

ナイジェリア・カドナ地方における花崗岩質風化残積土 の地盤工学的考察

GEOTECHNICAL ENGINEERING STUDY ON DECOMPOSED GRANITE SOILS IN KADUNA DISTRICT, NIGERIA

末岡 徹*・小山 哲**・佐藤 洋一***

By Toru SUEOKA, Satoru KOYAMA and Yoichi SATO

Engineering classification of residual granitic soil in Kaduna district, Nigeria, is clarified on the bases of geochemical, geomechanical and statistical studies.

Geotechnical properties of each soil layer are investigated by performing analytical procedure of particle size distribution, porosity, *N*-value and chemical composition. The degree of weathering of the parent rock which belongs to tropical savanna zone is discussed in this paper comparing with the characteristics of residual soil derived from granite in Japan.

1. はじめに

地球における人口が45億人を越え、西暦2000年までには、60億人に達しようとする現在¹⁾、多くの発展途上国が存在する熱帯地方は、政治、経済の問題ばかりでなく、農学²⁾や土木工学³⁾のうえでも、数多くの未解決な問題が存在する地域であろう。土木工学の一分野である土質工学の範ちゅうに限っても、未解決な問題が数多く存在する。たとえば、熱帯地方の土の性質は、必ずしも、温帯地方のそれと同一ではなく、温帯地方で発達した土質工学の知識や経験が、いつの場合でも、熱帯地方において、適用できるわけではないことが、明らかにされつつある^{4),5)}。しかしながら、熱帯地方の土の性質が、どの程度温帯地方のそれと異なるのかという詳しい検討が、十分になされているとはいえず、また、熱帯地方の土そのものの情報も限られたものしかないというのが実情であろう。

本研究は、熱帯地方の中でも、Köppenの気候区分によれば、熱帯サバンナ気候(記号A_w)に区分されるナ

イジェリア国・カドナ地方の花崗岩質風化残積土に対して、物理的、化学的、力学および統計的な手法を使い、総合的に考察したものである。すなわち、風化残積土は、地球表層に存在する岩石の水圏、大気圏による物理的、化学的風化作用の結果生成された物質であるという風化論の見地に立ちながら、カドナ地方の風化残積土に対し、単に土質工学の範ちゅうにとどまらず、広く地盤工学(Geotechnical Engineering)、地質工学(Geomechanics)の視点も踏まえて、検討を加えた。さらに、カドナ地方の風化残積土と、日本における花崗岩質風化残積土であるマサ土との土の物理的、化学的、力学的性質を比較し、温帯および熱帯地方における花崗岩質風化残積土の性質の違いを明確化することを試みた。

2. カドナ地方の地形、地質および気象

カドナ地方は、ナイジェリア国北部、北緯10°、東経8°付近に位置し、図-1に示すように、ニジェール川の支流であるカドナ川が、地方の中央部を流れ、海拔600m程度の地形勾配1/200~3/200の緩い準平原地形からなっている。母岩は、先カンブリア期の古い花崗岩からなっており⁶⁾、図-1に示すように、島状丘(bornhardt)と呼ばれる花崗岩の岩山が局所的に露出している^{6),7)}。建設地付近の島状丘は、建設用の骨材原石山として利用

* 正会員 大成建設技術研究所地盤研究室(〒245 横浜市戸塚区名瀬町344-1)

** 大成建設技術研究所計画室(同上)

*** 千代田化工建設(株)土木部

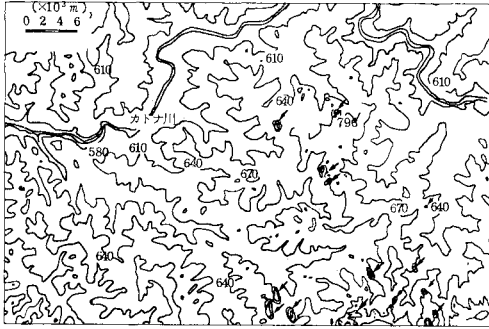


図-1 カドナ地方の地形 (単位:m, 矢印は島状丘)

