

堆積軟岩を使用した高盛土の調査・設計および施工

(株) アイコ ○大山英治 中村吉男
 愛知工業大学 土木工学科 大根義男 成田国朝

まえがき

近年、宅地造成やフィルダムの構築材料として堆積軟岩(以下軟岩と言う)を使用する機会が多くなっている。軟岩の風化やスレーキング現象は、応力の解放や温度変化による乾湿繰り返し等の環境変化に伴う劣化現象として知られている。¹⁾ 例えば、軟岩を使用した盛土において、スレーキング劣化が要因と思われる沈下やすべり破壊がしばしば経験される。^{2), 3)}

本報告は、乾湿繰り返しによるスレーキング試験で容易に細片化する軟岩でも、拘束状態や適当な密度まで締め固めることによりスレーキングや風化による劣化を抑制し得ることを実験的に確認するとともに、実験結果を取り入れた安定解析を行って盛土断面(ゾーニング)を決定し、現場試験により盛土仕様を確定した高盛土の設計・施工例について紹介するものである。

1. 概要

岐阜県瑞浪市土岐町地内で施工中の宅地造成工事(開発面積36ha)は、平成5年5月に着手し、約1,050千㎡の盛土工事を完了した。本工事の土工量は1,520千㎡であり、そのうち約70%の1,070千㎡は新第三紀中新世に属する瑞浪層群の砂質シルト岩およびシルト質砂岩である(図-1、表-1)。

表-1 地質層序表

| 時代 | 柱状図 | 地質名 | 記 事 |
|------|-----|-------|-----------------------------------|
| 漸新世 | | 土砂層 | 礫、砂および粘土よりなる。 |
| | | 沖積層 | 礫混じりシルト～シルト。 (狭河群・池田原堆積物) |
| 中新世 | | 高層堆積物 | 礫混じりシルト、粘土質砂礫よりなる。 |
| | | 段丘堆積物 | 礫混じりシルト～シルト質砂礫、シルト層よりなる。 |
| 新第三紀 | | 土岐砂礫層 | 主に粘土質砂礫からなる。調査地域(瀬戸層群) 赤瀬山頂付近に分布。 |
| 中生代 | | 瑞浪層群 | 主に砂質シルト岩、シルト質砂岩からなる層の連続を形成する。 |
| 白堊紀 | | 土岐花崗岩 | 粗粒のものが多い。瑞浪層群との境界面はかなりの凸凹あり。 |

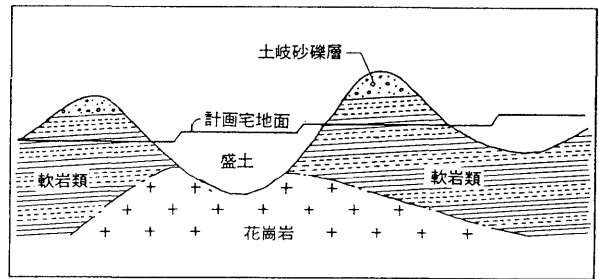


図-1 地質概要図

2. 軟岩に対する材料試験および結果

2.1 軟岩の工学的性質

2.1.1 試料および試験項目

試料は採取地においてピックハンマーによって採取した材料を使用し、岩塊に対して、①比重・吸水量試験(JIS A 1110)、②スレーキング試験(GHS 111-1992)、③X線回折(粉末法)、④一軸圧縮強度試験(KDK S 0502)を実施した。

