

土質特性と地盤の挙動

Characteristics of Soil Properties and Behaviour of the Ground

フェロー会員 工博 東京理科大学教授 工学部土木工学科 **石原 研而** Kenji ISHIHARA
 正会員 東京電機大学教授 工学部建設工学科 **安田 進** Susumu YASUDA
 正会員 不動建設(株) **原田 健二** Kenji HARADA

表層の土質状況

ポートアイランドと三宮を結ぶ六甲山系の横断面に関する表層の土質分布を示したのが図-1である。この図より、阪神高速道路から三宮間の陸地部に着目した時、地表面の平均勾配は約1%であること、表面の沖積砂礫層およびその下部の各層ともに約1~5%位の勾配で海側に傾斜進入していること、等がわかる。

液状化の被害の大きかったウォーターフロント地域は、昭和35年位より以前に埋立てられた旧人工島地区と、昭和42年以後に作られたポートアイランド・六甲アイランド地域の2つに大別されよう。ポートアイランドは、須磨の丘陸地から採取した土砂を用いて昭和43~昭和48年(第一期工事)に造成された。この埋立土の粒土は図-2に示すごとくであるが、平均粒径 D_{50} は0.2mm~8mmと相当大きく、礫分(2mm以上)を15

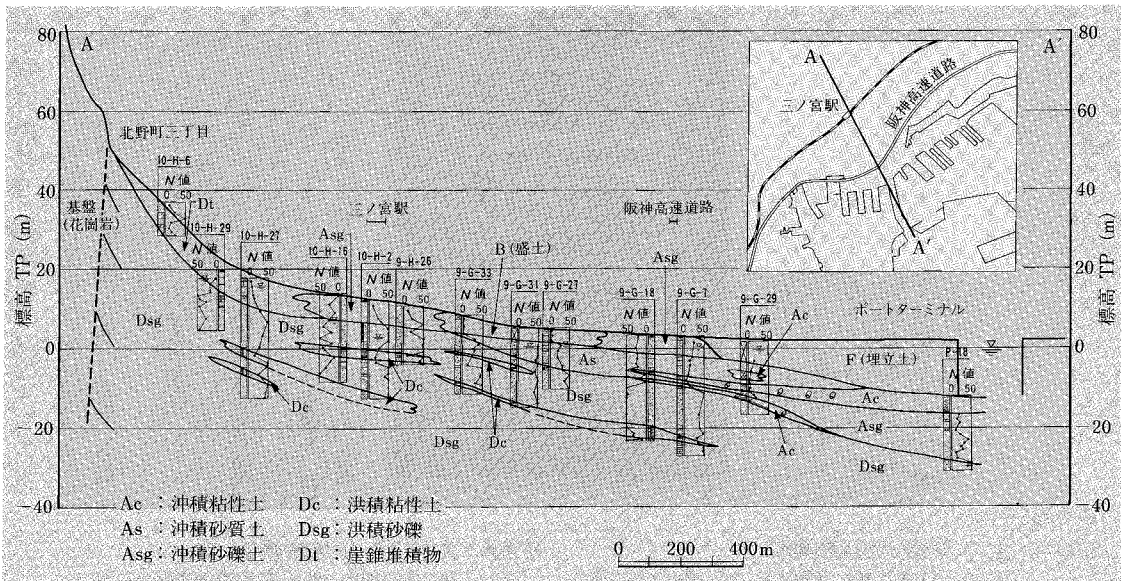


図-1 神戸市三宮ポートアイランド断面図

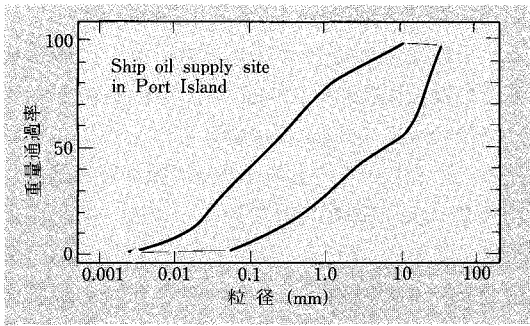


図-2 ポートアイランド埋立土の粒径加積曲線

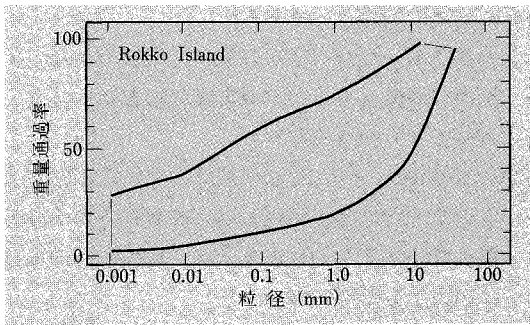


図-3 六甲アイランドの代表的な土の粒度曲線

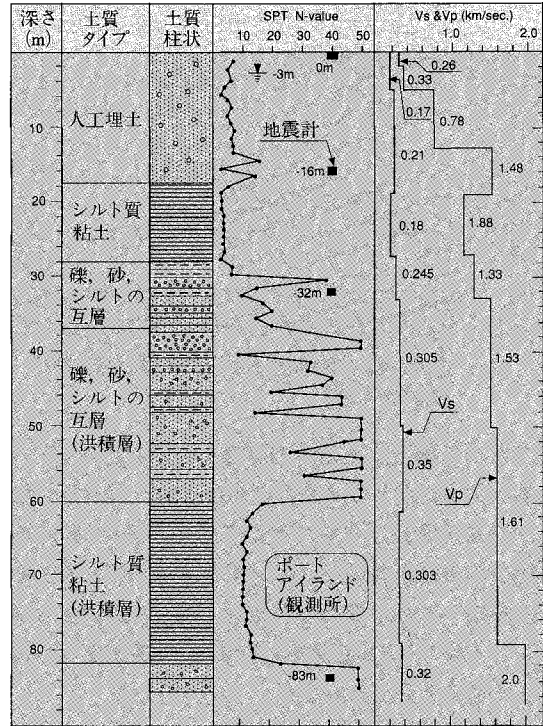


図-4 ポートアイランド地震計位置の土質柱状

