

砂質地盤の地震時液状化現象メカニズムの解明

八戸工業大学大学院

○学生員 橋詰 豊

八戸工業大学構造工学研究所

正会員 塩井幸武

株式会社建設技術研究所

正会員 谷 和弘

1.はじめに 砂地盤の地震時の液状化現象は飽和砂地盤が剪断変形し、過剰間隙水圧で砂粒子間の有効応力が減少するために発生すると考えられている。一般に波動は堅い媒体から柔らかい媒体には移りやすいが、柔らかい方から堅い方へは移りにくく、反射して柔らかい媒体の中にそのエネルギーが蓄積されることになる。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それ自体の固有周期で振動することになる。その上の地層が堅固であれば2次の振動モードで、そうでなければ1次モードで揺れることとなる。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。この蓄積されたエネルギーが上層の飽和された砂層に剪断変形を与え、液状化現象を発生させる原因になる。以上の考えによる地震発生メカニズムのモデル図を、図-1に示す。本研究では、三陸はるか沖地震における八戸港の事例で検討した解析手法を福井・新潟・能代・木造の事例にも適用し、液状化が同様のメカニズムで発生することを検証した。

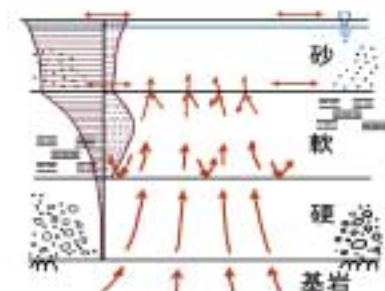


図-1 液状化発生メカニズム

2.八戸港における応答解析 三陸はるか沖地震による八戸港の液状化現象の発生状況は、第二工業港には大小の噴砂、岸壁のせり出し、埋め立て地盤の沈下などの被害が分布したが、第一工業港の地盤では小さな噴砂が散見される程度であった。両港の地盤の代表的な柱状図を図-2、図-3に示す。第二工業港の基岩層は弾性波探査により、地下約400m付近にあると推定されており、表層から15mまでは埋め立て土、15～45mは洪積粘土と砂の互層、45m以下は第三期層の互層である。第一工業港の基岩（砂岩）は浅く、表層から約50mである。下部の粘性土を除いて堆積層の大部分は洪積の砂層である。

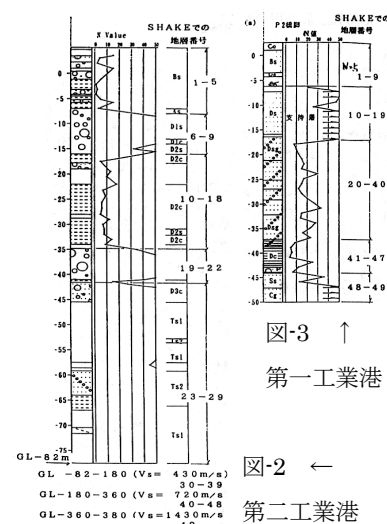


図-3 第一工業港

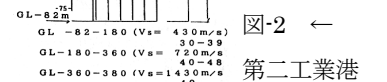


図-2 第二工業港

双方の地盤の基岩層に八戸工業大学の地下20mの古世層の岩盤の中で記録された地震波動の東西方向の記録を入力して各々の応答を計算した。等価線形化法による一次元計算（Shake）の結果を図-4～図-7に示す。

図-4の第二工業港においては最大加速度148galが地表で182gal、速度は約27kineである。図-5の第一工業港では地表で112gal、約14kineである。いずれも構造物を破壊するほどの力にはなっていないが、表層付近での変位と剪断歪みに注目すると、第二工業港では最大変位5cm、最大剪断歪み0.6%となり、第一工業港では最大表面変位2.4cm、最大剪断歪みが地下の9mの地点で0.08%で地表に向かって減少している。これらの値は液状化が発生する限界付近のものであり、地震時に見られた現象と対応する。図-6は第二工業港の各層