2.1.2 試験結果

(1) 吸水量と圧縮強度の関係

図-2は菊地が整理した資料⁴⁾であるが、本地区の材料は○印で示されるように、比較的吸水量が高く、第三紀堆積岩の特性を示す。

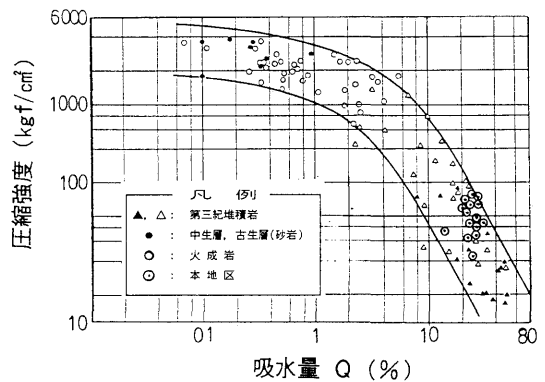


図-2 吸水量と一軸圧縮強度の関係

(2) モンモリロナイトの含有量

スレーキングを誘発するモンモリロナイトは、図-3に示すとおりX線回折の結果では、本地区において15~20%、近傍類似地区においては20~25%であった。

(3) スレーキング特性

図-4は乾湿繰り返し回数(サイクル)と吸水量の変化を示したものであり、いずれの粒径においても5サイクルまでの吸水量の増加が顕著である。

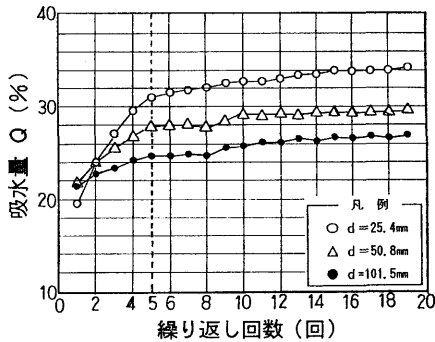


図-4 乾湿繰り返し回数と吸水量の変化

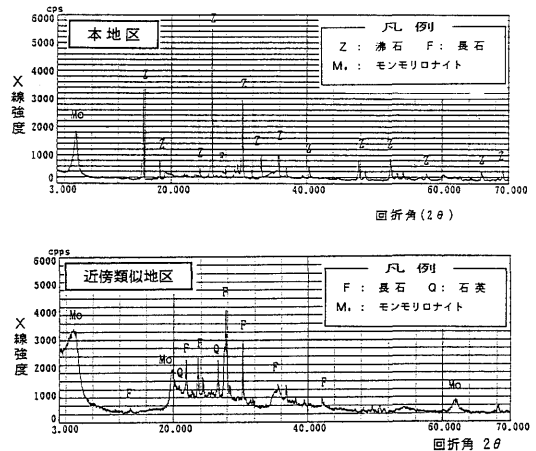


図-3 X線回折チャート

2.2 締固め土の工学的性質

2.2.1 試料および試験項目

試料は採取地においてピックハンマーによって採取した材料を使用し、採取時の材料については物理試験を実施し、締固め試験および乾湿繰り返しに伴う強度低下試験(風化試験)については、所要の粒度に調整したものを試料とした。

2.2.2 試験結果

(1) 物理特性

採取試料の物理特性は、表-2、表-3に示したとおり、土質名は統一分類によるGCである。

(2) 締固め特性

現場含水比状態の材料をタルボット指数n=0.4, 0.5, 0.6の3種類に粒度調整した試料(図-5)についてランマーによる締固め(動的締固め)と加圧盤による締固め(静的締固め)の2ケースについて実施した(モールド径φ=15cm, H=30cm, Dmax=25.4mm)。なお、タルボット指数nは下式により定義した。

$$P = (d/D)^n \times 100(\%) \dots\dots\dots (1)$$

P : 加積通過率 (%)

d : 任意の粒径 (mm)

D : 最大粒径 (mm)

n : 粒度組成を表す指数 (タルボット指数)

表-2 軟岩材料の粒度組成

| 区分 | 最大粒径 Dmax (%) | 濼分 (%) | 砂分 (%) | シルト分 (%) | 粘土分 (%) | 均等係数 Uc | 曲率係数 Uc' | 形状指数 n |
|--------|---------------|--------|--------|----------|---------|---------|----------|--------|
| 本地区 | 200.0 | 84.7 | 7.3 | 6.0 | 2.0 | 417 | 47.8 | 0.58 |
| 近傍類似地区 | 300.0 | 77.1 | 16.9 | 4.6 | 1.4 | 300 | 10.1 | 0.65 |

表-3 軟岩材料のコンシステンシー

| 区分 | 自然含水比 ω (%) | 液性限界 ωL (%) | 塑性限界 ωP (%) | 塑性指数 ωP (%) | 備考 |
|--------|-------------|-------------|-------------|-------------|----------|
| 本地区 | 24.8 | 84.5 | 18.6 | 45.9 | Gs=2.580 |
| 近傍類似地区 | 38.8 | 78.5 | 29.7 | 48.8 | Gs=2.627 |