～65%も含んでいることがわかる。シルト分(0.074 mm 以下)は、3～35%で残りが砂分となっている。六甲アイランドの埋立材は神戸の山中から採取した凝灰岩質の細粒土を多く含んでおり、粒度は図-3に示すような範囲の中に入っている。かなりの礫分が含まれているが、同様に細粒分も10～55%と多く含まれている。

これら2つの島の埋立材料について総括的に言えるのは、粒度配合が良好で、一般に締め固まりやすく、内部摩擦角も35°以上あって、静的には安定した材料であることである。したがって、動的にも、一般の均等な砂に比べて安定した材料で、液状化強度も大きく良質な材料と考えてよいであろう。

図-4に示したのはポートアイランド北部の代表的な地点の土質柱状図である。この地点でもマサ土の埋立が18m深さまでなされており、それ以深に軟弱な沖積粘土層が存在している。30～60mの深度に、 $N=10\sim50$ の砂礫と粘土質砂層の互層が存在しているが、ポートアイランドの中の

高層建物の杭基礎は、この層を支持層としている。

土の動的性質

図-2, 3に示すような、礫と砂とシルトが混合した土に対しての動的試験は今までほとんどなされてこなかった。しかし幸いにも、ポートアイランド北東部の港島の掘削現場から不攪乱試料を取り、地震以前に室内での繰り返し三軸試験を行ったデータが入手できた(永瀬他, 1995)。その結果の一部を示したのが図-5である。実験は、正規圧密された試料($OCR=1.0$)と、過圧密比が2および4になるように過圧密させた試料と、合わせて3つの場合について行われた。この土には粒径2mm以上の礫が35%程度含まれており、そのままの不攪乱状態で繰り返し非排水試験が行われた。一方、最大、最小間隙比を求める試験は、土質工学会の規準にのっとり2mm以上を除去したシルト質砂の部分に対して行った。それに呼応して、不攪乱試料の間隙比も、礫の部分を除いたシルト質砂の部分に対して求めた。このようにし

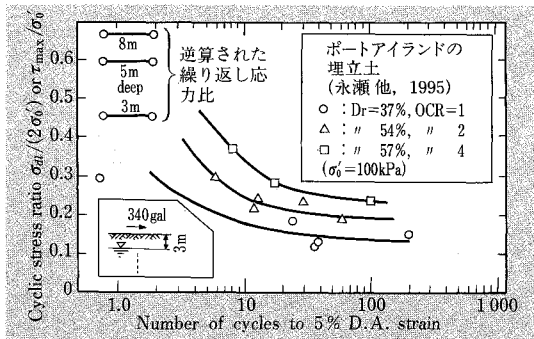


図-5 室内実験と逆解析で求めたマサ土の繰り返し強度 (永瀬他, 1995)

