

不飽和盛土地盤の沈下性状について

岐阜大学工学部	正会員	宇野尚雄	杉井俊夫
帝国建設コンサルタント(株)	〃	宮下高昭	
中国成都水利水電勘測設計院		胡宗躍	
オリエンタルコンクリート(株)		柴田雄二	

1. 概説

造成盛土地盤の自重による沈下を観察した結果が報告されている^{1)・2)}。それによると、十分な締め固め(平均締め固め度97.3%)にも拘わらず数cmの沈下が認められ、盛土内の観測井地下水位は暗渠排水施設の施工にも拘わらずかなり高く、全応力的に計算した沈下予測値が観測値に近い結果を示した。このことは不飽和土の応力をいかに考えるか、造成地盤内の地下水性状の解釈には工夫が必要ではないか、等の疑問点を惹起した。本報告はその後の継続した観測による沈下傾向と室内での盛土材の沈下性状に関する試験結果を考察したものである。

2. 造成地盤の概況

現場の地形概況を図-1に示す。造成地盤は東西約600m、南北約360mの長方形状をしていて、中央から北東部にかけて尾根があり、南東端も小高い部分で、これらは切土と、中央東寄りから南側にある谷部(南谷)と北側中央から南西側にかけての谷部(北谷)を盛土したものである。造成地の東側は元の山が数十m残っていて、北側はなだらかな丘陵地形をしている。2つの谷部の盛土に当たっては盲排水管網を施工し、周辺地山からの湧水・地下水を排水する計画としている。いずれの谷部でも盛土高さは最高20mに及び、南谷では東側の元地山からの地下湧水排除のため特に排水管を盛土中央高さにも配置して、2段にわたり排水した。造成地盤の土質としては、凝灰質砂岩および泥岩からなり、火山岩、中粒～細粒の砂、シルトで構成されていて、風化が進んでいるために固結度は低下していて、火山岩を多く混入しているため、間隙率も大きく、しかも間隙が水で満たされていて高含水状態になっている。

盛土の土質の特徴を列挙すると次のようである。

(1) 土の真比重は2.75ぐらいで、腐植物の混入は少ない。(2) 細粒分は日本統一土質分類によるとVII～CHであって、火山灰質粘性土または高塑性の粘土に相当する。(3) 湿潤密度は $1.5\sim 1.7\text{t/m}^3$ (平均値は 1.61t/m^3)で、自然含水比 $\omega_n=40\sim 70\%$ (主に $50\sim 60\%$)、飽和度は87%以上であって、高い。(4) 最適含水比は52.9～56.4%、最大乾燥密度は $1.06\sim 1.09\text{t/m}^3$ の土質であるが、盛土の相対密度は80%以上で、平均97.3%を示し、よく締め固められている。(5) 盛土地盤の圧密降伏応力は $0.8\sim 2.5\text{kgf/cm}^2$ 、平均 1.56kgf/cm^2 であって、比較的高い状態にある。

3. 造成盛土地盤の沈下

不飽和土の圧密沈下は不飽和土試料の圧密試験を実施して得られる $e\sim \log p$ (この場合、 p は載荷重)を用いて推論できよう。不飽和土の有効応力定義が究明されていないからである。しかし、圧密時の排水・排気条件は飽和土の排水条件に準じて圧密試験するのが先ず第一に考えられよう。この結果、不飽和土の圧密による時間曲線はどのようになるであろうか。図-2に示す3つのタイプがみられている。第一は砂質土のように載荷の瞬間に圧縮沈下が完了するもの、第二は粘性土の圧密沈下のようにゆっくりと進行するもの、第三は粘土の2次圧密のように時間の対数に比例した沈下をするものである。これらの時間曲線はいずれもスムーズなものでなく、断続的に進行するのが不飽和土の特徴である。これに対して標準圧密と同様に24時間後の沈下量を載荷重と関係づけて上記の $e\sim \log p$ を求めると図-3のように飽和土と類似した関係が得られ

Settlement Behavior of Reclaimed Ground : T. Uno, T. Sugii (Gifu Univ.), T. Miyashita (Teikoku Const.), Zhong-Yue HU (China) and Y. Shibata (Oriental Concrete Co.)