表-1 カドナ地方における地盤の簡易土層区分

土層	深度(GL-m)	主な特徴
A層	0~0.3	地表に分布し、有機物を含むため黒色を呈している。水による連換作用を受けており、他の土層と比較して、二酸化ケイ素SiO ₂ の割合が多い。
R層	0~1	平坦なカドナ地方において、局所的に存在する丘陵地帯の地表部をおおっている黒色酸化鉄殻層である。ただし、黒色なのは、表面のみで、内部は赤茶色である。写真-1に示すように、内部に大小さまざまな空洞が存在するのも特徴の1つである。
B層	0.3~5	A層またはR層の下に存在する赤黄色粘土層である。部分的に風化残積土特有の未風化の石英粒が存在するが、粒度分布は、下層のC層より、細粒分が多いのが特徴である。粒子の粗粒部分は、石英粒子と固結粘土粒子からなっている。
C層	5~12	写真-2に示すように紫色・白色の斑状粘土層であるが、場所により、白色または紫色のみが卓越する場合もある。紫色粘土部は、白色粘土部より密に詰まっている。地下水位は、地表下平均9m付近に存在し、乾期と雨期で±3m程度の水位変動がある。
D層	12~平均25	灰白色粘土混じり砂層であり、粗粒部分は写真-3に示すように、非常に角ばっているのが特徴である。石英粒子のほかに、未風化の長石、雲母が存在しているのが、他の土層と異なる点である。
E層	平均25~	地表から20~40m、平均25m付近から存在する風化花崗岩層である。

されることが多い⁸⁾。地盤は、先述したように、全般的には、きわめて平坦であるが、図-2に示すような、高さ5~10m、頂部が水平で、その表層が酸化鉄殻層(hardpanまたは、ferruginous crust)でおおわれた丘陵が局所的に存在する。この酸化鉄殻層は、固結しているため、ラテライト石(Laterite rock)とも呼ばれ、熱帯地方では、コンクリート用骨材⁹⁾や道路用路盤材¹⁰⁾として利用されている。この丘陵地形は、風化残積土の旧地盤面が浸食をまねがれて残積したものと考えられている^{7), 11)}。

カドナ地方における代表的土層断面を示すと、図-2のようになる。風化を受けた花崗岩は、地表下20~40mで出現し、風化前線の形が地表面地形より起伏に富んでいるのが特徴的である。カドナ地方の代表的土層断面に対し、主に土色に基づいて、簡易土層区分を行うと、図-2のようになり、各土層の主な特徴を述べると、表

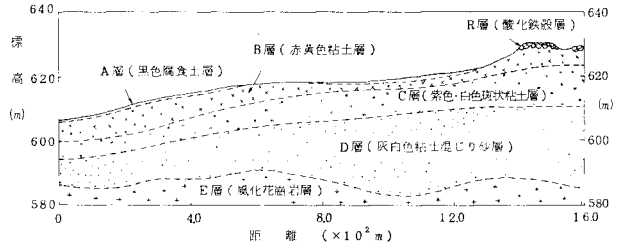


図-2 カドナ地方の典型的な土層断面



写真-1 酸化鉄殻層試料 (R層)

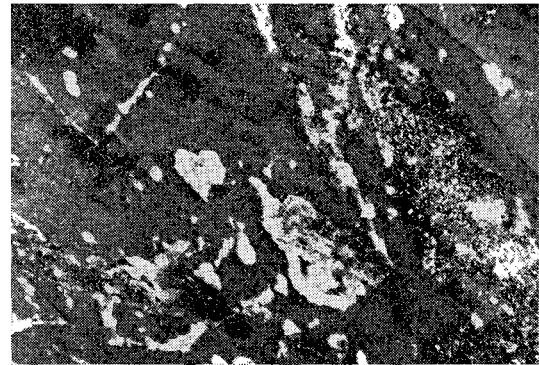


写真-2 紫色・白色斑状粘土層 (C層)

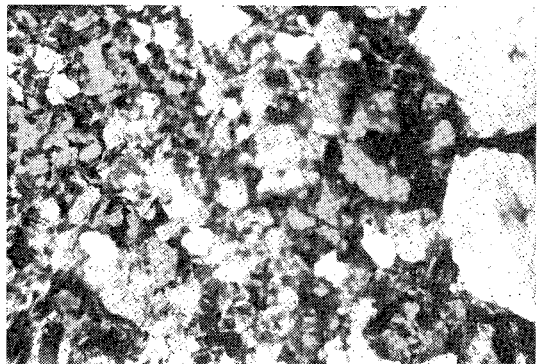


写真-3 D層試料 (GL-15m) の74 μm以上の粗粒部分

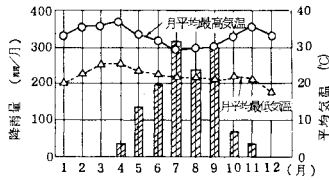


図-3 カドナ地方の気象データ (1979年)

