各種構造物の地震被害と砂質土地盤の構造に関する研究

那 須 誠*

A Study on the Structure of Sandy Grounds Liable to Induce Earthquake Damage to Objects

Makoto NASU*

Key words : 地震被害 earthquake damage, 砂質土地盤 sandy ground, 不均質地盤 non-uniform ground, 上下逆転型地盤 upside-down ground

Abstract

In order to make clear the occurrence mechanism of earthquake damage to some kinds of objects, to develop earthquake-proof countermeasures for them, to work out rules for identifying the sites liable to be damaged by earthquakes and so on, the structures of grounds have been investigated with many examples of earthquake damages. Objects include embankments, buildings, bridges, tanks, quays, power substations etc. Their damage includes liquefaction and others that have occurred in sandy ground. In this paper the occurrence mechanism of earthquake damage to objects on sandy ground is studied referring to deformed states of ground and objects, and structures of the ground.

The results are summarized as follows : (1) When the ground under objects is made of sand only, the earthquake damage occurs very rarely ; (2) in the ground under earthquake-damaged objects are encountered many upside-down types of ground in which soft clayey soil layers underlie sandy ones. But when they are horizontally-stratified, the earthquake damage occurs very rarely ; (3) objects are liable to be deformed, when they straddle thick and thin parts of soft clayey soil layers under sandy ground, when they cross buried valleys with upside-down type grounds, or when comparatively thin soft clayey layers between sandy ground and their underlying hard soil layer tilt ; (4) above-mentioned soft clayey layers consist of soils like peat or clay ; and (5) the deformation due to earthquakes reflects the structure of the ground.

Also, it is estimated that most of these damages were caused by large differential displacements of non-uniform ground in which the thicknesses of soft clayey layers are non-uniform, or extraordinary vibrations of soft clayey soil layers in buried valley type grounds under earthquakes, just like those in other seismic damages.

1. 目 的

現在, 各種構造物の地震被害防止対策の確立が急がれている。そのため構造物の地震被害の発生機構の明確化

と, 対策工法の確立ならびに地震で被害が発生しやすい地盤の調査法等の開発が必要である。しかし, 現在は地震被害問題の解決のために, 主として解析的方法や実験的方法が用いられているので^{1), 2)}, その解析等に必要な地盤モデル等を被害事例に基づいて調べることも意義のあることと考えられる。

そのため, 筆者は現在, 盛土や建物, 橋梁, アースダ

* ㈱鉄道総合技術研究所, 地盤研究室 Geotechnical Engineering Laboratory, Railway Technical Research Institute

ム、斜面、タンク、岸壁、変電所等の構造物を対象として、明治から現在までに発生した多数の地震で生じた被害例を集めて分析を行い、被害の生じやすい地盤構造を明らかにするとともに、地震被害発生機構の推察を試みている^{3)~8)}。

そのなかには、液状化被害および砂質土盤で生じた他の地震被害の事例も含まれている。ここでは、このような砂質土盤での地震被害を地盤構造から考察した結果について発表することにする。すなわち、砂質土盤で生じた幾つかの構造物の地震被害の具体例に基づいて、地盤構造から構造物の変形状態を考察するとともに、砂質土盤で地震被害が生じやすい地盤構造をまとめ、かつ構造物の変形と地盤構造の関係、ならびに地震被害の発生機構を推察することにする。

2. 砂質土盤での地震被害例

ここでは、強度が比較的小さい砂質土盤の液状化によって生じたと言われている幾つかの地震被害例として、建物、橋梁そして盛土の変形状態と地盤の構造について述べ、さらに比較のために、強度が大きい砂質土盤で生じた橋梁の地震被害例について述べる。

2.1 建物

(1) 新潟交通男子寮

1964年の新潟地震で被害が生じた新潟交通男子寮(杭基礎)の地盤は主として砂質土から成る。図-1^{4),9),10)}に示すように、ここでは特に男子寮建物に大きい沈下や傾斜等の被害が生じた。その梁間方向(短軸方向)の約 6° の傾斜は、地盤内の標準貫入試験の N 値が比較的大きく締まった砂層(砂丘)の上面が浅くなる方向(東側)で、かつ震央方向とほぼ直角に生じている⁷⁾。この地盤の永久変位(航空写真で測定した水平方向変位)の発生方向¹⁰⁾は震央方向とほぼ直角であるが、表層砂質土層の厚くなる方向に生じている。すなわち、地盤の永久変位方向と建物の梁間方向の傾斜方向は逆になっている。

ここで図-1(a),(b)を見ると、深さ18~20m付近に、ボーリング孔No.5からNo.4の方向(この方向は地盤の永久変位方向にほぼ平行である)に、あるいはボーリング孔No.5からNo.2の方向に薄い粘性土層が傾斜して存在している。なお、基礎杭は建物の傾斜方向とほぼ同じ方向に傾いている⁹⁾。

このように軟弱地盤の下に密な地層上面(あるいは硬い地層上面や基盤面)が浅くなる方向に建物の梁間方向が傾斜した例は、1978年宮城県沖地震の長町郡山団地建物その他にも多く見られる⁴⁾、1990年フィリピン地

