

1 まえがき

地震時に地盤が液状化すると、そこに存在する構造物は大きな被害を受ける。新潟地震(1964.6.16., $M=7.5$)では地盤の液状化によって、建物の倒壊や傾斜などの被害が数多く生じた。また、通信ケーブル、送電線、上下水道、ガス管などの地中埋設管も浮き上がり、沈下、屈曲、折損などの被害が生じている。さらに、宮城県沖地震(1978.6.12., $M=7.4$)でも地中埋設管の被害が報告されている。

一般に、地盤の液状化現象は地表に表われる噴砂孔の存在によって確認される。しかし、地震動によって地盤が液状化しても表土層が厚すぎたり、地震動がそれほど強くなく地盤が軟化するだけで終わる場合には噴砂孔は生じないと想像される。特に、都会では地表がアスファルトやコンクリートで覆われているので、地盤の液状化の確認がむづかしいと思われる。したがって、これまで液状化による地中構造物の被害と確認されたもの以外にも、その被害が地盤の軟化、液状化に起因するものがあるかもしれない。また、地下鉄など地盤中に存在する重要構造物でも、軟化や液状化などの地盤破壊を経験していないものもある。このような地中構造物に対しても地震観測が行なわれている。だが、これまでの観測例では、入力である地震動は微少で地盤-構造物系は線形範囲で振動していると思われる。したがって、これまでの地震観測結果から、地盤が破壊した場合のような非線形応答を類推するのはむづかしいであろう。

図-1は東京都防災会議によって作成された東京23区における液状化現象発生の可能性の分布図である。図-1を見てもわかるように、いわゆる下町と云われる地域では液状化現象発生の可能性が高い。しかも、この地域には地下鉄、地下街、上下水道、ガス管などの地中構造物や地中埋設管などが数多く存在する。したがって、液状化や軟化などの地盤破壊によって、地中構造物がどのような影響を受けるかを明らかにすることが重要になってくる。現実には地盤中に存在する構造物に対して地震動による地盤の軟化、液状化がどのような影響を与えるかは、それほど明らかではない。

この種の研究は数少ないが、杭基礎に関して、その模型を砂箱に設置して液状化時の挙動を調べている例が2~3ある。^{2),3),4)}

その実験結果から、飽和砂層模型地盤に設置された模型杭が地盤の液状化する過渡的な状態(不完全液状化)において、短時間ではあるが大きく振動することが指摘されている。この原因は液状化の進行によって地盤剛性が低下して、地盤が大きく振動したり、外力と共振したりするからであるといわれている。

着者も地盤の液状化過程において砂層地盤中に存在する地中構造物がどのような応答特性を示すかを明らかにするために砂箱を用いた液状化実験を行なった。

5),6) この実験では小型加速度計を埋設

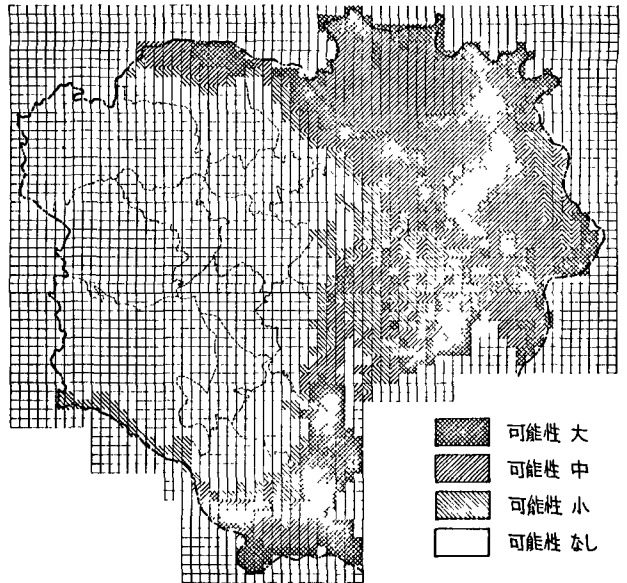


図-1 東京23区における液状化現象の可能性¹⁾

した模型砂層地盤を用いて液状化実験を行ない、その加速度応答特性を明らかにしている。その結果、地盤の液状化過程において、埋設された小型加速度計は、①飽和地盤よりも不飽和地盤において大きな加速度応答が、しかも長い間見られること、②非線形応答をすることなどが明らかになった。

