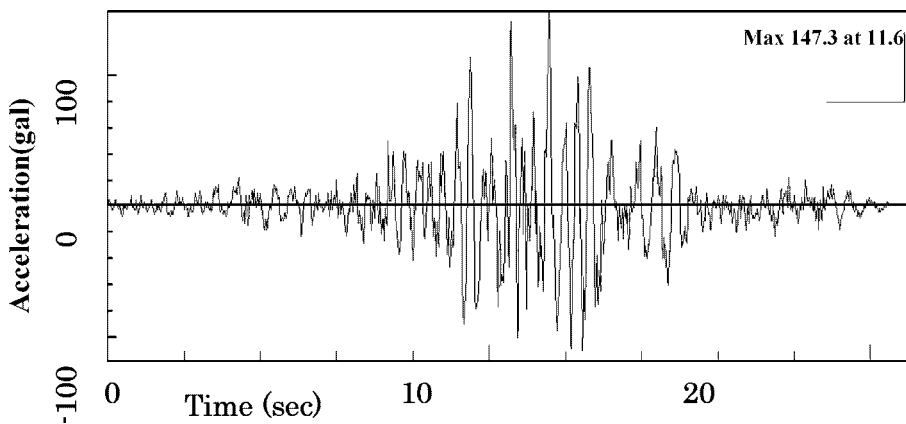


図-7 八戸工業大学の地下岩盤中で記録された入力波

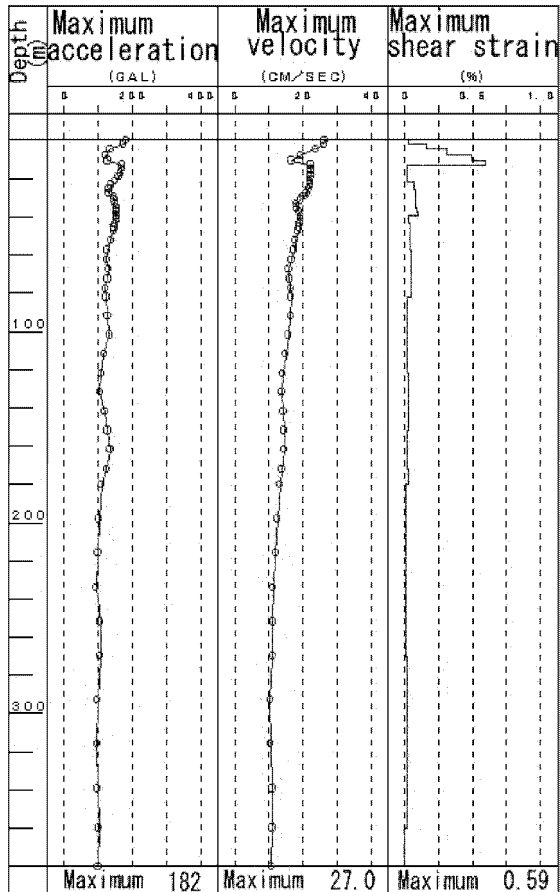


図-8 第二工業港における波動の変化

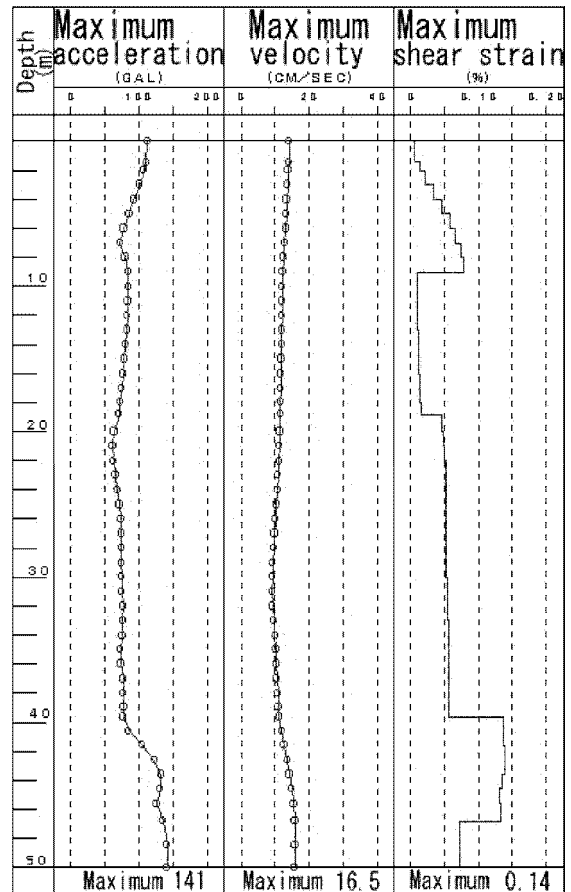


図-9 第一工業港における波動の変化

応答値が小さくなったと推定される。そこで地層を大きく分割して図-10のような二次元モデルで、FLUSH による応答計算を行った。その計算結果から液状化に最も影響するせん断歪みの波動が図-11である。地表近く(-7.5 m)で急激にせん断歪みが増大している。この傾向は図-8と同様である。せん断歪み2.4%は既に液状化が発生してせん断力を伝えることができないレベルである。