(a) 土質調査位置

(b) 土質柱状図

(c) 地盤状態

図-1 新潟交通寮の変形と地盤状態
(1964年新潟地震)^{4),9),10)}

震の建物¹¹⁾でも傾斜地盤でその傾斜と逆の方向に大きく変形している例が多く見られる。

(2) ホテルNI

同じ地震で、多数の基礎杭が弓なりに曲がる被害が発生したホテルNI(杭基礎)の地盤の表層は、図-2^{12),13)}に示すように主として緩い砂層から成る。

この地盤の深さGL-17~18m付近には、厚さが30~40cmの N 値が局部的に低下する粘性土層(図

図-2 ホテル NI の地盤状態 (1964年新潟地震)^{10),12),13)}

中の●印)がある。この粘性土層は南東方向(ボーリング孔 No. 1 から No. 3 にかけての方向)に傾斜しており、地表面もそれに対応してその方向に傾斜している。 N 値が比較的かつ局部的に小さい沖積層底面もその方向に傾斜しており、この底面のうち、特にボーリング孔 No. 2 の GL-10 m 付近にも粘土層が薄く存在している。そして、地盤の永久変位¹⁰⁾がこれらの土層の傾斜方向に発生しており、その方向は表層の緩い砂層が厚くなる方向に等しく、しかも震央方向とはほぼ直角な方向に発生している。

ここでは、地層に傾斜と軟弱粘性土層が存在していたため、地震のときに表層地盤に不同変位、さらには地すべり等が生じて被害が生じたものと考えられる。

(3) 県営川岸町アパート

同じ地震で被害が生じた県営川岸町アパート(直接基礎)の敷地は、信濃川の旧河川敷の砂質土から成る埋め立地であり、地盤図等を見ると北側の国道に沿って走る砂丘¹⁴⁾の縁にある。図-3^{15)~18)}に示す隣りの敷地の地盤状態等を見ると、ここの敷地は全体が様な地盤でない。また、そこの旧河道表面と思われる所には軟弱な粘性土等も存在している¹⁷⁾。アパート建物の各棟にさまざまな傾き方や沈下¹⁸⁾が生じたのは、このように様でない地盤状態だったためと思われる。

何故ならば、これまでの多数の地震被害例の調査結果によると、構造物の地震被害は地盤の不均質な所で多く発生し、しかも被害形態が地盤構造を反映することが多いからである^{3)~8)}。また、このアパートでは建物の転倒は北側の砂丘の方に生じているが、これは先に述べた新潟交通男子寮の建物の梁間方向が、砂丘上面が浅くな

る方向に傾斜しているのと似ており、地盤構造も両者で似ていたものと考えられる。

(4) 新潟駅

同じ地震で被害が生じた新潟駅(杭基礎)の地盤は主として砂質土から成り、図-4に示すように、表層の緩い砂層の下に締まった砂層がある⁴⁾。ほとんど無被害の東側ブロックの建物の下の締まった砂層は、ほぼ水平に堆積している。西側ブロックの6階建て建物は西側に傾斜したが、その下の締まった砂層の上面は西側に傾いている。

ここで、東側ブロックの建物の下の地盤を詳しく見ると、深さ約10 m 付近の締まった砂層の上面付近にある N 値のごく小さい粘性土層は西側に緩く傾いている。そのため、地震のときにこの地層がすべり面のようになって、この無被害と言われる建物が西側に移動したため、地盤内の支持層が傾いている西側ブロックの6階建て建物が西側に大きく傾斜したのではないと思われる。

2.2 橋 梁

(1) 昭和大橋

新潟地震で落橋が生じた昭和大橋(杭基礎)は、図-5^{18),19)}に示すように、橋軸方向に見て比較的軟らかい砂質土層(Um層あるいはUm~Us層)の薄い所(右岸側)と、厚い所(左岸側~右岸側)に跨って作られている。そのため、地震のとき地盤に不同変位が大きく生じて落橋被害が生じたものと考えられる^{5),8),20)}。

また、ここの落橋範囲は同図を見るとわかるように、地盤中の N 値が0に近い極小値を示すA点付近(粘性土から成る)とB点付近、C点付近(腐植土から成る)

図-3 旧川岸町アパートの被害状況と現県立ガンセンターの地盤状態^{(15)~(18)}

(b) 平面図とボーリング位置

図-4 新潟駅の変形と地盤状態 (1964年新潟地震)⁽⁴⁾

図-5 昭和大桥の変形と地盤状態 (1964年新潟地震)^{18),19)}

の極軟弱層の存在範囲と等しい。図中のP4橋脚の杭の曲がり、その前後の軟らかい砂質土層がその底面の傾斜方向の右側に大きく動いて生じたように思われる。

なお、1948年の福井地震で被害が生じた中角橋の落橋形態が、昭和大桥のそれと似ており、両者の地盤構造も似ていたのではないかと考えられる⁵⁾。何故ならば、これまでの多数の地震被害例の調査結果によると、構造物の地震被害形態と地盤構造が対応することが多いからである^{3)~8)}。