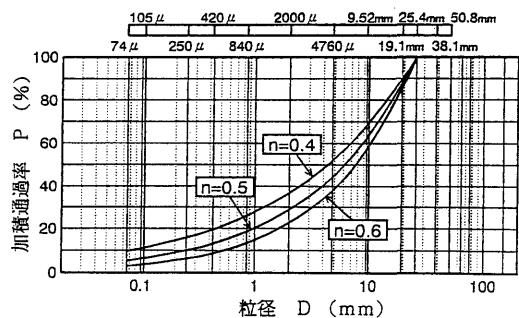


図-5 締固め試料の粒度組成

また、縮固めエネルギーは、式(2)、(3)、縮固め度E値は式(4)により定義した。

・動的突固め試験

$$E_c = \frac{W_R \cdot H \cdot N_B \cdot N_L}{V} \dots\dots\dots (2)$$

- E_c : 動的縮固めエネルギー
- W_R : ランマーの質量
- H : ランマーの落下高さ
- N_B : 各層の突固め回数
- N_L : モールドに填充する層数
- V : モールドの容積

・静的縮固め試験

$$E_s = \frac{p \cdot \delta \cdot N_L}{V} \dots\dots\dots (3)$$

- E_s : 静的縮固めエネルギー
- p : 圧縮力
- δ : 圧縮量
- N_L : モールドに填充する層数
- V : モールドの容積

・E値 = $(\rho_{df} / \rho_t) \times 100(\%)$ (4)

- ρ_{df} : 縮固め状態の乾燥密度
- ρ_t : 岩塊自体の乾燥密度(絶乾比重)

図-6に示したとおり、動的、静的いずれも縮固めエネルギーが200~250%($E_c = 5.625 \text{ kgf} \cdot \text{cm} / \text{cm}^2$ を縮固めエネルギー100%とした場合)を超えると縮固め効率(縮固めエネルギーの増加に対する乾燥密度の増加率)は低下する。また、250%程度の縮固めエネルギーを与えれば90%程度のE値が得られることがわかった。

(3) 乾湿繰り返しに伴う強度低下試験(風化試験)

風化試験は表-4に示す物性値の材料について、所定の粒度組成に調整した試料をモールド内で所定の密度になるよう締め固めた供試体に所定の拘束圧力を作用させ、硫酸ナトリウム溶液の中へセットした後、図-7に示す手順により実施した。試験は図-8に示したとおり、モールド内を硫酸ナトリウム溶液が浸透、脱水でき、拘束圧力は上面に加圧スプリングを設置し荷重計により圧力をコントロールできる装置のものを使用した。試験中は各サイクル時において加圧時の沈下量を測定した。乾湿を5回繰り返した後、供試体を取り出し、三軸圧縮試験用カプセルにセットし2.0kgf/cm²のバックプレッシャーをかけ、有効拘束圧力 $\sigma'_3 = 1.0, 2.0, 3.0 \text{ kgf} / \text{cm}^2$ で24時間等方圧密した後、ひずみ制御(軸ひずみ速度0.25%/min)により三軸圧縮試験を実施した。

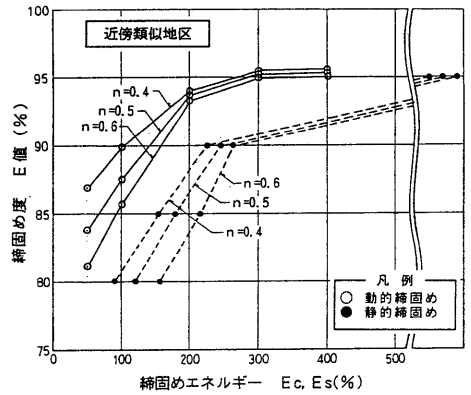
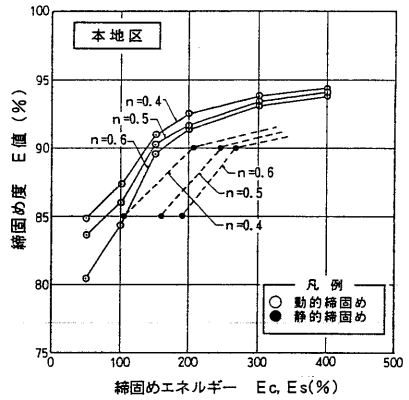


図-6 縮固めエネルギーと縮固め度の関係

表-4 風化試験試料の物性値

| | | |
|-------------------|--------|---------------------|
| 液性限界 W_L | 78.5 | % |
| 塑性限界 W_p | 29.7 | % |
| 塑性指数 I_p | 48.8 | % |
| 土粒子の密度 ρ_s | 2.627 | g/cm ³ |
| 自然含水比 W_n | 38.6 | % |
| 礫粒子の乾燥密度 ρ_t | 1.338 | g/cm ³ |
| 吸水率 Q | 37.0 | % |
| 一軸圧縮強さ q_n | 86~201 | kgf/cm ² |