同じモデルを使って、基岩からの地震波動の伝達をSHAKEとFLUSHで計算した結果の一部を図-12と図-13に示す。共に地下-10 mまでは200 gal程度の加速度を保っているが、地表では急に加速度が小さくなり、長周期化している。液状化が発生している所為であるが、両者の波形には著しい相違が見られる。特に、FLUSHでは最大加速度が50 gal程度で、周期が約3秒の波動となり、大きなエネルギーを吸収していることが推定される。

また、基岩層から地表までの波動の伝達過程でも大きく異なる。SHAKEによる応答加速度の計算結果は図-8とほぼ同じ値になっている。しかし、FLUSHによる応答

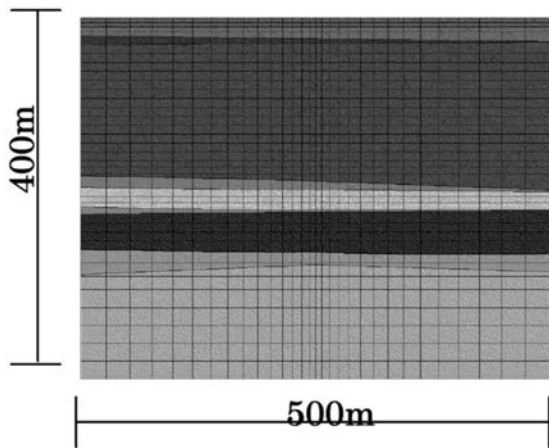


図-10 第二工業港の地盤のモデル化

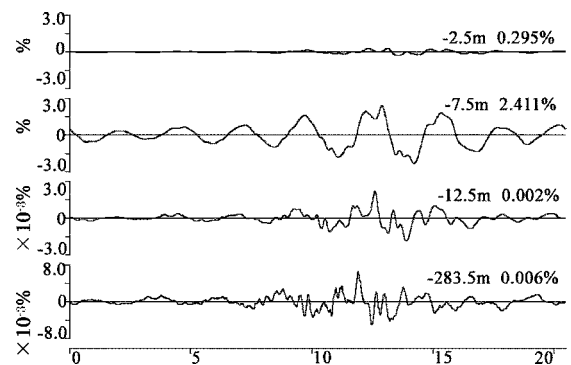


図-11 FLUSHによるせん断歪波形

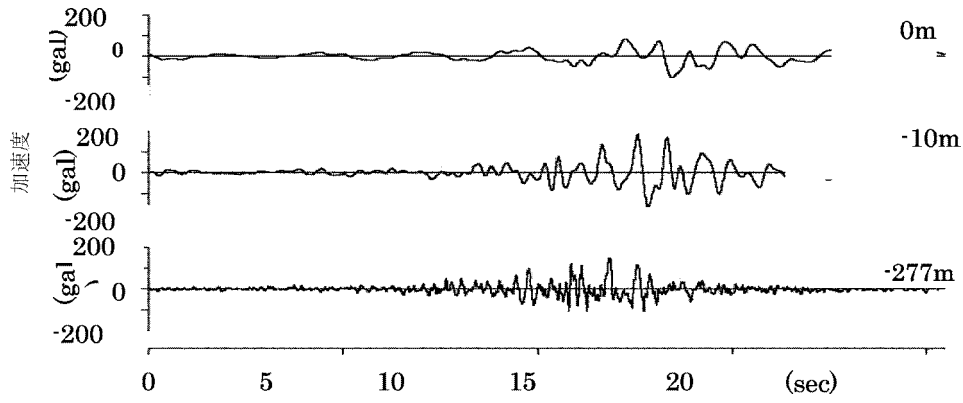


図-12 SHAKEにより算出された波動

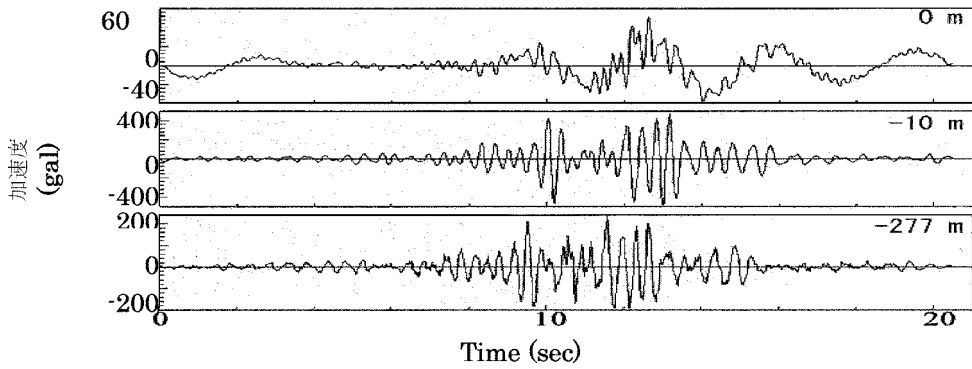


図-13 FLUSHにより算出された波動

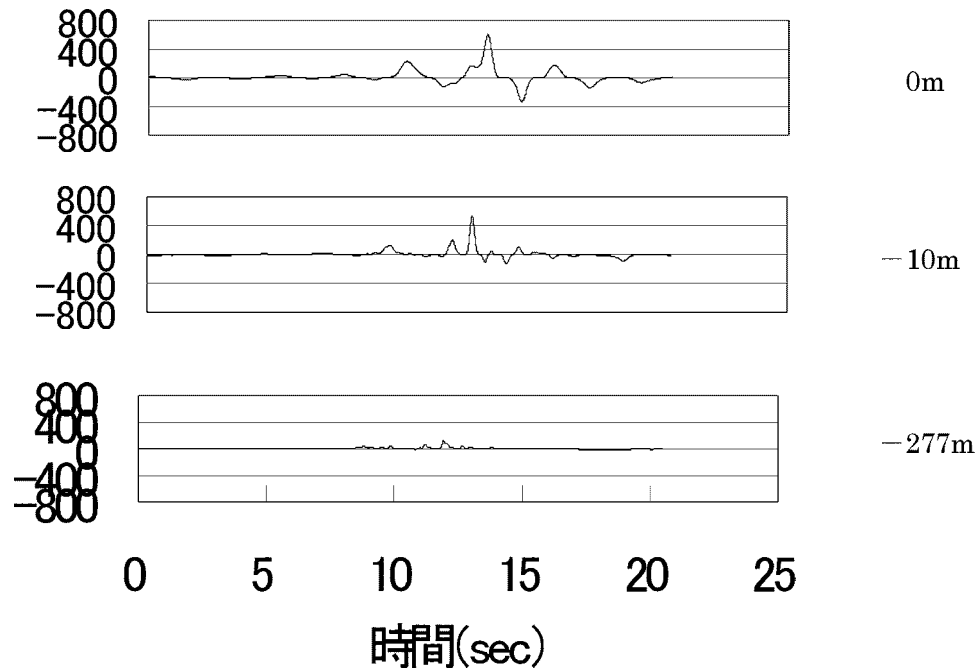


図-14 SHAKEによる地震波動のエネルギーの変化

値は SHAKE によるものと周期では大きく変わらないが、途中の地層から大きな加速度に増幅している。原因は二次元計算であるために、各地層の境界で重複反射をする際に SH 波と反射 SH 波を発生させることによる