(2) 八千代橋

同じ地震で沓破損が生じた八千代橋（杭基礎）の9P橋脚は、河床変動の大きい所と小さい所の境界部で、河床が左側に急傾斜し始める所（これはN値が大きい地層上面の急傾斜部分で、地形急変箇所である）⁵⁾で、左側に移動している。図-6^{5),21)}に示すように、この9P橋脚の下、杭の水平亀裂は、杭頭から深さ約6m下にある厚さ約4mの腐植物混じり砂質土層（N値約3）の所で発生している。その下の砂質土層のN値は急に大きくなっており、その水平亀裂は地盤強度の急変箇所が発生している。

(3) 万代橋

同じ地震で被害が比較的小さかった万代橋（橋台は杭基礎で、橋脚は井筒基礎）では、現在の橋は元の橋よりも短くなっている。ここの下部構造は関東地震の被害例等を参考にして強固なものにされており、井筒も十分な根入れを持っている¹⁸⁾。また、ここの地盤の表層部は深さ方向にほぼ増加する強度を持っているし、地盤全体も水平に近い層からできている。これは、1968年の十勝沖地震のとき被害が軽微だった小川原高架橋の地盤

図-6 八千代橋のP9橋脚変形と地盤状態 (1964年新潟地震)^{5),21)}

が、ほぼ水平に近い地層構成を持っていたのと似ている⁵⁾。

(4) 信濃川橋梁

同じ地震のとき傾斜等が生じた信濃川橋梁（杭基礎）

図-7 信濃川橋梁の変形と地盤状態 (1964年新潟地震)^{18),22)} 図-8 東跨線橋 (笹口跨線橋) の変形と地盤状態 (1964年新潟地震)^{5),18)}

では、1A 橋台と 1P 橋脚に傾斜等が生じた。その付近の地盤の表層は、図-7^{18),22)}に示すように、砂丘の縁の傾斜地盤上の砂質土から成る河成層と人工埋立層からできている⁵⁾。その河成層と人工埋立層にも傾斜があり、厚さも一様でない。

図-7(b)から 1P 橋脚付近では地層が河心方向に傾斜するとともに、B2 と B4 の N 値の深度分布の違いから上流方向にも傾斜していることがわかり、また地盤図¹⁴⁾等からも埋没砂丘表面が河心方向と上流方向に傾斜していることがわかるが、1P 橋脚は河心方向と上流方向に傾斜しており、その方向は地層の傾斜方向と一致している。なお、図-7を見ると地盤内の深さ標高 -3~-9m 付近には多量の腐植土が混入し、さらに標高 -19m 付近にも N 値が極小値を示すシルト層が存在している。すなわち、ここの地盤にも地層の傾斜と軟弱粘性土層が存在している。

(5) 東跨線橋 (笹口跨線橋)

同じ地震で落橋被害が生じた東跨線橋 (杭基礎) は、図-8¹⁸⁾に示すように砂丘と旧河道の砂質埋立地盤に跨って作られていた⁵⁾。ここの砂丘上面は傾斜し、その上の埋立砂層が前者側から後者側にかけて厚くなっており、そのためこの埋立砂層に大きい不同変位が生じて、

線路を跨ぐ桁が落下したことが考えられる。

(6) 錦桜橋

図-9に示すように、1978年の宮城県沖地震のとき、錦桜橋 (杭基礎) では橋脚 P7~P8 間の吊桁部が落下した²³⁾。これは、橋軸方向に特に大きい変位が発生したためである。ここの地盤の表層を見ると橋梁全体にわたって砂質土層が分布しているが、その下の N 値=6~9 の粘性土層は右岸側が薄く左岸側が厚く堆積している。そのため地震時に大きい不同変位がその粘性土層に生じて、その厚さの変化部にあった吊桁部が落下したものと考えられる。

なお、ここの地盤状態ならびに基礎杭の根入れ状況や橋梁形式および落橋という被害状態は、ベイマッドの厚い所と薄い所に跨っていたサンフランシスコ・オークランドベイブリッジが、1989年のロマプリータ地震のときベイマッドに橋軸方向に大きい不同変位が生じて、そのベイマッド厚さの変化部で被害を受けたのと似ている⁵⁾。

(7) 国道静内橋

1982年の浦河沖地震のとき、国道静内橋 (井筒基礎) では震央方向とほぼ直角に大きい地震力が作用して、橋脚にたすき掛けのせん断亀裂が橋軸と斜め方向に発生し

図-9 錦桜橋の変形と地盤状態 (1978年宮城県沖地震)²³⁾

た。この年代の違う幾つかの地形図を見ると、橋脚付近に中州等があり、被害を受けた橋脚は中州等の縁や両者の中間部に位置し、特に著しい被害が生じたP2, P3, P6橋脚の井筒付近では基盤表面がくぼみ、また表層地盤中に軟らかい粘性土層も堆積している⁵⁾。