したがって、今回は模型地盤の含水比によって、埋設された小型加速度計の応答特性がどのように変化するかを報告する。また、これまでの実験では入力として正弦波(6Hz)を用いている。そこで、さらに、0~20Hzの成分波を持つランダム波を用いた場合の応答特性についても述べることとする。また、小型加速度計周辺の液状化の性状についても若干の考察を行なうこととする。

なお、実験装置と実験方法については参考文献(5),(6)を参照されたい。

2. 含水比による加速度応答特性の相違

すでに報告したように、模型砂層地盤の含水比によって、埋設された小型加速度計の加速度応答特性が大きく異なる。そこで、模型地盤の含水比によって、どのように応答波形が変化するかをその包絡線の形状で示したのが表-1である。

表-1 模型地盤の含水比による加速度応答波形の相違

含水比	応答波形の特徴	応答倍率	地盤の状態
入力波			
不飽和地盤	0.230	1.0 1.5	軟化・液状化せず 波形は乱れなし。
	0.240	約30	軟化[不完全液状化]する だけで、完全に液状化しない
飽和地盤	0.270	3.0 1.5	完全に液状化する 液状化すると、応答は見られなくなる

表-1は著者の行なった液状化実験模型地盤に埋設された小型加速度計の特徴的な加速度応答波形を含水比別に示してある。但し、過渡的正弦波(6Hz)を入力とした場合である。含水比が0.230以下の不飽和地盤において、応答波は入力波と全く同じ形をしており、加速度応答倍率は1.5倍である。応答波形は乱れておらず、小型加速度計は線形応答を行なっていると思われる。含水比0.230~0.240の不飽和地盤では、応答波形が乱れて、大きな応答値を示す不完全液状化時特有の応答が入力の継続中にわたって見られる。しかし、応答が見られなくなるという完全液状化の状態にはならない。したがって、加振力によって地盤が完全には液状化するまでに至らず、単に軟化しただけであるとも言える。含水比0.240~0.270の不飽和地盤では液状化しても、応答が見られる。含水比0.270以上の飽和地盤では、不完全液状化の状態は短時間しか示さず、すぐに完全液状化の状態となって、応答は見られなくなる。

以上に述べたように、液状化過程において模型地盤に埋設された小型加速度計の加速度応答特性は含水比によって異なる。そこで、著者の行なった砂箱実験において、含水比によって、小型加速度計の応答特性がどのように変化するかを定量的に示したのが図-2.3である。用いたデータは、高さ、幅、長さが25x35x50cmの砂箱によって得られたものである。図-2は模型地盤の含水比と入力に対する最大応答倍率の関係を示したものである。図-2を見てわかるように、地盤が軟化、液状化する限り、

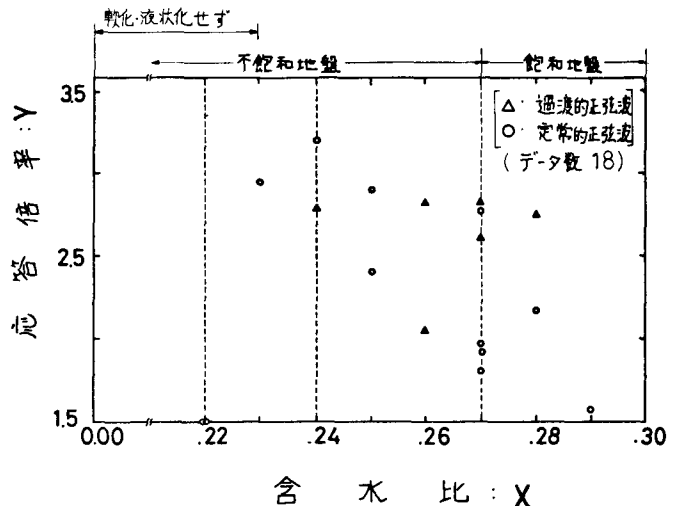


図-2 加速度応答倍率と含水比の関係

含水比が低くなるにつれて、応答倍率が大きくなっていくのがわかる。

次に、問題となるのはこのような不完全な液状化の程度がどのくらい続くかということであろう。図-3は地盤の含水比と小規模耐震計による完全液状化率の関係を示す実験との結果を示したものである。ここで、問題となるのは不完全な液状化時の耐震時間をどのように定義するかということである。不完全な液状化時の状態は耐震木圧が上昇して耐震波形が乱れ始めるときと考えるも進んか