と考えられる。地表面では SHAKE よりも加速度は小さくなりながらも、明らかに表面波の傾向を示し、長周期化と揺れの長期化を示している。ここで、人間が感じる震動は長周期波動の上に乗っている短周期の小さい波動

である。

両者に共通しているのは基岩層から地表までの地震波の伝達過程で時差（位相）が見られることである。そして、長周期化の傾向も現れている。長周期化は波動エネルギーの増大を示すもので、エネルギーには加速度の大きさよりも周期の長さの影響の方が大きい。第二工業港において SHAKE で計算された波動のエネルギーの変化を基岩層から追跡した結果の一部を図-14 に示す。

波動エネルギーの変化に対する計算は定量的なものではなく、次式による相対的なものである。

$$E=1/2 \cdot a_s^2$$

ここで、

E ：波動エネルギー

a_s ：応答加速度

以上の結果から予め設けた仮定のメカニズムが立証され、序論で述べた現象が従来理論との乖離している部分についてもほぼ説明することが出来る。すなわち、① 液状化する地盤ではその下の軟弱層の影響もあって大きな加速度は生じない。② 液状化現象は主揺動の後に顕在化する。人体に感じる短周期の震動は長周期の表面波の上に乗っている小さな波であることもある。③ 地表面の長周期波動は地下から吸収したエネルギーによるもので、長時間、継続する。④ 液状化層の下の軟弱層の歪みレベルによっては砂礫層でも液状化する可能性がある。シルト層のように透水性が低く、多少の粘着力があっても受ける歪みレベルが大きければ液状化することもある。⑤ 表層が比較的硬くてせん断歪みを受けなくても、その下の地層や軟弱層の歪みが大きくなり過ぎると（例えば 10^{-3} 以上）その境界面付近で滑り出すこともある。