しかし、この静内橋よりも河口近くにある静内川橋梁は直接基礎で作られているが、年代の異なる幾つかの地形図を見ると安定な砂州の上に作られていたため、被害が生じなかったものと考えられる⁵⁾。

なお、前者の国道静内橋では基礎井筒が長くても被害が発生し、後者の静内川橋梁では基礎杭が無くても無被害であった。そのため、例えば1978年の宮城県沖地震による阿武隈橋⁵⁾の被害事例等も参照すると、橋梁の被害は基礎が長ければ発生せず、基礎が短ければ被害を受けやすいということは必ずしも言えず、それは地盤条件によるものと考えられる。同様なことが関東大地震の際の丸の内付近の建物の被害調査でも言われている²⁴⁾。

(8) 水深第1高架橋

ここに示す1987年の千葉県東方沖地震による水深第1高架橋(杭基礎)の被害は、地盤内に液状化しないくらい大きいN値の砂層が存在する所で生じた例である。ここでは橋軸とはほぼ直角方向に大きい地震力が作用して⁵⁾、橋脚の橋軸直角方向の面にたすき掛けのせん断亀

裂が生じた²⁵⁾。

この橋はU字型枝谷の大きい谷(谷底平野)への出口付近を斜めに横断しており、図-10^{25), 26)}によると、被害を受けたNo. 2, No. 3ブロックとNo. 4ブロックの左側半分は埋没谷が特に深い所にあり、かつN値が大きくて厚い層の下に、N値のごく小さい粘性土層が厚く堆積している所にある。しかもNo. 2とNo. 4両ブロックの左側半分の所では、その極軟弱粘性土層は薄い被害も軽く、その中間の極軟弱粘性土層の厚い部分で被害が大きく生じている。すなわち、その被害程度が極軟弱粘性土層の厚さに対応している。

この地盤のように谷を埋めた軟弱粘性土地盤は、文献²⁷⁾に示されているように、地震のとき谷軸方向に振動しやすいために被害が生じたものと考えられる。

また、前述の国道静内橋と同様に、この高架橋では橋脚上部にせん断亀裂が生じているが、それは国道静内橋の橋脚下部と井筒上部が硬い地層内に作られていたのと同様に、この高架橋の基礎フーチングと杭上部が埋立土と密な砂層内に作られていたためと思われる。

なお、水深第1高架橋の次の高架橋(杭基礎)はほとんど無被害であるが、水深第1高架橋と同様に埋没枝谷を横断している。この枝谷の奥は比較的深くて地表面の傾斜も緩い。この谷を埋めた軟弱地盤は、全体が

図-10 水深第1高架橋の被害状況と地盤状態 (1987年千葉県東方沖地震)²⁵⁾

軟弱な粘性土と腐植土から成っている。構造物の種類は異なるが、このことと同じように全体が軟弱な腐植土等から成る軟弱地盤上で地震被害が生じなかった盛土 (向山・三沢間662K735M 付近) の例³⁾があり、他の地震被害例を調べても極軟弱な土層だけからできている地盤では、地震被害例がほとんど見られない。

このように同じ谷地形でも、その堆積土層の構成の違いが両橋梁の被害発生の有無に関係したことが考えられる。

2.3 盛土

(1) 出戸・西目間盛土

新潟地震のとき、この出戸・西目間の盛土は約120 m も流出した。それは砂質盛土の底部が液状化して流出したと言われている。しかし、この盛土は図-11に示すように、主として腐植土から成る軟弱地盤と傾斜成層構造の良好地盤に跨っている。このような基礎地盤構造であったため、地震時に地盤に生じた不同変位で盛土が軟弱地盤の厚くなる方向 (良好地盤上面の傾斜方向) に、しかも震央方向と直角に流出したものと考えられる^{3), 7)}。

(2) 青山砂丘

同じ地震のとき、青山砂丘で地すべりが生じた²⁸⁾。

この地すべりは、旧版地形図²⁹⁾から判読すると砂丘の縁の枝谷の大きい谷 (谷底平野) への出口付近で、溺れ谷状になっている所で生じている。図-12²⁸⁾の地すべり発生箇所の地盤構造を見ると、地盤内に法尻付近の深さ GL-8 m 付近から斜面中腹付近の GL-12~-16 m 付近にかけて、純腐植土層が存在している。しかし、隣の無被害箇所の地盤構造を見ると、その純腐植土層は法面中腹~天端直下の地盤内に存在しているだけである。

常時でもせん断応力が大きく発生している斜面直下の地盤に、腐植土層が存在していたことが、地すべり発生につながったように思われる。なお、この地盤の強度分布と旧版地形図²⁹⁾が示す原地形を見ると、崩壊部の地盤の N 値は深さ方向にほぼ一定なのでここは盛土で、無被害箇所は N 値がほぼ深さ方向に比例しているので、ここは元の砂丘と思われる⁷⁾。

(3) 白山変電所の地盤

同じ地震のとき、白山変電所の地盤が図-13に示すように最大約 7 m も信濃川に向かって大きくすべった¹⁸⁾。旧版地形図³⁰⁾によると、ここは砂丘先端付近にある。図-13を見ると、その傾斜している砂丘表面の上の軟らかい砂質土地盤の強度分布は様でなく、局部的に強度の小さい所が幾つかある。すなわち、ボーリン