る。Jenningsら(1962)が既に指摘しているように、不飽和土の場合、飽和土の $e \sim \log p$ 関係と交差する関係が得られ、みかけ上の先行荷重は飽和土のそれより大きいのが通例で、これが不飽和土のサクシオン効果ではないかと考えられている。これに対して都 淳一氏の提案した盛土の沈下推定式は

$$\Delta H = \frac{C_c}{1 + e_0} H \cdot S, \quad S = -\log_{10} \lambda - M(1 - \lambda), \quad \lambda = \frac{\sigma_i}{\gamma H}, \quad M = 0.4343 \quad (1)$$

ここに、 ΔH :盛土自重による沈下量(cm), H :盛土初期高さ(cm), C_c :盛土材の圧縮指数, e_0 :盛土材の初期間隙比, σ_i : e_0 に対応する初期応力(先行荷重に近似), γH :盛土の土被り圧
で与えられていて、沈下量は $\lambda \leq 1$ の層が $\Delta H \geq 0$ となり、 $\lambda > 1$ のときの $\Delta H < 0$ でリバウンドすることになるけれども、その際には除荷過程の C_c の値を使用する必要がある。

表-1は図-1に示す造成盛土地盤の沈下量予測値と観測値(予測は60年11月時点で、その際の調査・試験資料に基づいている。観測値はそれ以降62年9月までの662日間の沈下量)を対比して示している。式(1)による予測は比較的良好な結果を示している。しかし、式(1)による計算に当たって土被り圧 γH は有効応力でなく全応力を採用していることに留意せねばならない。不飽和土の有効応力は不明であるが、有効土被り圧は従来から、地下水位以下では水中重量に基づいて計算されるので、そのようにして計算すると表-1に示した全地点で $\lambda > 1$ となり、沈下が生じない結果となるのである。土被り圧 γH を全応力的に計算した理論的根拠は、①この地盤では凝灰質砂岩および泥岩を基質として風化が進んでいて、間隙率も大きく、高含水状態であるが、透水係数が小さく(約 10^{-6} cm/s)、間隙水の連続性が悪いと推定されること、②造成盛土施工時に”ぬかるみ”が激しく、かなりの部分で石灰や良質土を添加して締め固められていて、地盤が不整になっていると考えられること、の2点である。前者は当地点での造成盛土土質の特性であり、後者は当地点固有の施工条件の特性である。このような地盤では土中水の状態が”宙水”のようになって、地層中の地下水が不連続となり、観測井地下水位がかなり高くなる(当該地盤では盛土の最高高さ約20mの中位に観測されている)ことはあっても、盛土土中の応力は全応力的に考えた方がよいのではないかと考えられる訳である。従来から人工地盤内の地下水挙動は自然堆積地盤の場合に比べて不整な場合が多く、こうした造成盛土地盤内の土中水、地下水の性状は把握し難いので、特別の配慮が観測方法の工夫に必要であると考えられる。上述した造成地盤では、元地盤表面近くに排水暗渠を配置し、盛土内の排水を促進している。

これに対して、昭和62年9月9日以降の継続観測結果も含めて、沈下量の経時変化を図-4に示した。同図は昭和61年4月19日以降の沈下であるが、1年半後には止まると思われた沈下がその後も続いて、平成元年2月8日に至るも、停止する徴候が認められず、沈下は長期に渡る様相を示している。地下水位も観測を継続しているが、当初(S62.9.9)予想した通りの”あまり変化せず”の状況であって、±1mの変動幅にあり、地下水位が低下したために沈下が継続しているとはいえない状況にある。このため次項では、室内試験で盛土材の沈下特性を調べた結果を述べる。

4. 盛土材の沈下特性(室内試験の結果)