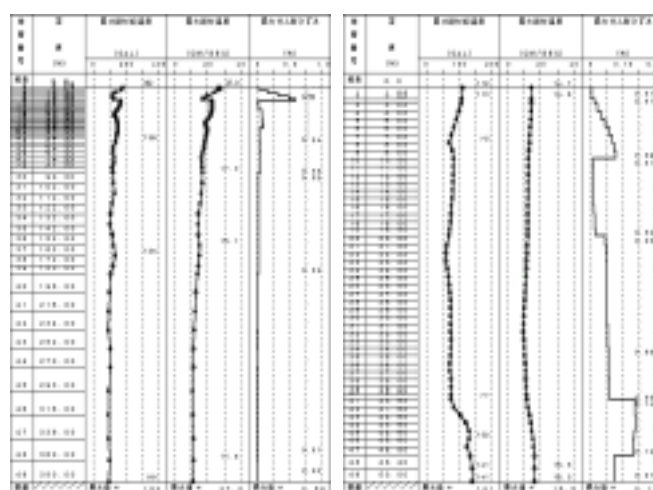


図-4 第二工業港地盤応答図

図-5 第一工業港地盤応答図

キーワード：液状化、FEM、砂質土、重複反射理論、エネルギー蓄積

連絡先：八戸工業大学構造工学研究所塩井研究室 Tel.0178-25-3111（内3108） E-mail www-shioi@stud.hi-tech.ac.jp

の中心部の応答歪み波形である。第2層の中心・7.5mで明らかに長周期で、振幅の大きな応答を示している。図-7はShakeによる加速度波形を積分した速度から $1/2 \cdot V^2$ (エネルギーに相当)を算出した結果である。明らかに上層に向かってエネルギーの蓄積されるのが見られ、特に表層に放出されるエネルギーが大きく、長周期波動を生成せしめる原因になっている。二次元のFEM解析(図-8)で得られた表層面(第1層)の加速度応答(図-9)は、揺れはじめ約8秒まで比較的周期の短い波が続いたあと、波の様相が変わり、長い周期成分が発生している。この波のスペクトルから、約3.5秒の卓越周期が見られる。この現象は約15m以下に分布する歪み追従性のよい軟らかい地層で地震波が集まり、波の合成により大きなエネルギーとなり、結果として長周期波を作り出していると考えられる。

3.過去に液状化現象が発生した地点における応答解析 過去に大きな液状化現象のみられた新潟、能代、木造、福井における応答解析を行った。表-1に各地の地盤物性値を、図-10に地表層での解析結果を示す。新潟では0.8秒にピークを持つやや長周期波動となった。ボーリングデータは最深でも6千m程度のため、新潟地震で記録された6秒の表面波は明確に再現できなかったが、スペクトル図で6秒付近に増幅がみられる。能代、木造では地層構造に起因する卓越周期の発現と表層地盤の長周期化の傾向を確認することができた。また、

液状化した地盤では加速度の値は小さいが、地盤の最大ひずみは大きくなるという、液状化発生のメカニズムの仮説に適合する結果が得られた。福井地震では、墓石の転倒等から推定して地表面の加速度は0.6g前後であったとされている。表面波動の応答は若干大きな加速度となったが、0.35秒付近の短周期波動の応答加速度は1000galに達し、壊滅的な被災を裏付ける結果となっている。一方、0.8秒にも大きな応答があり構造物の転倒、移動等の被害と結びついたと考えられ、液状化現象にも大きく影響したと推定される。また、3秒に卓越周期をもつ、長周期波動となった。

4.まとめ 1) 飽和した砂層の地震時の液状化現象は、その下に存在する歪み追従性のよい軟らかい地層に吸収された地震エネルギーによる剪断変形に起因する。 2) 地層が厚く軟らかいほど多くのエネルギーを吸収するが、同地層を大きく震動せしめるほどのエネルギーを供給できない小規模地震や遠方の地震では液状化は発生しない。また、砂層が堅く、下層の軟らかい層の剪断変形を拘束する場合も液状化が発生しにくい。 3) 本論で提案する仮説は広範囲な地盤に適用できる。 4) 液状化地盤上の構造物及び基礎の設計を大幅に合理化できる可能性がある。