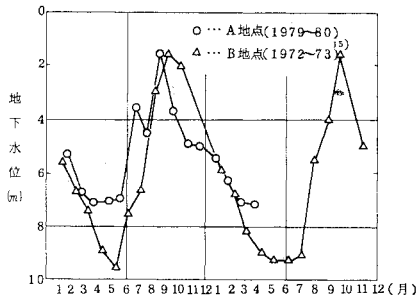


図-4 カドナ地方の井戸における水位の季節変動

一1のようになる。図-2や表-1は、あくまで簡易土層区分であり、後の章で詳細な検討を行う。

次にカドナ地方の気象の特徴について述べると以下のようになる。すなわち、カドナ地方は、図-3に示すように、乾期と雨期の区別が明確なサバンナ気候であり、年間1300mm程度の雨量が5月から10月までの半年間に集中する。1回の降雨形態は、温帯地方のそれと異なり、短期間に集中的に降るのが特徴である。これらの降雨形態を含めた熱帯サバンナ気候が、酸化鉄殻層丘陵や島状丘を局所的にもつが、全般的にはきわめて平坦なカドナ地方全域の地形形成に影響を及ぼしていると考えられる^{12),13)}。

地下水位は、先述したように熱帯サバンナ気候の影響を受け、季節変動が著しい。カドナ地方の風化残積土地盤では、全般的に、乾期と雨期で±3m以上の地下水位変動があり、カドナ川支流の中小河川付近の村落井戸では、図-4に示すような地下水位の変動が観察される。

カドナ地方は、図-3からもわかるように、半年間ほとんど降雨がなく、年間日射時間は2700時間を越え¹⁴⁾、また、年間の水分蒸発量は2500mmに達する¹⁵⁾。すなわち、年間水分蒸発量が年間降雨量より大きなことも、温帯地方に位置する日本の気候と異なる点である。

3. 風化残積土の物理化学的性質

カドナ地方における花崗岩質風化残積土は、日本のような温帯地方の風化残積土とかなり土の性質が異なると思われる。本章では、物理的、化学的手法を使いながら、カドナ地方の風化残積土の特性を検討する。なおボーリング、サンプリングは、乾期である2月に、行っている。

雨期においても、地形が平坦で急傾斜地もなく、また、地表付近の土質が固い粘性土で構成されていることから、乱さない限り、乾期と比較して極端に地盤の強度が低下することはない。調査は、風化残積土地盤に対し、約10万m²に1か所の割合で行っており、土質試験結果は、ほぼ、この地方の平均的な地盤特性を表わしていると考えられる。サンプリングは、中～硬質粘土に対し英国で、最も一般的なシンウォールオープンドライブサンプラーを使用している。風化残積土であるため、乱れの影響が心配されたが、力学試験を行う試料が硬い低塑性の粘性土であること、また、他の採取方法を取ることがナイジェリアで困難であることを考慮して、やむを得ず、本サンプリング方法を採用している。

(1) 風化に伴う自然含水比および土の飽和度の変化

カドナ地方における風化残積土地盤の自然含水比の変化を深度ごとに示すと、図-5のようになる。自然含水比は、地表下8～10m付近で最大となっており、しかもこの深度付近で、自然含水比のばらつき度合の1つの指標である標準偏差値も大きな値となっている。一方、土の飽和度の変化を調べてみると、図-6のようになり、乾期においても、地表下1m以深の地盤では、飽和度が60%以上存在することがわかる。なお、図-6にお

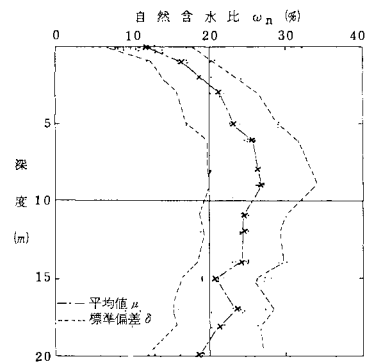


図-5 自然含水比 ω_n の深度別変化 (2月)