表-5 風化試験条件

| 項目 | 条件数 | 条件 |
|-----------------|-------|--|
| 粒度組成 (カク分指数) | 3 ケース | $n = 0.4, 0.5, 0.6$ |
| 縮固め度 (E 値) | 2 ケース | E 値85% ($\rho_{df} = 1.137 \text{ t/m}^3$) E 値90% ($\rho_{df} = 1.204 \text{ t/m}^3$) |
| 拘束圧力 (鉛直圧力) | 2 ケース | $p_v = 0.5, 1.0 \text{ kgf} / \text{cm}^2$ |

(注) 供試体数は各ケース3供試体とし36供試体とした。

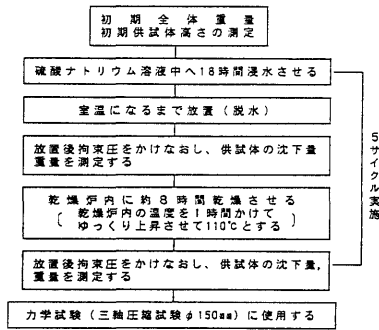


図-7 風化試験の手順

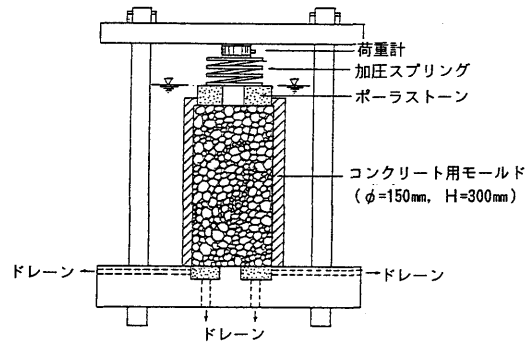


図-8 風化試験の装置

図-9は風化試験中の供試体の沈下・膨張の変化を示したものであり、いずれの試料も初期の乾燥過程で急激な沈下が見られる。その後の乾湿繰り返しに伴う沈下・膨張と拘束圧力、粒度組成、締固め度の間には次の相関が認められる。① $p_v=1.0 \text{ kgf/cm}^2$ (○, ●印)では膨張が抑制され、沈下の変動が小さい。② $p_v=0.5 \text{ kgf/cm}^2$ (□, ■印)の試料で示されるように、膨張量はタルボット指数 n の増加に伴い大きくなる。③E値85%に締固めた試料はE値90%に締固めた試料に比較し膨張・沈下の変動が大きく、乾湿の影響を受け易い。膨張量が大きい $n=0.5, 0.6$, E値=85%, $p_v=0.5 \text{ kgf/cm}^2$ の試料(□印)は細粒化が他の試料と比較して著しく、強度低下も大きいことから、膨張を制御することが劣化防止につながるものと判断される。

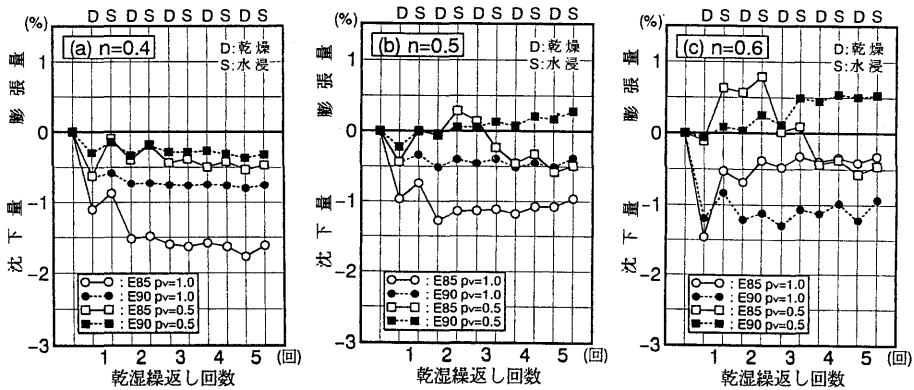


図-9 風化試験時の膨張および沈下

図-10はタルボット指数 n と強度比 R (風化試験前後における破壊時の軸差応力の比)の関係を示したものであり、細粒分が多く締固め密度が高い試料ほど、また風化試験時の拘束荷重が大きいほど強度低下が小さくなっている。図において $n=0.4, 0.5$ の一部の試料で風化試験後の強度が風化試験前の強度を上回っているが、これは風化試験中の粒子破碎に伴う密実化に起因するものと推察される。また、岩塊の比重・吸水試験によれば、強度低下が小さい試料($R \geq 70\%$)の岩塊の吸水量はインタクトな岩塊の吸水量と大差なく、岩塊自体のスレーキングはそれほど進行していないものと考えられる。

