

不完全液化砂の地中構造物に及ぼす地震力

東京大学地震研究所
前田建設株式会社

○伯野元彦
松井孝彦

1. はじめに

最近、地上のみならず地中にも構造物が多数建設されるようになって来たが、その耐震解析の手法は、現在ほど考大方が固まらず、まだ段階的といつてよい。すなわち、地中構造物は、地上の構造物のように、地震時に固有振動を誘起され、地面の動きと全く異なる、たしかに大きな振動をすることは無いということが、過去の地震観測結果、室内なすびに現地実験結果、理論解析等により確かめられた。したがって、現在の地中構造物に対する耐震設計は、構造物は周辺の地盤の動きのままに動き、ほぼ地盤中に生じると等しい地震時歪が生じるとして解析する。一方、過去の地震による埋設管等の被害は、決して少なくはない。

この被害の激しさを、すでに述べたような地震時の地盤中に生じる歪の大きさと埋設構造物との間の関係により、説明されるべきでない。著者らは、埋設模型を砂箱中に設置し、振動台によって、砂を液化させた時、埋設模型が砂の動きに逆らうようにしてみくと、模型に対して砂から大きな力が作用することを見出した。

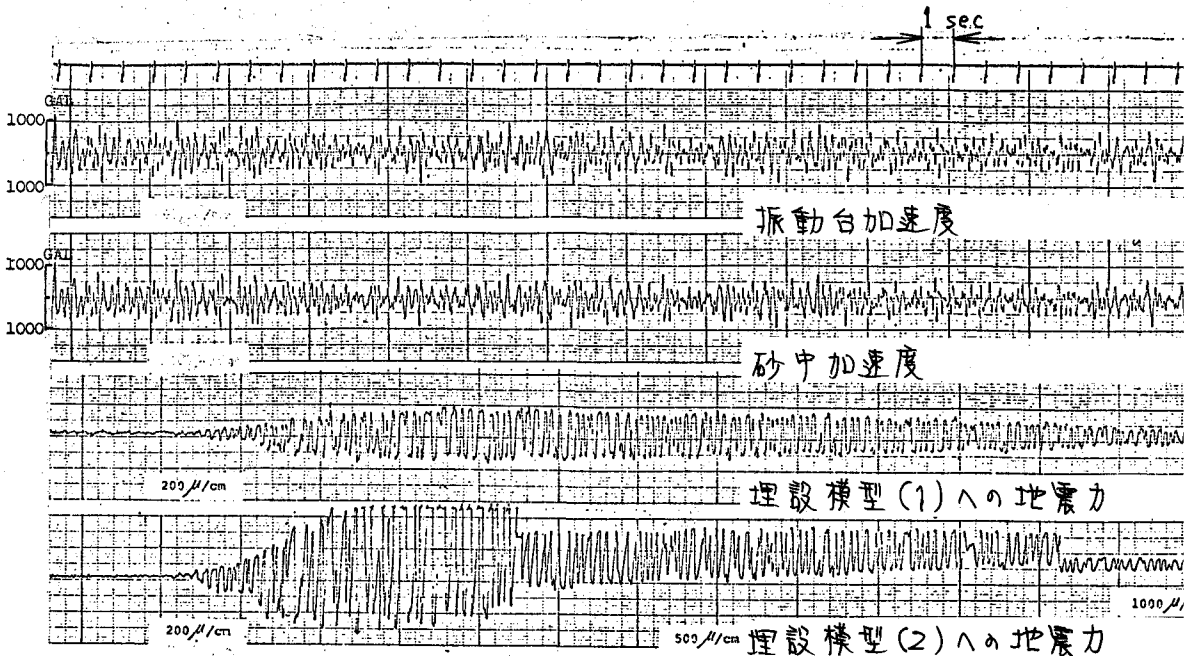


図-1 地中埋設模型に作用する不完全液化砂地震力

図-1がその一例であるが、振動台は、定常的に複雑な振動をしている。砂箱の中の砂の加速度も、振動台加速度とはほぼ等しく振動していることが認められる。一方埋設模型に対する力は、或る時期までは非常に小さく、或る時点から急激に大きくなる。この急激に大きくなる時期は、砂の間隙水圧が上昇していく時期にはほぼ一致しており、砂の液化と大いに関係があるものと思われる。そして、色