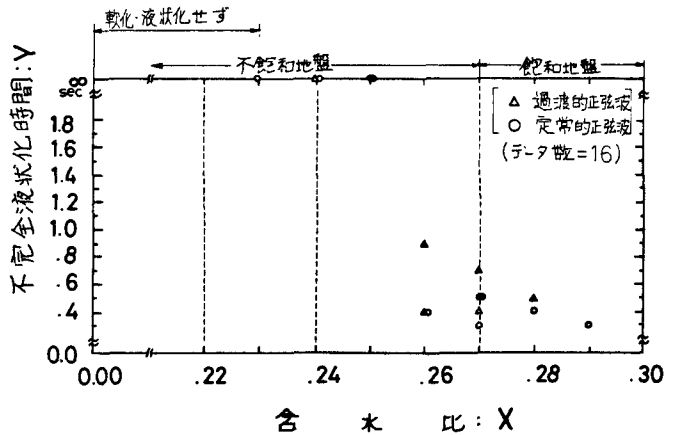


図-3 不完全な液状化時における含水比の割合

えがないであろう。本論文では不完全な液状化率の総わりを次のように定義した。すなわち、地盤の液状化が適合して、不完全な液状化率の大きな耐震が小さくなり、入力に対する耐震率が1.0以下になるとした。不完全な液状化時における耐震には他の方法があるかもしれない。しかし、同一の作業にしたがって耐震時間を定めれば、地盤の含水比と耐震時間の関係を導くのに進んかえないであろう。

図-3を更に見ると、含水比0.250を境にして急に不完全な液状化時が少なくなる。また、含水比が少なくなると不完全な液状化時が少なくなる傾向が見られる。

以上のように、砂質土層をひとたび液状化、軟化すると、地盤物は大きな耐震耐震を示すという現象が観察された。しかし、含水比の低い地盤で耐震率が大きく、その大きな耐震を示す現象が少なくなるという現象が観察された。

3. ランダム波を入力とした場合の耐震特性

以上の液状化現象を再現し、一部分である正弦波(6Hz)で耐震を評価している。これは耐震波形の乱れ現象から液状化現象における地盤-構造系の耐震メカニズムを考察するのに都合がよいからである。しかし、耐震の地盤耐震波は種々の周波数の波を成分とする複雑な波である。そこで、入力として耐震の地盤波に近いランダム波を用いて液状化現象を再現し、地盤を乱れ小規模耐震計がどのような耐震特性を示すかを明らかにする。

ランダム波の発生には耐震記録(機)のランダム波発生装置(CLP-55)を用いた。この装置はマイクロコンピュータを内蔵しており、連続ランダム波をA/D変換して、デジタルで読み取ってから、D/A変換してアナログで出力する。耐震にはこのランダム波の耐震成分(20Hz以上)をローパスフィルターでカットさせたものを用いた。

図-4は含水比0.280の完全飽和地盤に埋められた小規模耐震計の耐震耐震波形、入力であるランダム波及び耐震木圧波形である。耐震木圧が上昇を始め、地盤が不完全な液状化の状態になると入力に比較して大きな耐震耐震が見られる。その際の耐震率は約2.3倍である。しかし、地盤が完全に液状化すると耐震耐震は入力に比較して小さくなる。

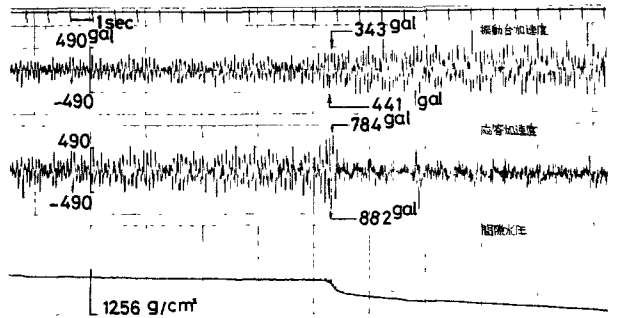


図-4 ランダム波入力に対する加速耐震波形
— 飽和地盤 (含水比 0.280) —

次に、不飽和地盤における耐震耐震を

5)に示す。図-5を見てわかるように、間隙水圧が上昇して不完全液状化になると大きな加速度計値が見られる。その後、地盤が液状化して加速度が小さくなる。しかし、すぐに大きな加速度が見られるようになる。