5. 液状化現象への八戸港における対応¹⁾

三陸はるか沖地震は八戸港で液状化現象による大きな被害をもたらした。しかし、大きな被害を受けている地区の中でも地盤改良をしていたためにほとんど無被害か、軽度の被害で住んだ事例が見られた。

八戸港の第二工業港の3号埠頭の先端部に東北グレインターミナル（株）の一連の大型サイロとプラントがある。八戸港に入港した貨物船から穀物飼料を荷揚げして配合した上で、東北地方の酪農家に家畜の飼料を供給する企業である。サイロの先には大規模な噴砂があった地先公園（写真-1）を通して高架のコンベアベルト（写真-2）がシーバースまで伸びている。会社の道路を挟んだ向かい側は北海道へのフェリーターミナルで岸壁等に被災を受けている。

しかし、東北グレインターミナルでは地盤改良を行っていたサイロの周辺では液状化現象は発生せず、改良されていなかった敷地ではかなりの噴砂が見られた。地盤



写真-1 地先公園内の噴砂



写真-2 地先公園内を通る飼料運搬用コンベア

改良は埋め立てられた砂層を対象に、一期工事ではサンドコンパクション、二期工事ではグラベルドレーン工法で実施された（図-15）。もう一つ注目されるのが液状化地帯を通過している高架のベルトコンベアである。埋立土を貫く杭基礎上の鉄柱に支えられた、重心の高い連続構造（写真-2）であるが、被害が無く（写真-3）、震災後も操業を続けることができ、飼料の途絶が命取りになる酪農家を守ることができた。このことは液状化地盤上の加速度は大きくなく、変位を拘束することができれば被害を受けなくても良いことを示している。

第二工業港の北端に位置する4号埠頭付近でも液状現象が多く見られた。しかし、4号埠頭のエプロンでは岸壁が数10cmの迫り出し、舗装の沈下（写真-4）と共に数カ所に亀裂が入り、そこから薄く噴砂があった（写真-5）ものの、見た目の被害は軽微であった。特に、ケーソン岸壁の背面でペーパードレーンを施工した区域では噴砂はほとんど見られなかった。その背面で液状化現象が軽度であったことは前面からの拘束効果、ペーパードレーンの効果が働いたものと推定される。