色な検討の結果、砂が完全に液化しない前の方がより大きい力と埋設構造物に与えているのではないかという結論に達した。その後、この問題をより詳しく検討するために、以下のようなFEMによる計算を行った。

2. 周辺地盤の軟化の埋設物に対する影響

地震時に、埋設構造物の周辺地盤が液化して行かなくても、軟化することは充分考えられる。例えば、つい先頃までは、粘土質は絶対に液化しないものとされていたが、最近の研究によれば、砂程度散る液化はしないが、振動荷重によって、徐々に間隙水圧が上がり、軟化し、ついには液化状態に至るという研究もなされてきており、液化までは至らなくても、不完全液化するのを軟化という状態には、どのような種類の土でも、地震時にはなるという可能性もある。さて、そのように軟化したと仮定すると、埋設構造物にはどのような地震力が作用するのであろうか。次のような二つの相反する影響が考えられる。

1) 土が軟化するというのも、地盤全体が一律の土質が多くなっているとは考えにくいので、例えば、杭に例えれば、硬い層では軟化せず、軟弱層では軟化するというような現象が起こるかもしれない。

その場合には、軟化した層の変形能は大きくなり、硬い層と比較して大きい地震変位となり、土と同一の変位しかできない杭には、層の境界付近で大きな歪が生じることになる。

2) 一方、軟弱地盤の土が軟化した場合、地震波を伝える能力が減少し、極端なことを言えば、完全に液体になった土の中はS波は伝わるまいだろうから、埋設構造物にはほとんど地震力は作用しないことになる。

以上二つの考えから、周辺地盤の軟化は、埋設構造物に与える力と加えることを考えられるし、軟化しない前より小さい力しか加わらないように考えられる。そのあたりを確かめるため以下述べるようなFEMによる数値計算を行った。

3. FEMによる数値計算

ケーソンの場合

FEMによる数値計算では、図-2に示すようにメッシュを設定し、下端は剛体とし、中央部と右端はローラー支持とした。

図の中央の斜線部分は、ケーソンを想定したものである。

今回の計算では、計算時間の短縮と既存プログラムが使用できるという便利さを優先して、バネと減衰は、地震の初めから終りまで変わらないとした。そして、バネと減衰は、

変えて、応答の最大値を求め、ケーソンにかかる地震力は、周辺地盤の軟化とともにどのように変わるかを調べた。

バネの硬さは、土またはケーソン中を伝わるS波の速度で表わした。入力地震波としては、速度スペクトル一定として作成した人工地震波、Taft地震波を基盤等に反したものを最大加速度200galとして用いた。また、計算にあたって用いた諸定数と以下に示す。

ケーソン部：密度 2.30 g/cm^3 ，ポアソン比 0.167 ， $h = 0.03$ ， $V_s = 500 \text{ m/sec}$

周辺地盤：密度 1.74 g/cm^3 ，ポアソン比 0.45 ， $(h, V_s) = (0.15, 100 \text{ m/sec})$ ，
 $(0.20, 50 \text{ m/sec})$ ， $(0.25, 30 \text{ m/sec})$ ， $(0.30, 10 \text{ m/sec})$

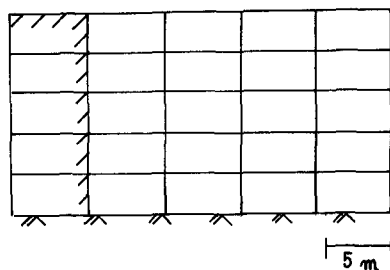


図-2 ケーソンの場合のメッシュ

以上の条件で計算した結果を図-2', 3, 4に示す。

図-2は、ケーソン壁に接している土の歪が土の軟化とともに、どのように変化するかを示した。この歪はX方向の歪 ϵ_x を示している。

S波の速度が小さい程、すなわち、土が軟らかい程、ケーソン壁面に接した部分の土の歪が大いことが認められる。また、歪は当然地表面近くで大きくなっている。一方、図-3はケーソン壁面に作用する土圧の性状を示すものであるが、図-2とは全く逆に、土が軟らかい程、土圧は小さくなるっている。