以上のような加速度計値等は圧縮波を用いた場合の試験結果とほぼ同じである。しかし、液状化等について地震動試験を行なうには、ランダム波を入力とする液状化実験をさらに数多く行う必要がある。

4. 小型加速度計周辺における液状化の性状と液状化後の観察

以上で示したような液状化のメカニズムを考察する際に重要となるのは液状化過程において小型加速度計が地盤と一体となって動くかどうかという点である。そこで、小型加速度計周辺の液状化の性状を調べるために、間隙水圧計を加圧計近くと離れた所に設置してその液状化の性状を調べた。(図-6)。不飽和地盤における間隙水圧の観測を図-7に示す。不飽和地盤では含水比の分布が一定でないため、液状化実験を5回繰り返した。図-7を見ると、小型加速度計近くで、特に早く間隙水圧が上昇するようになることは見られない。しかし、飽和地盤(含水比0.282)では加速度計近くでは離れたところよりも若干早く間隙水圧が上昇する。したがって、以上のような実験結果をもとにするかぎり、不飽和地盤では加速度計が地盤と一体となって動くように思える。しかし、飽和地盤では地盤と一体となって動いていない可能性が考えられる。したがって、もし地盤と一体とならずに動かないとすれば、その液状化等に対する観察についても検討する必要がある。

5. おわりに

本研究によって、液状地盤の含水比によって埋設小型加速度計の液状化等がどのように変化するか明らかになったと思われる。また、ランダム波入力に対する液状化等についても報告した。さらに、小型加速度計周辺の液状化の性状についても、若干の観察を行なった。

参考文献(1)東京建設学会誌;地震に関する地盤実験的液状化現象報告(付図-5)、(2)渡部・佐藤・伯野;不完全液状化砂の液中懸濁物に及ぼす影響,土木学会全国大会,1973、(3)吉田・橋本;液状化砂中に於ける杭の挙動に関する液状地盤,土木学会全国大会,1975、(4)渡部・吉田・坂本;砂層中の杭の動的挙動に関する液状地盤,14回日本地盤工学会発表会、(5)吉田・伯野;液状化等における液中懸濁物の液状特性,土木学会全国大会,1978、(6)伯野・吉田;液状化等における液中懸濁物の液状特性,15回日本地盤工学会シンポジウム,1978.11.,

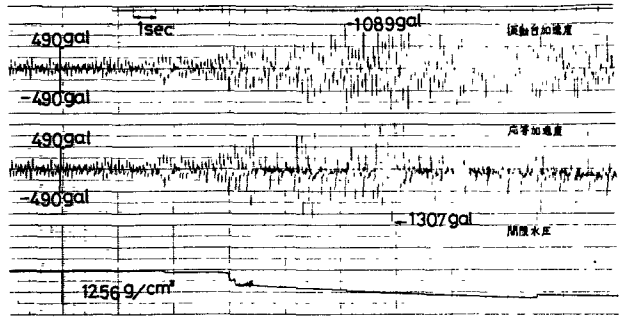


図-5 ランダム波入力に対する加速度計値波形
—不飽和地盤(含水比0.260)—

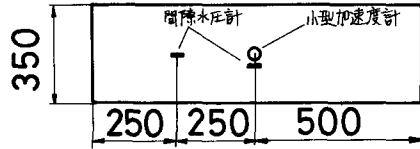


図-6 間隙水圧計の配置図(平面図)

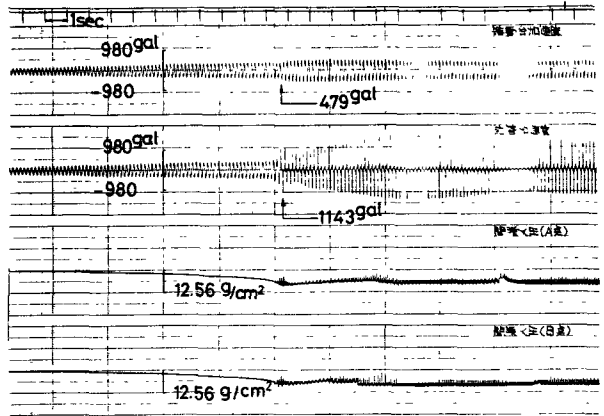


図-7 小型加速度計周辺における液状化の性状
—不飽和地盤(含水比0.250)—