て求めた間隙比を用いて算定した相対密度 Dr の値が図中に示してある。この図から、繰り返し強度が過圧密比によって変わること、 $Dr=37\%$ の値の結果はきれいな砂に対する強度とほとんど変わらないことが知れる。また、過圧密比が少し増えても繰り返し回数が小さい時の強度がかなり大きくなることもわかる。

地震動と土の繰り返し強度

ポートアイランドの北西部の地点で神戸市が設置した鉛直アレーの地震計がうまく作動し、貴重な記録がとれている。その場所の土質柱状と速度検層の結果が図-4 に示してある。加速度計の設置深さもこの図に示してある。水平方向 2 成分の

記録を深さ方向に並べて示すと図-6 のようになる。東西成分に着目すると、83 m 深さの硬質地盤上の最大加速度が 290 gal で、それが 16 m 深さまで伝わって 543 gal に増幅されていることがわかる。しかし、その上のマサ土の埋立層を通過した後 275 gal に減幅されている。一方、南北成分を見ても 679 gal (深さ 83 m) が 544 gal (深さ 32 m) まで減幅し、さらに深さ 16 m と地表面で 340 gal に減幅していることがわかる。詳しい解析結果はさておき、これらを概観して指摘できることは以下のことであろう。

- ① 深さ 83 m から 32 m の間は、硬質地盤なので多少の増減はあるが、地震動の振幅は大体同じと見てよいであろう。
- ② 深さ 32 m から 16 m の区間は粘性土が存在するので、その非線型性と高い減衰特性により減幅しているようにも思えるが、東西方向の成分は必ずしもそうでない。
- ③ 深さ 16 m と地表面の間では減幅が著しい。これは、間隙水圧上昇による土の繰り返し軟化に起因しているように思える。

ところで、深さ 15 m 位までの地表面付近の土に加わったと想定される地震時の最大せん断応力 τ_{max} は、地表面の最大加速度 α_{max} を用いて近似的に次の式で算定できる。

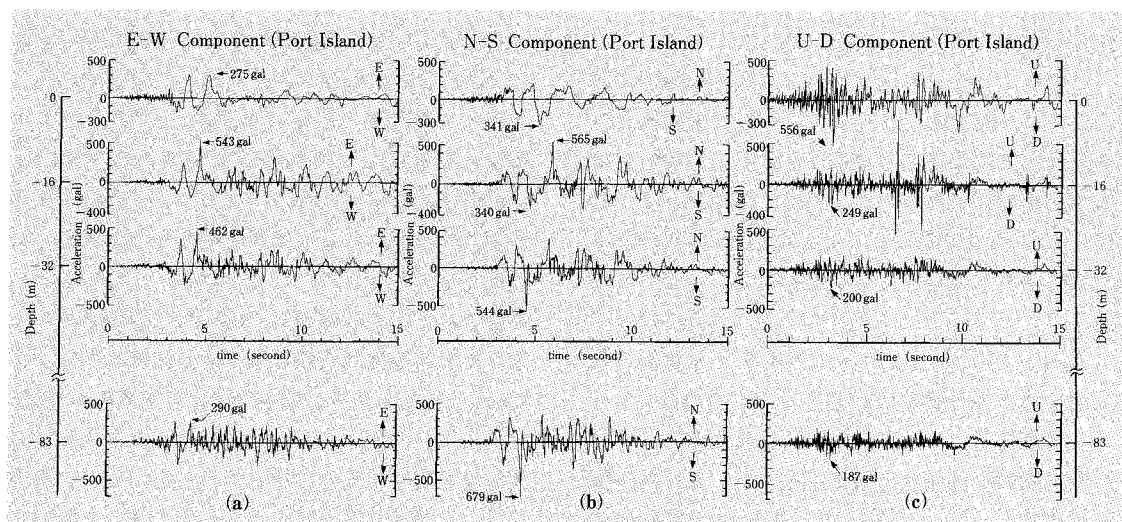


図-6 ポートアイランドの地震記録 (関西地震記録研究協議会提供)

$$\frac{\tau_{\max}}{\sigma'_v} = \frac{\alpha_{\max}}{g} (1 - 0.015z) \frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \dots\dots\dots (1)$$