盛土材の全試料に対する粒度は図-5のようである。室内試験では、次述する大モールドには2mm以下、標準圧密試験では0.85mm以下の細粒分を用いている。

径15cm、高さ25cmの大モールドに突き固めた試料を2種類作成した。試料Aは $\gamma_t = 1.63 \text{gf/cm}^3$, $w_i = 40.7\%$, $e_0 = 1.547$, $\gamma_d = 1.166 \text{gf/cm}^3$ であり、試料Bは $\gamma_t = 1.700 \text{gf/cm}^3$, $w_i = 38.6\%$, $e_0 = 1.328$, $\gamma_d = 1.227 \text{gf/cm}^3$ である。試料Aには 0.129Kgf/cm^2 の載荷重、試料Bには 1.361Kgf/cm^2 の載荷重を加え、Aは資料底面の高さに水面を保持させ、Bは大気に解放し、いずれも資料の乾燥を防ぐためにビニールシートを被せて、高温室内にて長期沈下を観測した。図-6が沈下量と時間の対数との関数である。試料Aでは約3000時間=約125日の付近で、試料Bでは約600時間=約25日の付近で、いずれも急激に初期の沈下より増加している。試料高さ250mmに対するものであるから、1%前後の歪である。図-4に示した現地の沈下は昭和60年6月に盛土完了後、11月から観測を始めたうち次年の4月以降の部分を示しているので、図-6の後半の急激な沈下部

分に相当する可能性がある。いずれにせよ、沈下が時間の対数に比例する関係を呈していることが注目される（図-2(c)に対応）。一方、図-6の屈折は原因不明であって、①長期間のため試料の乾燥収縮が生じている懸念、②風化し易い土質であるため粒子破砕が進行している懸念、などが考えられる。すなわち、Aは荷重が小さく、底面を水浸させているため屈折点までの時間がBより長くなっているとも考えられる。しかし、いずれ沈下が減少して、停止する方向に向かうと考えられるのは、図-4の現地の沈下をみる眼と同じであって、これを確認するまでは試料内部の状態も正確に把握できない状況である。

さて、標準圧密容器による試験は別に表-2のケースについて実施して、表-3の定数が得られ、いわゆる水浸によるコラプス（構造崩壊）について検討した結果は図-7のようであって、コラプスの発生は $e \sim \log p$ の直線関係より右上側の緩い状態のときであることが判明した。上記のモールド実験における試料はいずれもコラプスの発生しない密な状態に相当していることがわかる。

5. あとがき

不飽和盛土の沈下に関して、現地の沈下性状と室内モールド試験の沈下性状とが、時間の対数に比例する傾向は同じであるものの、室内試験では1~4ヶ月後に急に沈下が増大する性質を観察したことを報告した。これらの原因究明にはモールド実験の沈下が停止後まで要すると思われる。

6. 参考文献

- 1) 宇野尚雄・宮下高昭：造成盛土地盤の沈下性状、土質工学会『不飽和土の工学的性質研究の現状』シンポジウム発表論文集、pp.327~334、1987.
- 2) 宇野尚雄・杉井俊夫・宮下高昭・胡 宗躍：不飽和盛土地盤の沈下量推定法の考察、土木学会第43回年講、pp.372~373、1988.