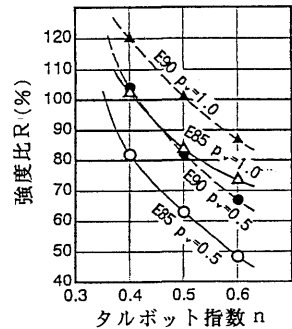


図-10

タルボット指数と強度比 R の関係

図-11は、図-10の関係から、 $R=80, 90, 100\%$ となる n を読み取り、拘束圧力 P_v との関係として整理したものであり、現場で発生する材料の粒度組成(n)と所要の締固め度(E 値)から推定した強度低下率を確保するための拘束圧力すなわち覆土の厚さを定めることが出来ることを示している。

3. 設計 (盛土断面の決定)

設計における盛土断面、特に発生材料によるゾーニングは盛土斜面の長期安定にとって重要である。

一般に本地区のような大規模宅地開発等の造成工事においては開発区域内で切盛のバランスをはかることを原則としており、掘削材料の大部分を開発区域内で処理(盛土)することになる。

本地区における掘削土量の内訳は表-6に示したとおりであり、各材料の工学的特性と土量を考慮し盛土標準断面を設定した(表-7、図-12)。

図-11によれば、風化作用により強度低下を起こさないための拘束圧力は、 $R=100\%$ として E 値 $\geq 90\%$ 、 $n=0.5$ の場合、 $p_v=0.95\text{kgf/cm}^2$ が必要であり、約5mの覆土が必要となる。しかし、本地区においては覆土として使用できる段丘堆積層および土岐砂礫層は土量的に厚さ2.5m程度が限度であり、ある程度の軟岩盛土の強度低下を考慮した断面設定が必要となった。

断面設定においては、斜面勾配、盛土の強度が主たる要素になるが、斜面勾配については開発基準による斜面勾配(盛土の場合1:1.80)とした。

盛土の強度は図-11で示されるように粒度組成(タルボット指数)、締固め度(E 値)および風化作用による強度低下等によって異なるので、各要素の組合せによって数多くの断面が考えられるが、本地区の軟岩($q_u=50\sim 120\text{kgf/cm}^2$)のようにリッピングによって採取する材料の場合は採取粒度をある程度予測することができる。

本設計においては、近傍類似地区の実績を考慮しタルボット指数 $n=0.6$ 以下と想定した。

締固め度は、締固め試験結果より E 値85%および90%を考慮した。

強度は、図-11による強度低下を考慮し風化後の三軸圧縮試験値より表-8とした。

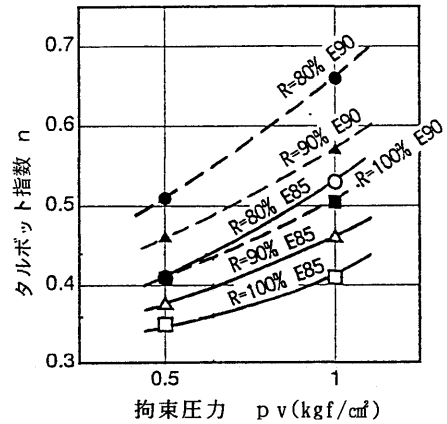


図-11 タルボット指数と拘束荷重の関係

表-6 掘削土量内訳

| 地層名 | 掘削土量 (m³) |
|------------|-----------|
| 段丘堆積物 | 62,000 |
| 土岐砂礫層 | 177,000 |
| 軟岩類 (瑞浪層群) | 1,068,000 |
| 花崗岩 | 213,000 |
| 合計 | 1,520,000 |

表-7 ゾーン区分と材料

| ゾーン名 | 材料 | 摘要 |
|------|----------------|-----------------|
| ゾーン1 | 段丘堆積層 土岐砂礫層 | 植生土 拘束荷重 |
| ゾーン2 | 軟岩類 | |
| ゾーン3 | 花崗岩 | 法先崩壊防止 排水ゾーン |