図-11 出戸・西目間盛土の変形と地盤状態 (1964年新潟地震)³⁾ 図-12 青山砂丘の変形と地盤状態 (1964年新潟地震)²⁸⁾

(a) 平面図とボーリング位置

(b) 地盤状態

図-13 白山変電所付近の地すべりと地盤状態 (1964年新潟地震)¹⁸⁾

グ孔 No. 1 の深さ 13~16 m 付近に N 値が 0 に近い極めて緩い部分がある。また、ボーリング孔 No. 3 の深さ 13~15 m 付近で N 値が小さく (A 点、シルト混入)、ボーリング孔 No. 2 の深さ 20 m 付近にも N 値が極小値を示す所 (粘土) がある。そのように N 値が極めて小さい所や極小値を示す所には、粘性土層が存在してい

る。すなわち、ここの地盤にも傾斜と極軟弱粘性土層が存在しており、以上に述べてきたように、構造物が地震被害を受けやすい地盤である。

(4) 白山・新潟間盛土

同じ地震ですべりや沈下等が生じた白山・新潟間盛土¹⁸⁾は、埋没砂丘¹⁴⁾の縁の砂質埋立地盤上に存在し、

埋没砂丘上面の傾斜方向（信濃川の河心方向）に変形している。しかもそれは砂丘の縁の埋没枝谷の所で特に大きく生じている。こゝも信濃川の旧河川敷の埋立地¹⁸⁾で、地盤には図-14に示すように、軟弱な粘性土あるいは腐植物混じり土層や腐植土層が比較的薄く存在し、かつ地層に傾斜が見られる。

(5) 新潟空港

同じ地震のとき、新潟空港のB滑走路に湾曲（水平変位4.5 m）が生じた。それは海岸砂丘と氾濫原の境の埋立地盤で、沼（旧版地形図³¹⁾によると昔から存在）の方向に生じており¹⁸⁾、昔は砂丘の縁がその方向に谷状に、すなわち枝谷状にくぼんでいたように思われる。

(6) 関上上堤防

宮城県沖地震で被害が発生した関上上堤防は、図-15(a)¹⁹⁾に示すように、軟弱層の薄い所（堤外地側）と厚い所（堤内地側）に跨っている。特に亀裂や沼のすべり破壊等が生じた堤内地側の地盤では、緩い中粒砂層の下にN値がそれよりもごく小さい軟弱シルト層が存在

している。地震のときに、この傾斜しているシルト層にすべりが生じたり、堤内地側の地盤に大きな不同変位が生じて、被害が生じたものと考えられる³²⁾。

なお、こゝの地盤状態は日本海中部地震で被害を受けた鯉川・鹿渡間盛土が、腐植土層を含む軟弱地盤と良好地盤に跨っていたのと類似している³²⁾。

しかし、図-15(b)¹⁹⁾に示すように、隣接の無被害堤防の地盤の最上層部のシルト層はN値が深さとともに大きくなり、特に盛土の天端部を含む本体部直下と堤外地側のり面直下の地盤内の土層はほぼ水平に堆積している。

(7) 秋田港岸壁

日本海中部地震のとき秋田港では、青森港岸壁²²⁾と同様に埋め立て砂で作った岸壁が被害を受け、地山を掘削して作った岸壁では被害を受けなかった。そのうち最大の被害（法線のはらみ出しや鋼矢板折損等）が生じた大浜地区-10m 2号岸壁背後の埋め立て砂の下の旧地山表面は海の方に傾斜していた²³⁾。

また、セルラーブロック構造の中島1号岸壁で、崩壊や前傾き、沈下、はらみ出し等が大きく生じた部分は、図-16に示すように、旧版地形図によると北埠頭A岸壁北側の北東に長く延びる旧護岸（それに沿って、すなわち中島1号岸壁の法線直角方向に比較的小さな掘り込み水路もある）に沿って、旧地盤面上を埋め立てて作られた所である³³⁾。すなわち、もともと溝型の掘り込み水路の出口付近で生じている。また、こゝは軟らかい地盤（埋め立て地盤）と硬い地盤（旧護岸部）の境界部に当たるため、地震のとき軟らかい地盤が硬い地盤の方に動くたびに、境界部で軟らかい地盤が法線直角方向にはらみ出したことも考えられる。

2.4 その他の液状化被害例

(1) 新潟地震のその他の液状化被害発生箇所、例え

(a) 平面図と地盤調査位置

(b) 地盤状態(DC4-DC1断面)

図-14 白山・新潟間盛土の地盤状態 (1964年新潟地震)¹⁸⁾

図-15 開上堤防の地盤状態 (1978年宮城県沖地震)¹⁹⁾

ば昭和大橋左岸近くの堤内地地盤、東跨線橋の旧河道側地盤、Dビル、Sビル等の地盤でも、砂質土層の下に比較的薄い低強度の粘性土層や腐植土層が存在している^{13),20)}。ここでは、地盤の水平方向の永久変位が緩い砂質土層の傾斜方向に発生している場合が多く、さらにその中には震央方向とほぼ直角な方向にそれが発生した例が幾つか見られる¹³⁾。震央方向とほぼ直角な方向に地震被害が発生した例は、砂質土地盤以外の地盤でも多数見られる⁷⁾。