このような計算結果からわかったことであるが、この地表層全体の固有周期は、 $V_s=100$ m/sec の場合 0.43秒であるが、 $V_s=10$ m/s

の場合には、3.61秒と大変長くなり、一方、入射地震波は、面下地震と想定して作製された地震波であるため、高振動成分が多く、土が軟化した場合には、この入力地震動によっては、表層はほとんど振動しないため、土圧も低くなったものと思われる。

その点を検討するため、入力地震動のデジタル値は同じものを用いるが、その時刻をそれぞれ図-2, 3で計算した場合の0.02秒より長く0.06秒、0.20秒に変えて図-2, 3と同一の計算を行った。時刻を長くすることは、地震波のスペクトルを長周期の方向へ移動するという外にない。

こうして計算した結果が、図-4に示してある。

この結果では、長周期成分を持つ地震動によって、ケーソン壁には、歪も土圧も大きな値が働くことがわかる。

このようなことから、この計算で、土が軟化して、地中構造物に大きな地震力が働くのは、地表層が共振することによるという結果

が出たわけであるが、先に述べた、砂箱中の液化実験では、共振という現象は見られなくても、地中構造物に大きな地震力が働いた。

この点を説明するために、実際の現象により近づけるため、振動中に、土の弾性率が変るとか、地中構造物は不働としてしまうような計算を行ってみたいと思っている。ケーソンの場合、その剛性を高めて不働を保つことは不可能である。仮に剛性を高めると、S波速度が大きくなり、波長が長くなって、FEMのメッシュ間隔より細かくとらねば計算誤差の集積により発散する。