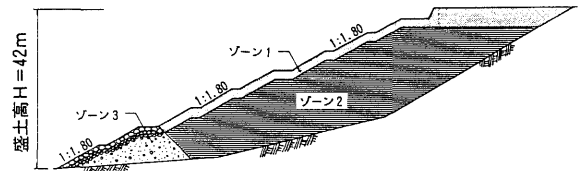


図-12 盛土標準断面図

表-8 設計数値一覧表

| ゾーン名 | 材料 | 粒度 n | 拘束圧力 P_v (t/m^2) | 締固め度 | 単位重量 ρ (t/m^3) | 粘着力 (t/m^2) | 粘断抵抗角 ($^\circ$) | 摘要 |
|------|----------------|-----------|-------------------------------------|-------|--------------------------------------|---------------------------|-----------------------|-------|
| ゾーン1 | 段丘堆積層 土岐砂礫層 | - | - | D値95% | 1.99 | 3 | 2.2 | |
| ゾーン2 | 軟岩 | 0.6 | 5~10 | E値85% | 1.60 | 2 | 1.0 | 強度低下有 |
| | | | | E値90% | 1.70 | 4 | 1.8 | 有 |
| | | | | E値85% | 1.60 | 3 | 1.3 | 有 |
| | | | | E値90% | 1.70 | 5 | 2.3 | 有 |
| | | | | E値85% | 1.60 | 4 | 1.7 | 有 |
| | | | | E値90% | 1.70 | 6 | 2.6 | 無 |
| ゾーン2 | 軟岩 | 0.6 | 16~22 | E値85% | 1.60 | 4 | 1.7 | 有 |
| | | | | E値90% | 1.70 | 6 | 2.6 | 無 |
| ゾーン2 | 軟岩 | 0.6 | 22~ | E値85% | 1.60 | 5 | 2.3 | 無 |
| | | | | E値90% | 1.70 | 6 | 2.6 | 無 |
| ゾーン3 | 花崗岩 | - | - | - | 2.00 | - | 3.5 | |

図-13に示した安定計算断面図により、ゾーン2の条件を組合せて、常時および地震時(Kh=0.12)について簡便分割法を用いて安定計算を実施した結果、図-14に示した条件で許容安全率(常時Fs≥1.50, 地震時Fs≥1.20)を満足することが判明した。

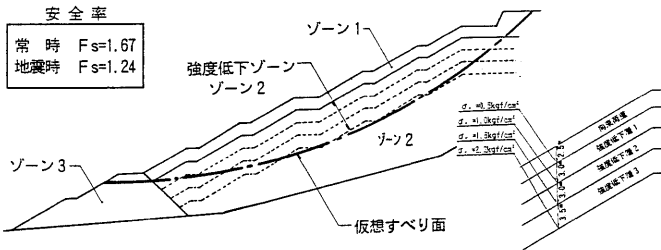


図-13 安定計算断面図

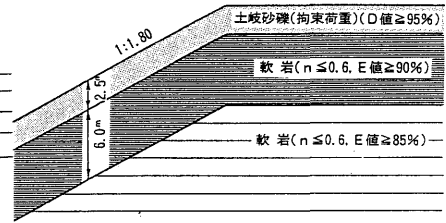


図-14 ゾーン2の施工条件

4. 施工

上記の設計条件を満足するには材料採取時の粒度組成が重要である。ショベルやリッピングによる採取実験(予備実験)の結果、リッピングが最も効果的であることが判明した。このため、①リッピングによる採取粒度($n=0.6$ 以下)、②所要の締固め度(E値85%, および90%)を満足するための転圧仕様を確認するために現場試験を実施した。

4.1 軟岩材料の採取方法の確立試験

(1) 試験仕様

- ・使用機種 …… 32ton級ブルドーザー
(リッパ掛けおよび圧砕)
- ・爪の本数 …… 2本, 3本(2ケース)
- ・爪の根入れ深さ …… 30cm, 50cm(2ケース)
- ・リッピング方法 …… 格子掛け

(2) 土質試験

土質試験結果は表-9に示した各ケースについて現場フルイ試験を実施し、リッピングにより採取された材料のタルボット指数を計算した。

(3) 試験結果

各ケースについて採取した材料に対する土質試験結果は、図-15、表-10、表-11に示したとおり、所要のタルボット指数 $n \leq 0.6$ を満足する採取方法はCase 1-1, 2-1, 2-2であるが、掘削量の増大に伴い、 n 値が増加することが予想されること、経済的にCase 2-2が安価であることを考慮し「3本爪50cm根入れ」を施工仕様とした。