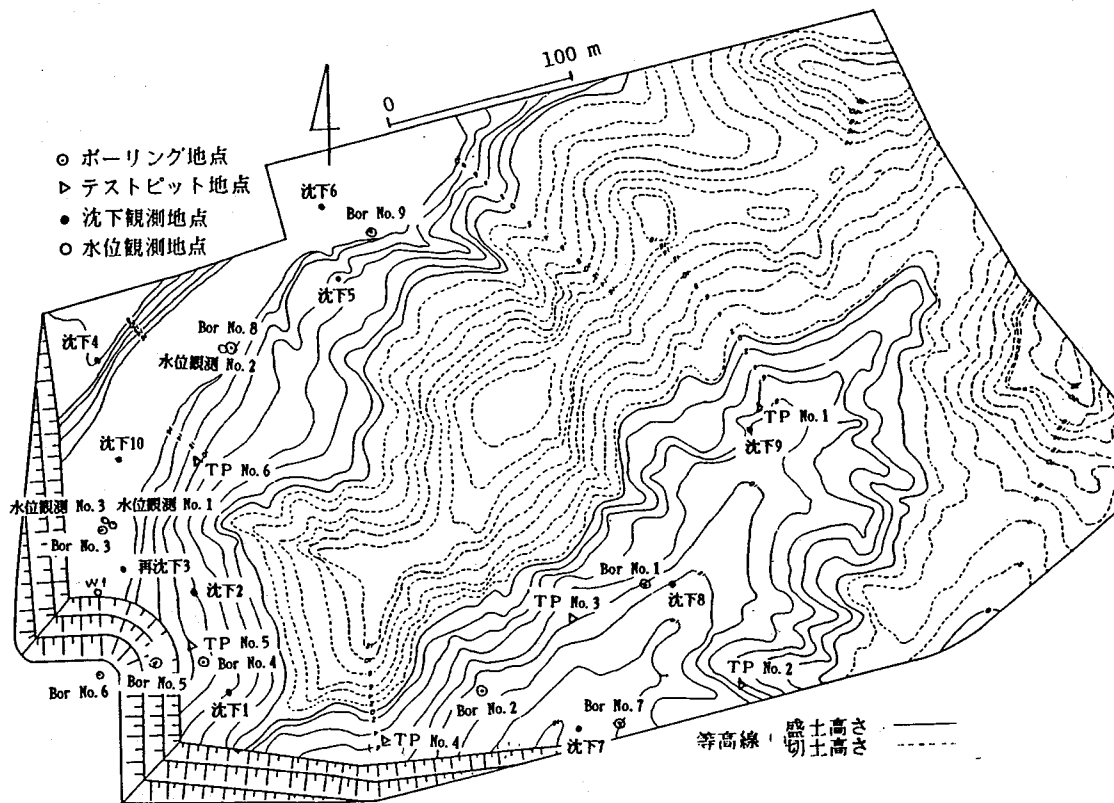


図-1 造成地盤平面と各測点

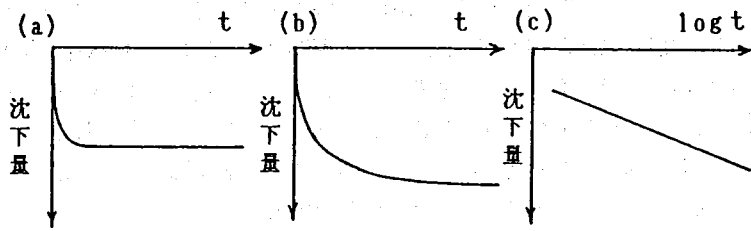


図-2 不飽和土の圧密沈下性状・3種類

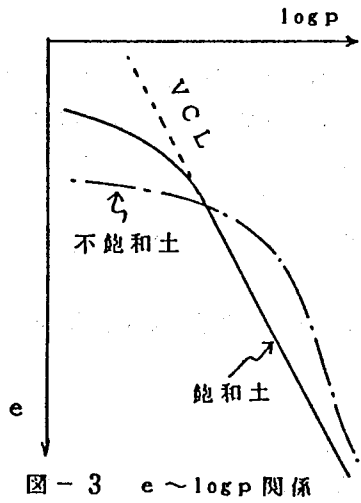


図-3 e ~ log p 関係

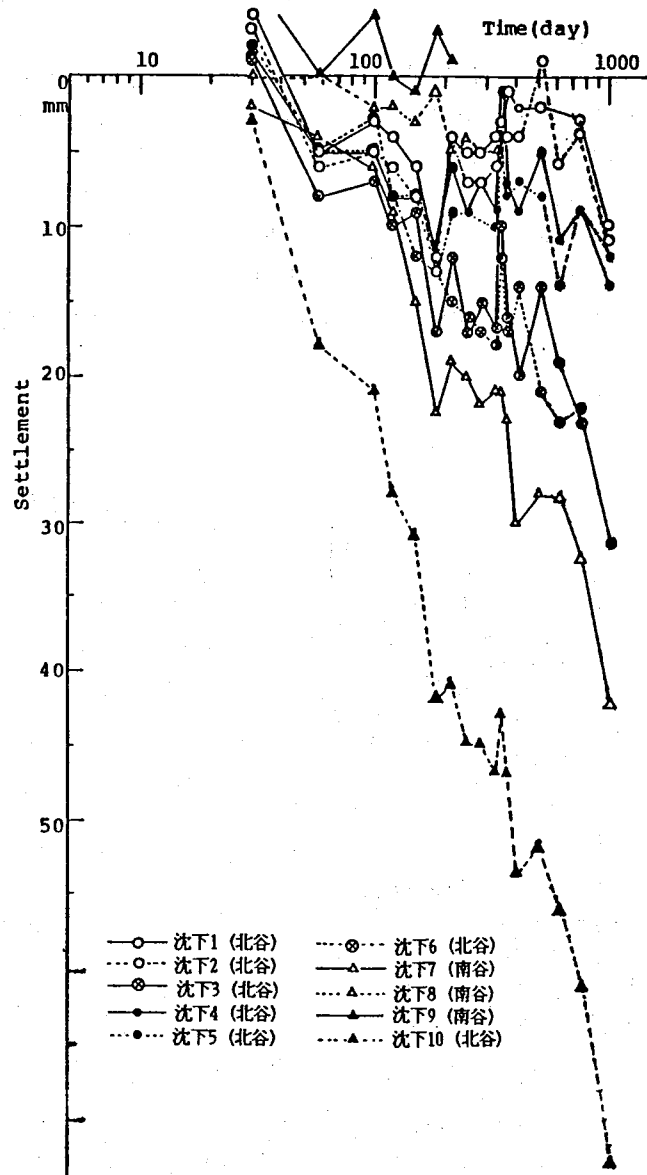


図-4 造成地盤の沈下量の経時変化
(昭和61年度4月19日以降)

表-1 沈下量(mm)の予測値と観測値の対比

ホーリング No.	予測値 x	沈下量 測点No.	観測値 y	$\frac{y}{x} \times 100(\%)$
1	52	8	8	15
2	21	(8)	(8)	(38)
3	66	10	54	82
4	29	2	15	52
7	57	7	40	70
8	12	4	15	125
9	49	6	40	82