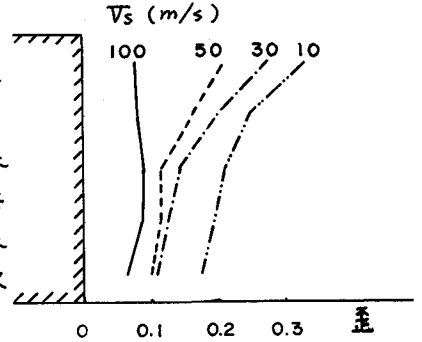


図-2' 土の軟度と地震時最大歪

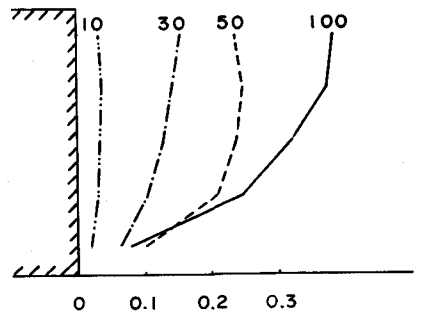


図-3 土の軟度と壁面最大土圧

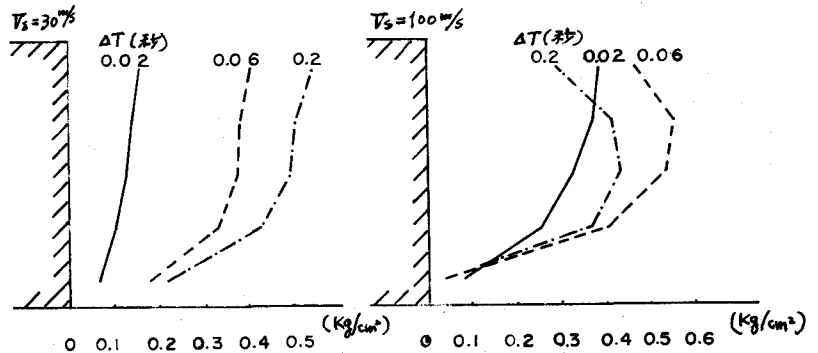


図-4 地震動に含まれる周期成分とケーソン壁面最大土圧の関係

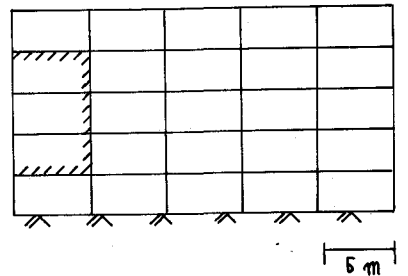


図-5 埋設物のFEM用メッシュ

埋設物

埋設物の場合には、図-5の斜線部分として示してあるような位置に仮定した。また、この埋設物が軽く、周辺地盤と相対変位を生じないように動く場合には、この埋設物には何の地震力も働かないのだが、実際の埋設物では、埋設物が管路のように長い場合には、或る位置では、土の軟化が起こり、他の地点では、軟化が起こらないということも十分考えられ、そのような場合にこそ大きな地震力が働くことが予想される。したがって、図-5の埋設物は、なるべく不動としたため、密度を大きくした。

計算に当たり、採用した諸定数は以下のものである。

埋設物： 密度 2.30 g/cm^3 , ポアソン比 0.167 ,
 $h = 0.03$, $V_s = 500 \text{ m/sec}$

表層部： ケーソンの場合と全く等しい。

入力地震：

系固有周期： 表層 $V_s = 100 \text{ m/sec} \rightarrow T_N = 0.54 \text{ 秒}$
 $V_s = 50 \text{ m/sec} \rightarrow T_N = 1.07 \text{ 秒}$
 $V_s = 30 \text{ m/sec} \rightarrow T_N = 1.77 \text{ 秒}$
 $V_s = 10 \text{ m/sec} \rightarrow T_N = 5.30 \text{ 秒}$

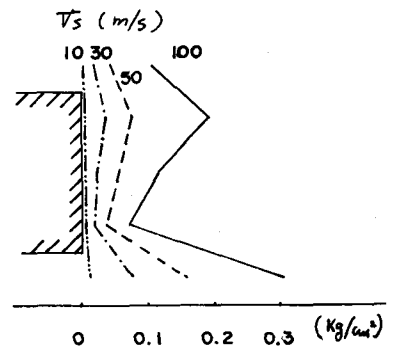


図-6 土の軟めさと埋設物壁面最大土圧

これらの諸定数を用いて、ケーソンの場合と等しいケースの計算結果が得られたが、その一例を図-6, 7に示す。

この場合にも、地震入力に短周期成分の多い場合には、周辺地盤が軟化するにつれて、土中歪は大きいが、構造物に加わる地震力は小さくなる。

また、地震ディジタル値の時間刻みを変えて

長周期成分を大きくすると、地表層の共振によって、地震力が大きくなることがわかる。

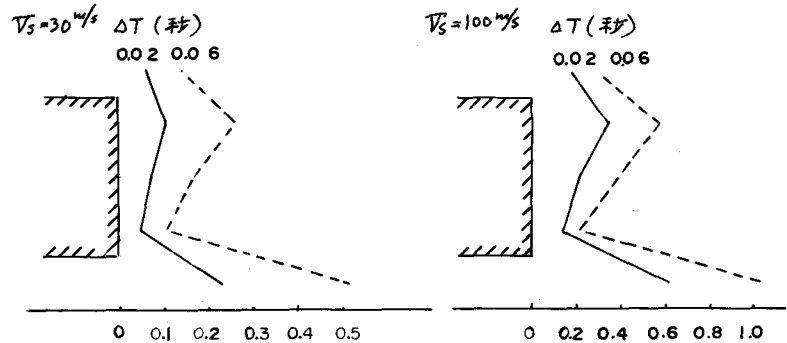


図-7 地震動に含まれる周期成分と埋設物周辺最大土圧の関係

4. むすび

不完全液化砂が地中構造物に与える影響を、粘弾性体のF.E.M.によって、解明しようとしたが、地表面層が共振した場合に、地中構造物に対する地震力が大きくなるという結果しか、現在までのところ得られていないが今後の計算方法の工夫によって、不完全液化砂の及ぼす影響をより深く追及して行きたい。