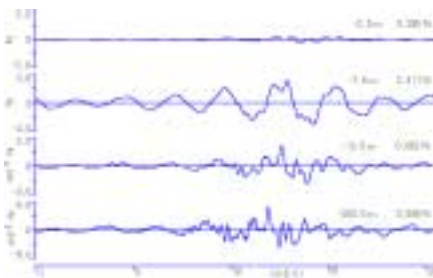


図-6 Shakeによる

第二工業港応答歪み波形図

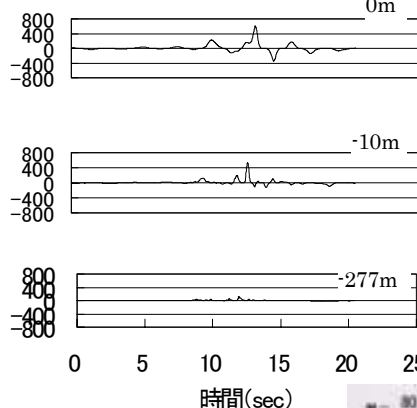


図-7 エネルギー波形

表-1 各地の地盤物性値

新潟市			
地層番号	土質	剪断波速(m/s)	層厚(m)
1	表土	200	65
2	砂質泥岩	1940	2215
3	泥岩	2530	624
4	泥岩	2390	1102
5	中粒凝灰質砂岩	2310	124
6	頁岩質泥岩	1730	670

能代市			
地層番号	土質	剪断波速(m/s)	層厚(m)
1	表土	70	5
2	シルト・粘性土	200	8
3	砂質シルト	400	15
4	砂礫	720	50
5	中粒砂	800	27
6	基岩	1700	15

木造町			
地層番号	土質	剪断波速(m/s)	層厚(m)
1	表土	70	10
2	シルト・粘性土	400	95
3	細・中粒砂	720	165
4	安山岩	1300	100

福井市				
地層番号	土質	剪断波速(m/s)	層厚(m)	
1	表土	70	1.5	
2	沖積砂質土	720	8.5	
3	沖積粘性土層	420	24	
4	洪積砂礫層	800	10	
5	砂礫層	1000	32	
6	砂層	720	50	
7	シルト・粘性土層	420	122	
8	基岩	1700		

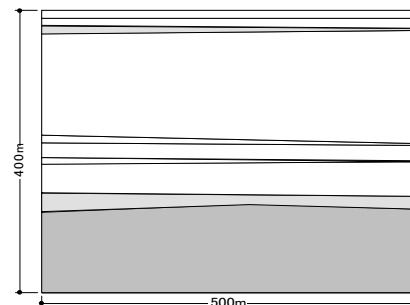


図-8 第二工業港 FEM モデル

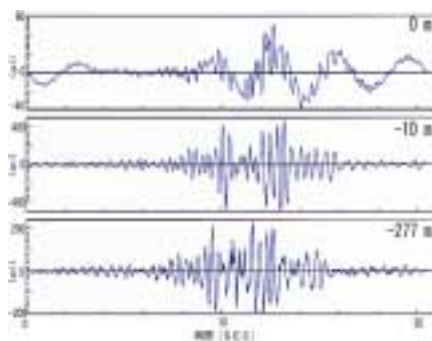


図-9 FEMによる第二工業港加速度応答図

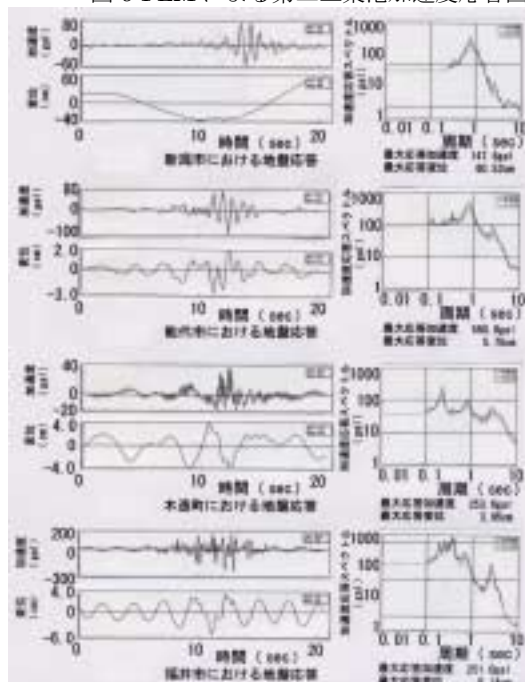


図-10 各地域のFEMによる応答図