(2) 1968年の十勝沖地震や日本海中部地震等で液状化被害が生じた地盤でも、砂質土層の下に軟弱な粘性土層や腐植土層が比較的厚いが不等厚状態で、あるいは薄くかつ傾斜して存在したり、局部的に存在していることが多い。例えば後者の日本海中部地震では、勘助溜池土堰堤が大きく沈下した範囲や、昭和・飯田川バイパス、車力村牛瀉地区の集中発生箇所、砂丘周辺で被害が生じた秋田市飯島、中野本町の地盤でも砂層の下にピート層があり、牛瀉小の地盤にも砂層の下に腐植土層やシルト層が堆積している。さらに、中浅内の能代南バイパス、富蒔の岩木川堤防、男鹿工高、八郎潟堤防、車力村富蒔、屏風山幹線道路、同平滝、富蒔小、豊富な岩木川堤防等でも砂層の下に軟らかい腐植土層あるいは粘性土層が存在している²⁰⁾。

また、1989年のロマプリータ地震で被害が生じたサンフランシスコのマリーナ地区やマーケット通り沿い、サウスマーケット地区の地盤にも、砂丘や砂質埋土の

図-16 中島1号岸壁の被害位置
(1983年日本海中部地震)³³⁾

下に軟弱なピート等も含む不均一な厚さの粘土やベイマッドが存在している²⁰⁾。

3. 既存の事例調査や実験結果から推定される現象

(1) 砂質土地盤の液状化による永久変位は地表面が傾斜した所ではほぼその方向に発生し、かつ変位発生起点の微高地では多数の亀裂や沈下が生じ、変位が収束する低地部の地表面は隆起する傾向が見られるという報告がある³⁴⁾。しかし、このような地盤変位の発生状況は典型的な地すべり現象と似ている。通常、地すべり地盤のすべり面付近には地すべり粘土と言われる粘性土層が存在していることが多く³⁵⁾、砂質土地盤の液状化によって永久変位が発生した地盤構造もこれと似ており、砂質土地盤でも地震が引金になって地すべり的な現象が生じる場合もあることが考えられる。

(2) 砂層と薄い細粒分層の互層地盤を対象とした液状化実験によると、細粒分層に沿ってすべりが生じやすく、これは細粒分層直下に生じ、加振後もしばらく残っている薄い水膜が弱点となり生じたものと類推されている^{36),37)}。このように、摩擦が極めて小さい水膜がすべり面になることも考えられるし、粘性土層が傾斜しているとき土から分離した水が重力の作用で粘性土層の下側に集まって、その上側の土塊を(浮力で)押し上げて地すべり的な現象が発生することも考えられる。新潟地震で県営川岸町アパートが住民の避難した後で大きく傾斜、転倒したのは、後者のようなことが起きたためとも考えられる¹⁷⁾。

(3) 新潟地震のときの川岸町付近その他のマンホー

ル浮上箇所（例えば図-17¹⁸⁾を見ると、地盤に亀裂等の変状が生じており、さらに砂丘の縁のように砂質土層等に傾斜がある所で多く発生している。そのため、その浮上は不同変位による地盤変状の亀裂等が先行して支持力が低下した状態の所に、静水圧状態の、あるいは地震動で圧力の高まった水が浸入して生じたものと考えられる。

4. まとめと考察

次に、これまでに述べてきた砂質土地盤の構造をまとめるとともに、構造物の変形と地盤構造の関係と地震被害の発生機構を推察する。

(1) 液状化被害を含む砂質土地盤上の被害は、単一砂質土層からなる地盤ではほとんど見られない。

(2) 沖積層や埋立層から成る表層地盤中の砂質土層の中間部や、底部あるいは下部に極軟弱な粘性土層や腐植土層等が、厚くあるいは薄く、あるいは局部的に存在する地盤、すなわち『上下逆転型地盤*』で地震被害が多く生じている。ただし、『上下逆転型地盤』でも水平に土層が堆積しているときは、地震被害がほとんど見られない。

(3) 砂層の下の極軟弱な粘性土層等が厚いときはその厚さが一様でない場合（不等厚の場合）が多く、それが薄いときは傾斜してその上の砂層の厚さが一様でない場合が多い。極軟弱な粘性土層等が局部的に存在する場合も含めて、いずれの場合も地震時に大きい上下、水平の不同変位が生じたり、すべり等が生じやすい地盤である。また、構造物が上下逆転型地盤の埋没谷を横断するときにも、地震被害が発生しやすい。

(4) このように地震被害の発生しやすい砂質土地盤の構造を、図-18に分類して示す。この分類は地盤構造とそれに対応する地震時の地盤の変形挙動の推定結果から行ったものである。