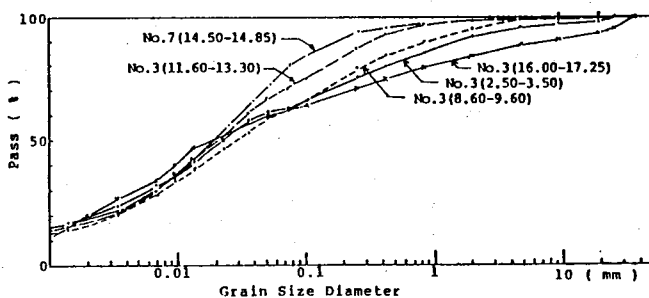


図-5 粒度曲線

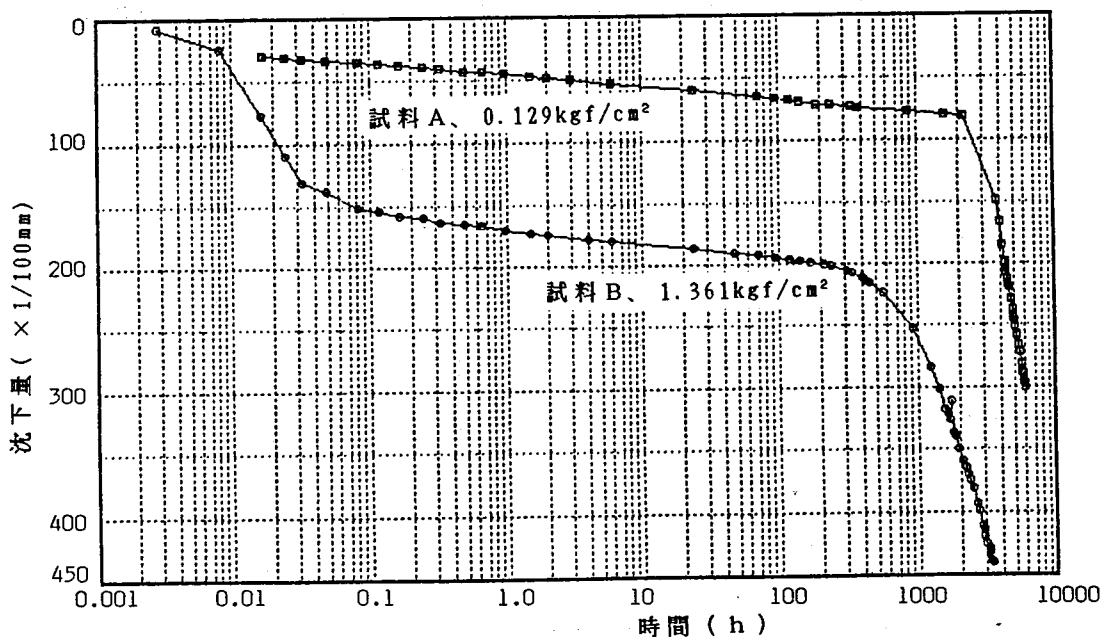


図-6 モールド試験における沈下量の経時変化

表-2 実験ケース

実験番号	水浸or 非水浸	初期含水比 (%)	測定日数 (日)	載荷段階 除荷過程
A ₁₁₋₁	非水浸	40	11	0.1-0.2-0.4-0.8-1.6-3.2-6.4-12.8- 3.2-0.8-0.2 (kgf/cm ²)
A ₂₁₋₁	水浸	40	12	
A ₁₁₋₃	非水浸	40	33	
A ₂₁₋₃	水浸	40	34	
A ₁₂₋₁	非水浸	40	10	0.1-0.2-0.4-0.8-1.6-3.2-6.4- 3.2-0.8-0.2 (kgf/cm ²)
A ₂₂₋₁	水浸	40	11	
A ₁₃₋₁	非水浸	40	9	0.1-0.2-0.4-0.8-1.6-3.2- 1.6-0.8-0.2 (kgf/cm ²)
A ₂₃₋₁	水浸	40	10	
A _{32-W₁}		15~50	8	0.1-0.2-0.4-0.8-1.6-3.2-6.4 -水浸 (kgf/cm ²)
A _{34-W₁}		15~50	6	0.1-0.2-0.4-0.8-1.6-3.2 (kgf/cm ²) -水浸
A _{35-W₁}		15~50	5	0.1-0.2-0.4-0.8 (kgf/cm ²) -水浸
A _{38-W₁}		15~50	2	0.1 (kgf/cm ²) -水浸

(註) W₁=15%, W₂=25%, W₃=40%, W₄=50%

表-3 みかけの先行荷重と圧縮指数

	A ₁₁₋₁	A ₁₂₋₁	A ₁₃₋₁	A ₁₁₋₃	A ₂₁₋₁	A ₂₂₋₁	A ₂₃₋₁	A ₂₁₋₃
P _c (kgf/cm ²)	4.1	2.0	1.6	4.0	0.94	2.2	1.6	2.6
C _c	0.634	0.382	0.246	0.482	0.442	0.429	0.209	0.445

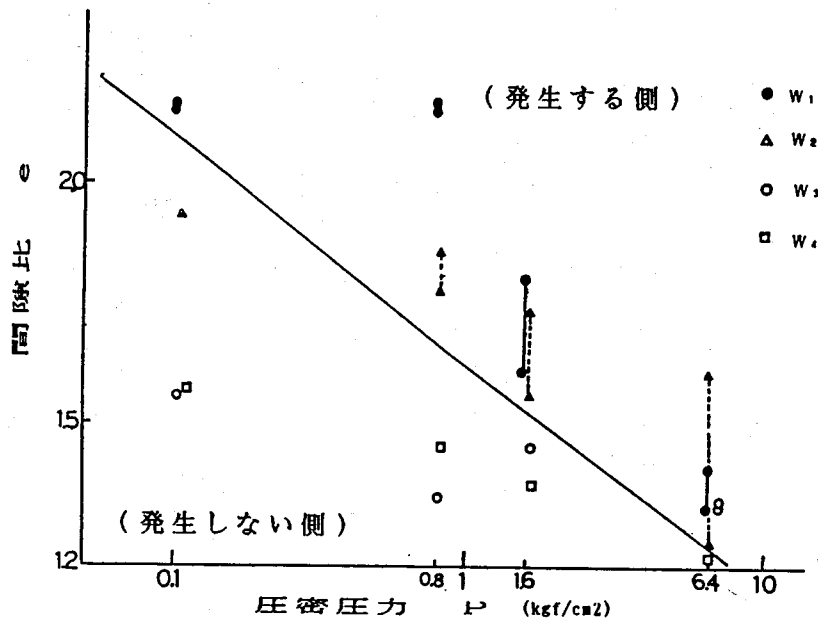


図-7 e ~ log p 関係におけるコラース発生条件