表-9 リッピング仕様

| | |
|----------|---|
| Case 1-1 | 2本爪格子掛け2回+D9ブルドーザによる圧砕(2回走行) (リッパの根入れ30cm) |
| Case 1-2 | 2本爪格子掛け2回+D9ブルドーザによる圧砕(2回走行) (リッパの根入れ50cm) |
| Case 2-1 | 3本爪格子掛け1回+D9ブルドーザによる圧砕(2回走行) (リッパの根入れ30cm) |
| Case 2-2 | 3本爪格子掛け1回+D9ブルドーザによる圧砕(2回走行) (リッパの根入れ50cm) |



写真-1 リッピング状況

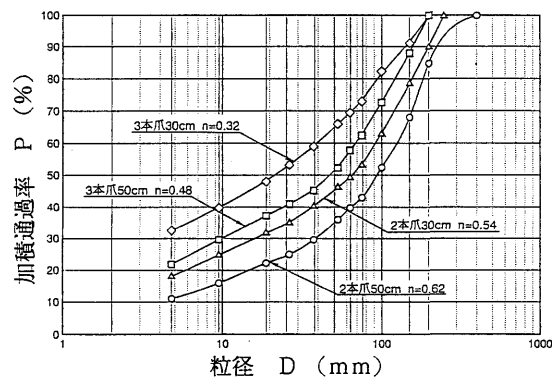


図-15 リッピングによる採取粒度

表-10
採取粒度のタルボット指数

| 区 分 | タルボット指数 |
|-----|------------|
| 2本爪 | 30cm深 0.54 |
| | 50cm深 0.62 |
| 3本爪 | 30cm深 0.32 |
| | 50cm深 0.48 |

表-11
礫の比重・吸水量

| 粒 径 | 吸水量 | 絶乾比重 |
|---------|--------|-------|
| 63 mm | 35.9 % | 1.380 |
| 53 mm | 35.8 % | 1.389 |
| 37.5 mm | 36.9 % | 1.367 |
| 26.5 mm | 37.3 % | 1.356 |

4.2 転圧試験

転圧試験は、表-12に示した重機を使用し、表-13に示した転圧仕様により実施した。
なお、土質試験項目および数量は表-14に示したとおりである。

表-12 使用機械一覧表

| 用 途 | 機 種 | 重 量 (ton) | | 全 長 m | 全 幅 m | 接地圧 or 起振力 kgf/cm ² | 転 圧 幅 m | 速 度 km/hr |
|------|--------|-----------|-------|----------|----------|---|-----------------|--------------|
| | | 自 重 | 全 装 備 | | | | | |
| まき出し | ブルドーザー | 21.4 | 25.8 | 4.72 | 3.16 | 0.91×2 0.41 | 0.91×2 1.820 | 0~ 11.2 |
| 転 圧 | 振動ローラー | 9.5 | 9.5 | 5.38 | 2.37 | 9.1 t | 2.134 | 0~12 |

表-13
転圧試験仕様

| まき出し厚 t (cm) | 転 圧 回 数 N (回) |
|-----------------|------------------|
| 40 cm | N = 0 |
| | = 6 |
| | = 8 |
| | = 10 |
| 50 cm | N = 0 |
| | = 6 |
| | = 8 |
| | = 10 |
| 60 cm | N = 0 |
| | = 6 |
| | = 8 |
| | = 10 |

表-14
土質試験数量

| 項 目 | 試 験 方 法 | 数 量 |
|--------------|------------|-----|
| 密度測定 (φ300) | 砂置換法 | 36 |
| 密 度 測 定 | R1法 | 36 |
| 土粒子の比重試験 | JIS A 1202 | 3 |
| 含 水 量 試 験 | JIS A 1203 | 3 |
| 礫の比重・吸水量 | JIS A 1110 | 3 |
| 粒 度 分 析 | JIS A 1204 | 3 |
| 液性限界試験 | JIS A 1205 | 3 |
| 塑性限界試験 | JIS A 1206 | 3 |
| 締固め試験 (φ300) | JIS A 1210 | 1 |

(1) 試験結果

密度試験結果は、図-16, 17に示したとおりである。

所要密度E値85%, 90%を満足する転圧仕様は、表-15のとおりであり、試験値のばらつき、経済性を考慮し、表-15の◎印を転圧仕様とした。

表-15
所要の密度を満足する転圧仕様

| 所要密度 | まき出し厚 | 転 圧 回 数 | 摘 要 |
|--------|-------|---------|-----|
| E 値85% | 40 cm | 6 回 | |
| | 50 cm | 6 " | ◎ |
| | 60 cm | 8 " | |
| E 値90% | 40 cm | 8 " | |
| | 50 cm | 8 " | ◎ |