(5) 以上に述べた極軟弱粘性土層は腐植土や粘性土から成る場合が多い。

(6) また、液状化被害を含む砂質土地盤上の地震被害を受けた構造物の変形形態も、他の地震被害^{3)~8)}と同様に地盤構造に対応している。

(7) 液状化被害等が生じやすい砂質土地盤の構造として、傾斜を有する構造や地層の厚さが一様でない構造や谷型の地盤で、弱点となる極軟弱粘性土層を挟む地盤

図-17 浮上したマンホール（白山・新潟間）
（1964年新潟地震）¹⁸⁾

は、他の地震被害が生じやすい地盤構造と似ているし、このような地盤は常時でも問題が発生しやすい所である¹³⁾。

(8) 以上のことから前述の新潟交通男子寮では、地震で地盤に信濃川の方に大きい不同変位が発生したとき、地盤が地すべりのように、かつ回転するように動いたため、建物の梁間方向が埋没砂丘上面の浅くなる方向に傾斜したものと思われる。また、軟弱地盤の土の種類は違うが、梁間方向に変形した長町郡山団地建物等でも同様の動きが地盤に生じたことが推定される。

5. あとがき

現在は地震動によって高まった間隙水圧が砂層の抵抗を減少させるため液状化現象が発生して、構造物に被害が生じると言われている。しかし、常時に被圧地下水のある地盤にボーリング等を行うと、地下水が空高く吹き上げることがときどきある。このような高い圧力の地下水が地盤内にあっても、普通はその地盤上の構造物に何ら被害が発生しないことが多い。また地震時に噴砂等が生じた所では地割れが見られるが、この地割れの多くは前述したような構造の地盤で液状化に先立って生じた地盤の不同変位によるものと思われる。

また、砂質土地盤における地震被害発生箇所の軟弱地盤底面の谷型あるいは溝型形状は、砂質土地盤以外の地震被害発生箇所にも見られる。そのような構造の地盤の3次元モデルを用いた模型振動実験によれば、軟弱地盤が加振方向によらず谷軸方向に大きく振動しやすいことが明らかになっており²⁷⁾、このような現象が実際の地盤でも起きていることが考えられる。

以上のような構造の地盤に構造物を作る際の対策としては、次のようなことが有効と考えられる。すなわち、埋立てに当って原地盤が傾斜している場合には、そこを水平にならしたり、すべり面になりそうな軟らかい粘性土や腐植土層等がある場合にはそれらを除去したり、あるいはそれらの厚さが水平に一定になるようにし、また不同変位やすべりが発生しないように多数の杭を打った

* 文献38)で、最上層が締まっていた下位ほどN値が低い盛土を上下逆転盛土と言っているのですが、ここでも前述のように、下位に極軟弱な土層がある地盤を上下逆転型地盤と称することにします。

図-18 構造物に地震被害が発生しやすい砂質土地盤の構造

り、その地層を固化する等の処置が必要と思われる³⁹⁾。

以上は、地盤状態が詳しく明らかにされている地震被害例を、可能な限り集めて考察した結果であるが、ある限られた数の地震被害例なので、これからも地震被害例を集めて検討を続行することも必要であると考えられる。

最後に、以上の調査に当ってお世話になった JR 各社の関係者と、池田俊雄長岡技術科学大学名誉教授、小川正二同大学教授、建設省土木研究所と(株)奥村組ほかの関係者、および参考あるいは引用させていただいた貴重な文献の著者に厚く御礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 例えば、土質学会編 (1989) : 地盤と土構造物の地震時の挙動に関するシンポジウム発表論文集, pp. 50-136
- 2) 例えば、土質学会編 (1991) : 地盤の液状化防止対策に関するシンポジウム発表論文集, pp. 77-214
- 3) 那須 誠 (1989) : 盛土の地震被害と地盤構造, 鉄道総研報告, Vol. 3, No. 8, pp. 50-57
- 4) 那須 誠・羽矢 洋 (1990) : 建物の地震被害と地盤構造, 鉄道総研報告, Vol. 4, No. 4, pp. 35-44
- 5) 那須 誠 (1991) : 橋梁の地震被害と地盤構造, 鉄道総研報告, Vol. 5, No. 11, pp. 27-36
- 6) 那須 誠・羽矢 洋 (1990) : 地震被害に対する地盤構造と震央方向の影響, 鉄道総研報告, Vol. 4, No. 10, pp. 33-41
- 7) 那須 誠 (1991) : 震央方向と直角に生じた地震被害と地盤構造, 鉄道総研報告, Vol. 5, No. 4, pp. 53-61
- 8) 那須 誠・羽矢 洋他 (1990) : 地盤構造と地震被害形式の関係, 構造物の基礎と地盤との動的相互作用に関するシ