この式で z はメートルで表した深さ、 σ_v と σ'_v は、それぞれ考えている深さの土に作用している鉛直全応力と鉛直有効応力を表す。地表から 3 m の深さに地下水があると仮定し、図-6 より読み取った $\alpha_{\max} = 341 \text{ gal}$ の値を (1) 式に代入して求めた最大せん断応力比の値が図-5 の縦軸に示してある。考えている深さが異なるとこの値が変わってくるので、深さ 3, 5, 8 m を選んで算定した値がプロットされている。さらに、液状化がこの地点で発生したとすると、図-6 の波形より 1 波か 2 波目で起こっていると考えられる。よって、横軸では繰り返し回数 1~2 回の所にデータがプロットしてある。

以上の逆算されたせん断応力比と、先に述べた不攪乱試料に対する室内実験の結果とを比較すると、両者の整合性は比較的よいと考えてよからう。ただし、0.4~0.5 の繰り返し応力比を用いた室内実験のデータが欠如しているのが惜まれる。

締固め効果について

ポートアイランドと六甲アイランドのいくつかの特別な場所でいろいろな地盤改良が行われていた。その多くは旧海底にあった沖積粘性土を対象とした圧密沈下対策であったが、期せずして、その上にある埋立土の液状化対策としても役立った。種々の改良工法の中で液状化対策工法として効果の少ないものから大きいものへと順番に並べてみたのが図-7 の横軸である。液状化の程度が低いと間隙水圧の上昇量も少ない。よって、水圧が消散してしまった後に残る地表面の沈下量も少なくなる。被災した 2 つの人工島の埋立土は、大体 15~20 m の同じような厚さを持っているので、すべてを同じ厚さを見なしてよからう。したがって、地表面の沈下量を液状化の程度、ひいては改良工法の効果の度合を表す目安として使えることになる。沈下がなかったと考えられる周辺の基礎杭などを不動点を選び、いろいろな改良工法が行われていた地点の沈下量を推定してその平均値を

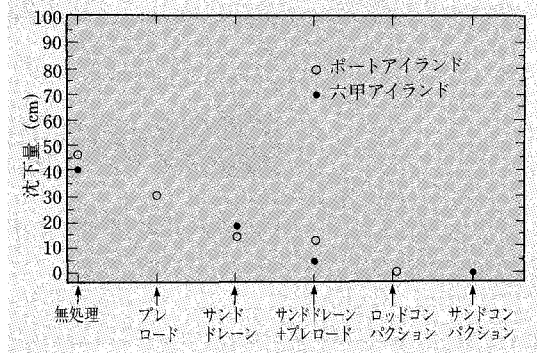


図-7 いろいろな方法で締固められた地盤の地震後沈下

示したのが図-7 の縦軸である。この図から以下のことがわかる。

- ① 無処理の地盤では 40~50 cm の沈下が平均的に生じている。これは、3~5% の圧縮ひずみに相当するが、この値は室内実験に照らし合わせて妥当な圧縮ひずみと考えられる。
- ② サンドコンパクションパイルとロッドコンパクション工法は効果的で沈下はゼロである。つまり液状化は発生していない。
- ③ 下部の粘土を対象にした圧密沈下防止工法であるサンドドレーンやプレロード工法も液状化軽減策としてある程度効果があった。サンドドレーン用のパイプを打設する時の振動によってある程度埋立土が締固められたと思われる。さらに、プレロード工法は、10 m 位の高さに一旦土を盛り上げて、しばらくして除去する工法であるから、この過圧密効果により液状化に対する土の抵抗力が増えたと考えられる。過圧密の有効性については図-6 に示した実験結果からも明らかである。

この他にも、大阪岸和田や淡路島津名の埋立地において動圧密工法によって地盤改良された場所があったが、被害はなかった。よって、動圧密工法によって処理された砂質地盤も液状化対策として有効であったと考えてよからう。

参考文献

永瀬英生, 宍道玲, 辻野修一, 木村耕三: 「過圧密履歴を受けた不攪乱砂の液状化強度」, 土質工学研究発表会報告集, 1995 年