写真-2 転 圧 状 況

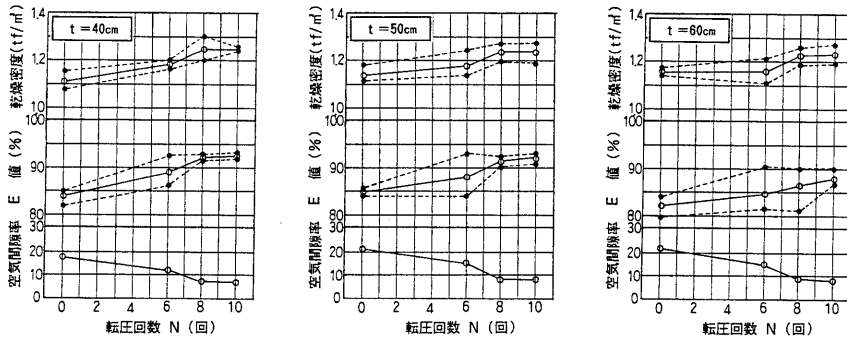


図-16 転圧回数～乾燥密度・E値の関係

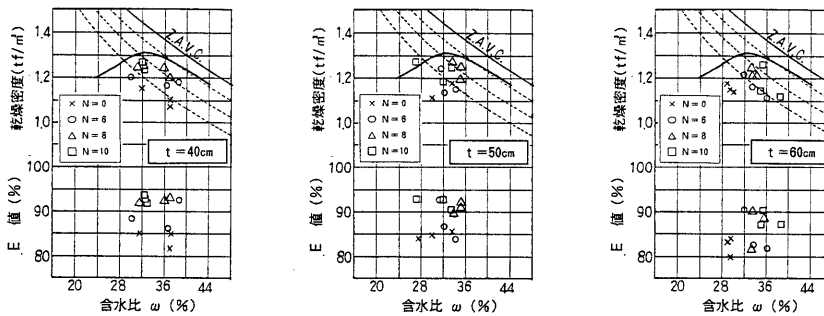


図-17 含水比～乾燥密度・E値の関係

あとがき

近年、都市機能の集中化や分化のなか、一方では都市拡散が著しく、職住分離により住宅地域は都市圏外へと、その離心的性格を強めている。その結果として宅地開発が丘陵部から低山地へと進入せざるを得なくなっており、その開発規模もますます大型化し、従来の土砂地盤の造成から岩石地盤の造成が大きな課題となっている。

我が国においては第三紀堆積岩が約16%を占めると言われており、本地区のように風化やスレーキング劣化し易い軟岩を盛土材料として使用する機会が今後ますます増えることが予想される。

従来、この種の材料の盛土は、①風化作用の影響が少ない位置に使用する、②材料を出来る限り破碎細粒化し、高密度に締固める、③細粒土と混合する等の工法を採用してきたが、軟岩の風化作用に伴う劣化特性を実験的に把握し、適切な安定解析を行うことによって、ある程度の劣化を考慮した設計・施工が可能であるものと考えている。

本地区の盛土工事はすでに1,000千㎡を超えており、盛土斜面に設置した表面沈下計、盛土内に設置したクロスアーム型沈下計による沈下量は少なく、異常は認められない。

今後は本地区の実績を踏まえ、締固め土の膨張・沈下に関する実験を行い、拘束圧力と膨張・沈下について考察し本地区の盛土の安全性を確認したいと考えている。本報告をまとめるにあたり、日本国土開発(株)橋詰清所長に多大なご協力をいただいたことを付記し謝意を表する。

《参考文献》

- 1) 大根義男：盛立材料としての岩塊の諸問題，土と基礎 Vol.32, No.7, pp3～8, 1986
- 2) 浅田秋弘：宮城県沖地震による宅地造成と被害の土質工学的検討，第15回土質工学研究発表会，pp1333～1336, 1980
- 3) 島・今川：スレーキング材料(脆弱岩)の圧縮沈下と対応策，土と基礎 Vol.28, No.7, pp45～52, 1980
- 4) 菊地宏吉：ダム基礎の地質工学的の評価に関する研究，1979