地盤を拘束して液状化現象を防いだものには阪神大震

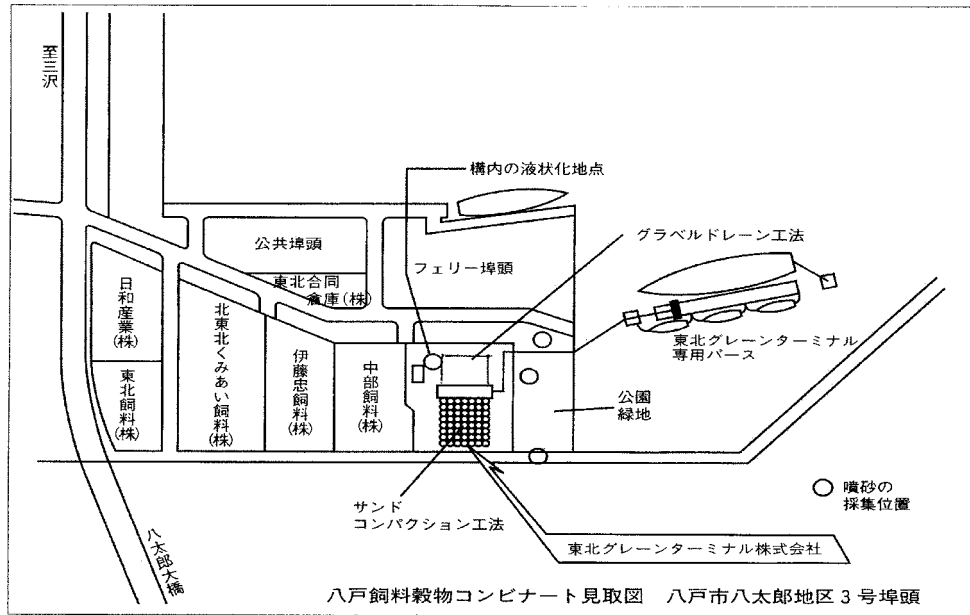


図-15 第二工業港の3号埠頭の概略平面



写真-3 コンベアの柱の周りの状況



写真-4 4号埠頭の噴砂の一部

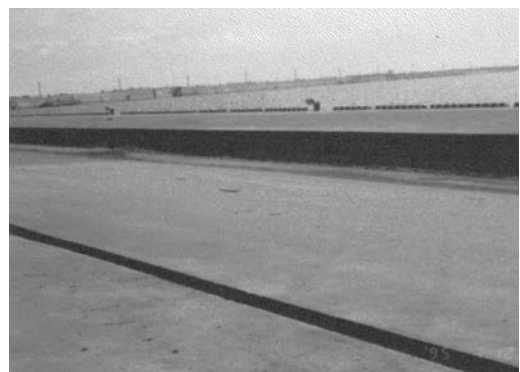


写真-5 4号埠頭のケーソン岸壁と背面舗装の間の段差

災の際のポートアイランドにあるホテルの前庭の事例がある。地中連続壁を格子状に配置している。

このように液状化現象から構造物の被災を免れるには上記の解析結果や、それに裏付けられた実績等から次のような対策が考えられる。飽和砂層に過剰間隙水圧を発生せしめない方法、緩い砂層を固化して強度を高める方法、周りを拘束してせん断変形をさせない方法、支持力を確保した上で水平変位を拘束する方法、構造物の基礎の剛性を高めて周りの地盤の歪みに対抗する方法などである。

6. 他の液状化現象地点への適用³⁾

八戸港で立証した液状化現象発生メカニズムに対する仮説を過去の地震で激しい液状化現象を発生させた、

福井地震(1948年)、新潟地震(1969年)、日本海中部地震(1983年)に適用した。すなわち、各地盤の基岩に地震波動を入力して表層に至る各層の応答計算を行い、最終的に表層の歪みレベルを算定するものである。その値から液状化現象の判定を行うものである。

1969年6月に発生した新潟地震はマグニチュード7.5

表-1 新潟の地盤

number	geology	velocity of shear wave (m/s)	thickness (m)
1	Quaternary	200	65
2	sandy mud rock	1,940	2,215
3	mud rock	2,530	624
4	mud rock	2,390	1,102
5	tuffaceous sand rock	2,310	124
6	shale mud rock	1,730	670

で、新潟地方に大きな被害をもたらした。信濃川の河口に位置する新潟市における地震の特徴は、大規模な液状化現象による被害である。その地質構成の代表的なものを表-1に示す。地表から約65mは信濃川に運んだ沖積土砂である。その下は数千mの堆積軟岩層で、日本海に向かって傾斜している。液状化被害は市内全般にみられたものの、地震記録では最大加速度155galで、主揺動の後に約6秒の長周期波動が長く続いていた。

FLUSHによる応答計算は表-1に基づく図-16のメッシュで行われた。基岩層は既存のボーリングデータでは確かめられていないので、最大深のデータを使用した。最下端に入力した波動は八戸工業大学の地下20mの古生層の中で記録されたものである。

計算結果を図-17、図-18に示す。図-17の表面波は比較的低い加速度と比較的長い周期を有する。図-18のスペクトラム上の最大加速度は147.6galと卓越周期0.8秒となっている。現地で観測された6秒の周期は下層からの応答計算で次第が大きくなっており、地盤の特徴とみられる。基岩の深さが明確になれば計算上も更に明瞭になると考えられる。

1983年5月に発生した日本海中部地震はマグニチュード7.7で、青森県、秋田県の日本海側一帯に地盤の液状化と津波による大きな被害をもたらした。能代市は震源から約100km離れた米代川河口の都市で液状化現象により大きな被害を受けた。地盤は表-2にみるとおり、表層5mは砂地の表土で、その下には粘性土8m、砂質シルト15mが続き、基岩は約100mである。同市内には加速度計がないが、200galを超えていないと推定されており、構造的な被害はほとんど見られなかった。

FLUSHによる解析結果は図-17、図-18の通りである。八戸工業大学の地下の地震記録を入力したにもかかわらず、新潟の結果と異なる波形になった。卓越周期は0.35秒、0.8秒、2.5秒に現れている。2.5秒の波は最大歪み量 4×10^{-2} になり、液状化現象を引き起こすに十分な値となった。

木造町は震源から約100km離れた、岩木川中流の町で、下流の激しい液状化のあった地域と比べて小さな液状化現象が見られた。表-3に見るとおり、基岩の上に厚い砂層と粘性土層が堆積している。

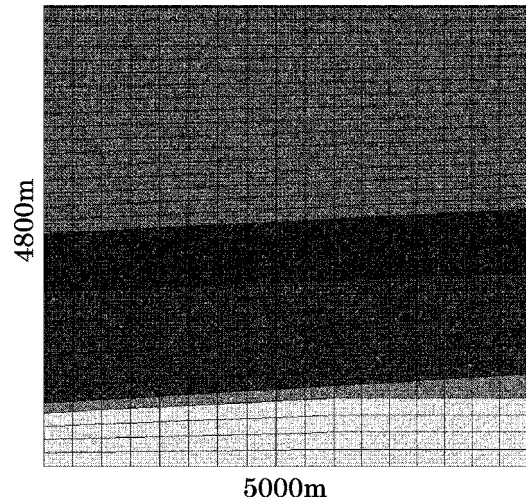


図-16 地盤のモデル化 (FLUSH)