ンポジウム発表論文集, pp. 93-100

- 9) 新見芳男・高橋賢之助他 (1965) : 新潟交通独身寮復元工事施工記録, 清水建設研究所報, 第 6 号, pp. 91-156
- 10) 浜田政則・小島雄三 (1989) : 液状化による永久変位の要因に関する考察, 第20回地震工学研究発表会講演概要, pp. 245-248
- 11) 例えば、日本建築学会編 (1990) : 1990年フィリピン地震災害調査速報
- 12) 栗原修三・大藤辰雄他 (1984) : ホテル新潟建設工事—新潟特有の砂地盤における山留工事例—, 基礎工, Vol. 16, No. 3, pp. 80-87
- 13) 那須 誠 (1990) : 液状化被害と地盤構造の関係, 第 9 回日本自然災害学会学術講演会要旨集, pp. 50-51
- 14) 建設省北陸地方建設局北陸技術事務所監修 (1981) : 新潟県平野部の地盤図集 (新潟平野編)
- 15) 伊藤克彦・中島豊他 (1986) : 市街地における液状化対策工法—碎石ドレーン工法—, 1985年度三学・協会関西支部施工技術報告会講演概要, pp. 11-22
- 16) Kenji ISHIHARA and Yasuyuki KOGA (1981) : Case Studies of Liquefaction in the 1964 Niigata Earthquake, Soils and Foundations, Vol. 21, No. 3, pp. 35-52
- 17) 那須 誠・上沢 弘 (1991) : 地震被害と地盤構造, 地震波形の関係, 第26回土質工学研究発表会平成3年度発表講演集, No. 352, pp. 947-948
- 18) 土木学会新潟震災調査委員会編 (1966) : 昭和39年新潟地震震害調査報告, 土木学会発行, pp. 158-160, pp. 363-422, pp. 471-494, pp. 584-588, pp. 629-633, pp. 835-839
- 19) 岩崎敏雄・常田賢一他 (1981) : 地震時における砂質地盤の液状化判定法と耐震設計への適用に関する研究 (第 2 冊), 土木研究所資料, No. 1729
- 20) 那須 誠・羽矢 洋他 (1990) : 地震被害と地盤条件 (その 7), 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, III-PS5, pp. 10-11
- 21) 福岡正巳 (1991) : 震害調査余話—地震で地盤が動いた—, 土と基礎, Vol. 39, No. 3, pp. 102-106

- 22) 那須 誠・藤沢 一・菅野 晃 (1984) : 日本海中部地震による青森駅構内の液状化現象, 土木学会第39回年次学術講演会講演概要集, III-48, pp. 95-96
- 23) 建設省土木研究所編 (1983) : 1978年宮城県沖地震災害調査報告, 土木研究所報告, 第159号, pp. 329-340
- 24) 土木学会編 (1984) : 復刻版 大正十二年関東大地震被害調査報告, 第3巻, pp. 687-689
- 25) 丹生春雄 (1989) : 千葉県東方沖地震による高架橋の被害調査, 日本鉄道施設協会誌, Vol. 27, No. 6, pp. 27-32
- 26) 棚村史郎・西村昭彦他 (1989) : 鉄道高架橋の震害と原因の推定 (その1), 第20回地震工学研究発表会講演概要, pp. 13-16
- 27) 那須 誠 (1992) : 盛土の地震応答と地盤構造の関係 (その4) — 模型振動実験 —, 第27回土質工学研究発表会平成4年度発表講演集, No. 377, p. 1011-1012
- 28) 建設省土木研究所編 (1965) : 新潟地震調査報告, 土木研究所報告, No. 125, pp. 64-77
- 29) 地形図, 内野, 1:5万, 大正3年発行
- 30) 地形図, 新潟南部, 1:2.5万, 昭和22年発行
- 31) 地形図, 1:2.5万, 新潟北部, 昭和23年資料修正, 同昭和43年資料修正
- 32) 那須 誠 (1992) : 地震被害と地盤条件 (その12), 土木学会第19回関東支部技術研究発表会講演概要集III-4, pp. 180-181
- 33) 那須 誠・上沢 弘 (1991) : 地震被害と地盤条件 (その8), 土木学会第18回関東支部技術研究発表会, III-20, pp. 166-167
- 34) 浜田政則・安田 進・若松加寿江 (1990) : 液状化による地盤の大変位とその被害, 土と基礎, Vol. 38, No. 6, pp. 9-14
- 35) 土質工学会編 (1990) : スライドライブラリー 6, 建設工事と地形・地質, pp. 100-101
- 36) 柳原純夫・竹内幹夫他 (1989) : 緩傾斜護岸の模型振動実験と液状化対策工の効果, 第2回土木技術セミナー発表概要, ㈱奥村組, pp. 25-39
- 37) 竹内幹夫・増井 仁他 (1990) : 薄い細粒分層を有する砂質地盤の地震時挙動, 土木学会第45回年次学術講演会講演概要集, pp. 666-667
- 38) 中川久夫 (1986) : 造成宅地の崩壊—1978年宮城県沖地震の実例, 地質学論集, 第28号, pp. 233-239
- 39) 那須 誠・沢田俊一・今野政志 (1992) : 盛土の地震応答と地盤構造との関係 (その5), 第27回土質工学研究発表会平成4年度発表講演集, No. 378, pp. 1013-1016

(1993年1月26日受付, 1993年3月23日受理)