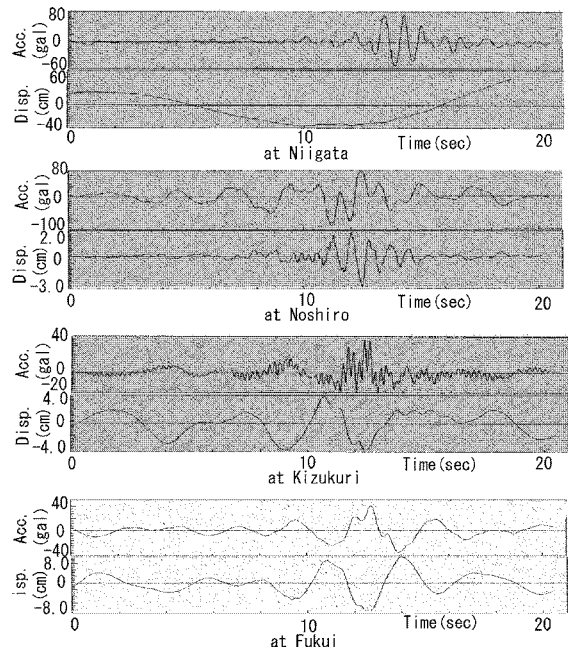


図-17 4地点の表層の加速度記録と変位記録の比較

表-2 能代の地盤

number	geology	velocity of shear wave (m/s)	thickness (m)
1	sand	70	5
2	silt, clay	200	8
3	sandy silt	400	15
4	gravel	700	50
5	medium sand	800	27
6	bed rock	1,700	15

応答解析した結果、表面波には0.3秒、0.8秒、3秒の卓越周期が見られる。最大加速度は36galで、中間層の254galに比べて著しく低下している。表層の歪み量は 0.1×10^{-2} で、液状化現象を引き起こす限界付近の値であ

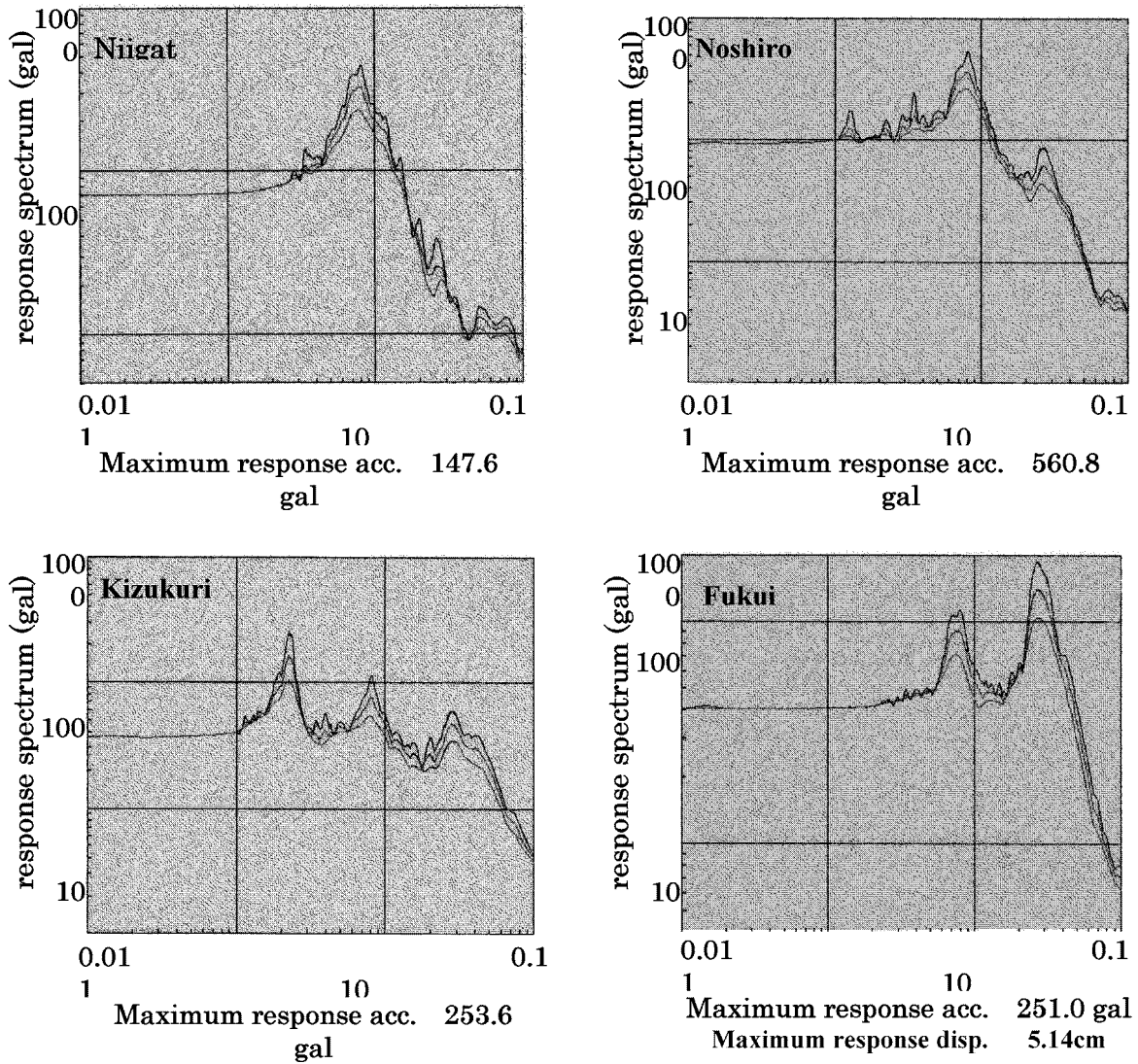


図-18 4地点の加速度の応答スペクトルの比較

表-3 木造の地盤

number	geology	velocity of shear wave (m/s)	thickness (m)
1	sand	70	10
2	silt・clay	400	95
3	fine/medium sand	720	165
4	andesite	1,300	100

表-4 福井の地盤

number	geology	velocity of shear wave (m/s)	thickness (m)
1	sand	70	1.5
2	sand (Holocene)	70	8.5
3	sandy silt (Holocene)	420	24
4	gravel (Pleistocene)	800	10
5	gravel (Pleistocene)	1,000	32
6	sand (Pleistocene)	720	50
7	sand・silt	420	122
8	bed rock	1,700	-

る。その下の厚い粘性土層の大きなエネルギー吸収容量で粘性土層の動きが小さく、歪み量が拡大しなかったことによる。

福井地震は1948年6月に発生した典型的な内陸型の大地震で、マグニチュード7.3であった。福井盆地の建造物に大きな被害を与えると共に、大規模な液状化現象を発生させ、九頭竜川とその支川流域の橋梁や建物に多大な被害をもたらした。震源は盆地の中心の丸森町の地下である。地盤は表-4に示されるように、約34mの沖積層

の下に、約210mの洪積層が堆積し、その下が基岩である。

表-4に従って、基岩に八戸工業大学で記録された地震波を入力してFLUSHで応答計をした結果を図-17、図-18に示す。表層には2.5秒の長周期波動が現れているが、最大加速度は86galである。このときの最大歪み量は

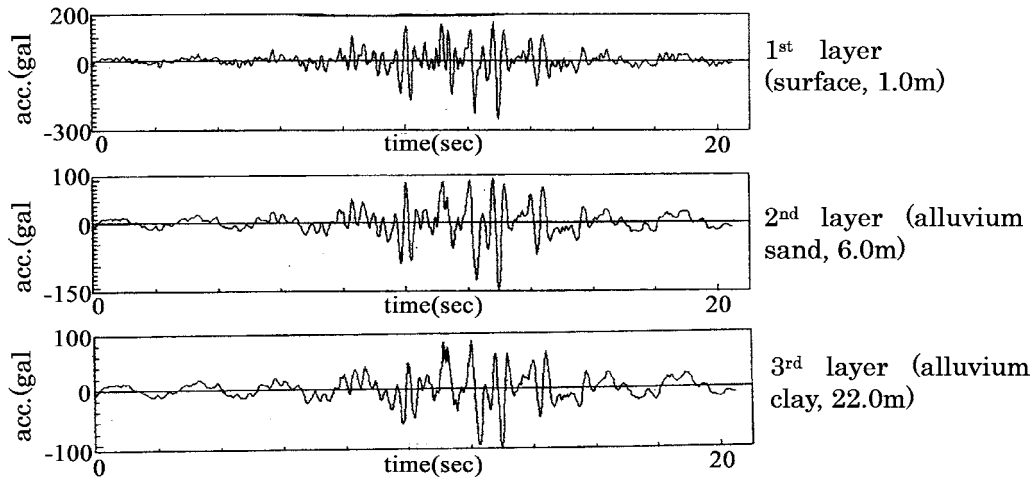


図-19 表層が硬い場合の表層付近の3層の加速度波形の比較

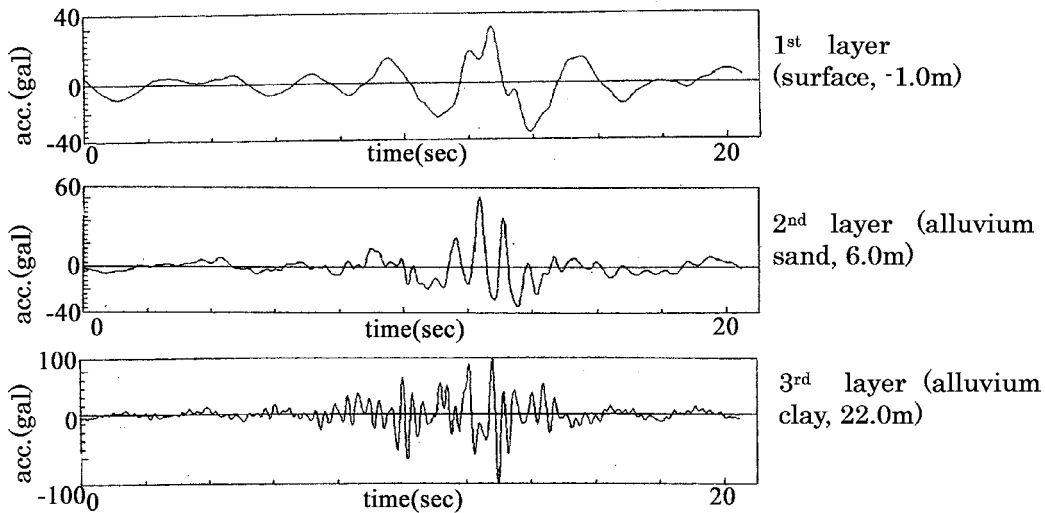


図-20 表層が軟らかい場合の表層近くの3層の加速度波形の比較

2.5×10^{-2} で、明らかに液状化現象が生じるレベルである。

しかし、ここで第2層のせん断波速度を720 m という硬い層にすると最大加速度は270 galとなり、構造的な破壊を引き起こすレベルとなる。これらの関係を図-19、図-20に示す。表層の堅さが、その下の歪み追従性の高い軟らかい層の動きを拘束するのが分かる。これより、前述の仮説が立証されたことになる。

以上の一連の応答計算から液状化現象は図-2で提案した重複反射の仮定と、基岩に地震波動を入力した上での応答計算によってかなり正確に再現できることが証明された。この応答計算における入力は一戸工業大学の地下の古生層で記録された地震波動であるにも拘わらず、基岩から表層への地震波動の変化とエネルギーの移動を当該地盤の層序に従って表すことができる。また、計算結果は地震規模によって変わる地盤の歪みレベルを示し、それに応じたせん断剛性の低下や減衰定数の増加などが反映された、現実的なものである。

一方、表層の堅さによって構造の破壊をもたらす波動になるか、液状化現象のように地盤の安定を損なわせる波動になるかを判定できる。それ以上に効果のあるのは液状化現象を予測でき、液状化現象に対する設計を合理化できる点である。

7. 結 論

三陸はるか沖地震による液状化現象を解析し、その結果を過去の液状化現象による被災地盤に適用して次の知見を得た。

(1) 液状化現象は基岩層から伝達される地震波動および、そのエネルギーの液状化層の下の軟らかい地層に蓄積され、その地層の揺動で引き起こされる。

(2) 液状化した地盤上の加速度は小さくなるものの、周期が長くなるために歪み量や変位量が大きくなる。

(3) 液状化現象による被災対策としては過剰間隙水圧の消散、表層地盤の強度強化、変形の拘束、構造物の

変位制御，基礎の剛性の向上などが挙げられる。

(4) 各地の液状化現象はその地点の層序関係に拠るところが大きく，他の地点で記録された地震波を入力しても，その地点の特性は顕示される。

(5) 一連の解析を通じて対象地点の基岩までの層序とせん断波速度が分かれば液状化現象の可能性を判定することができる。

(6) 液状化現象のメカニズムが判明し，実態が明らかになったので液状化現象に対する設計の合理化を図ることができる。

謝辞：本研究には数多くの方々の御支援と御協力をいただいた。

八戸工業高等専門学校 柳沢栄司校長には貴重なアドバイスをいただいた。(株)建設技術研究所には研究費の面で，谷和弘氏には物心両面から御支援をいた

きました。応答計算 (FLUSH) では (株) JCD の易鋒博士，孫偉東氏の力を借りました。資料では八戸工業大学 滝田貢教授に地震波動記録の提供を，新潟の地盤記録については元石油公団の徳永忠昭氏，福井盆地の地盤記録については元福井県庁の中野宗四郎氏の御尽力で入手できました。この他にも多くの方々にその都度，お世話になりました。ここに厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 三陸はるか沖地震災害調査委員会，1994年三陸はるか沖地震災害調査報告書，平成7年7月
- 2) 森田年一，菅野高弘，宮田正史，ケーソン式岸壁の地震時挙動に及ぼす地震波の影響について，三陸はるか沖地震シンポジウム論文集，八戸工業大学，1998年1月
- 3) 橋詰 豊，地盤の振動性状と地震応答，平成13年度博士学位論文 八戸工業大学，平成13年9月