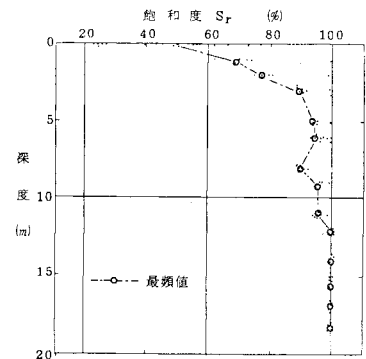


図-6 飽和度 S_r の深度別変化 (2月)

表-2 B層およびC層試料の物性や化学組成等

(単位:%)

試料	G _s	LL(%)	PL(%)	PI	CEC meq/100g	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO	Na ₂ O	K ₂ O	MgO	CaO	MnO	H ₂ O(+)	H ₂ O(-)
B-L(>420μm)	—	—	—	—	—	55.7	20.8	10.1	0.38	0.99	1.60	0.08	0.004	0.13	7.45	1.48
B-S(<420μm)	2.798	48.2	20.7	27.5	14.2	57.5	20.2	8.97	0.41	0.98	1.44	0.11	0.01	0.09	9.34	0.93
B-SD(脱鉄)	2.697	37.9	12.1	25.8	10.2	55.1	18.4	1.37	2.46	1.11	1.68	0.08	0.003	0.01	6.59	3.57
C層(紫色部)	2.736	N.P	N.P	N.P	7.06	56.6	21.9	9.84	0.25	1.04	0.36	0.031	0.02	0.005	6.11	0.47
C層(白色部)	2.632	53.6	34.5	19.1	4.67	66.1	23.5	0.74	0.14	0.79	0.33	0.019	0.008	0.008	6.04	2.70

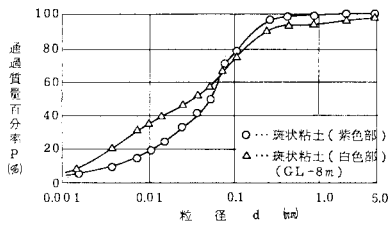


図-10 C層斑状粘土の粒度分布の違い

なわち、図-9からわかるように、酸化第二鉄 Fe₂O₃ 成分は、粒度分布を見かけ上、粗いものとしており、土粒子を団粒化させる作用があることが推測される。

一方、表-2の化学分析結果によれば、B層試料の酸化第二鉄 Fe₂O₃ 成分は、420 μm以上の粗粒部分に、より多く含まれている。また、H₂O(+)+H₂O(-)の値(この値は、ほぼ強熱減量の値と同等であり、H₂O(+))は粘土鉱物の層間水、H₂O(-)は、粘土鉱物の結晶水に相当すると考えられる¹⁸⁾が9%前後存在することから、B層試料の420 μm以上の粗粒部分には、表-1で述べたように、酸化第二鉄 Fe₂O₃ 成分の多い粘土が再固結してできた粗粒子がかなり含まれていることを裏付けている。

ところで、カドナ地方の風化残積土において、C層(GL-5m~12m)地盤は、紫色・白色斑状粘土であることが多いことは、表-1で述べたとおりであるが、この斑状粘土の白色部試料と紫色部試料を比較すると、粒度分布は、図-10、化学成分等は表-2のとおりとなる。化学成分や比重の違いから、C層の白色部、紫色部の違いは、酸化第二鉄 Fe₂O₃ 成分の有無が原因であることがわかる。粒度分布は、図-10より、74 μm以下の細粒分側で、白色部試料が紫色部試料より、細粒分が卓越していることがわかる。すなわち、C層斑状粘土において、酸化第二鉄 Fe₂O₃ 成分の有無による粒度分布の差異の傾向は、脱鉄処理によるB層試料の粒度分布の差異の傾向と同じであり、カドナ地方のC層地盤では、地盤内において、脱鉄処理と同様な作用を受けていると推測される。

一方、脱鉄処理により、土のコンシステンシーは、表-2のように変化する。脱鉄処理を行うことにより、液

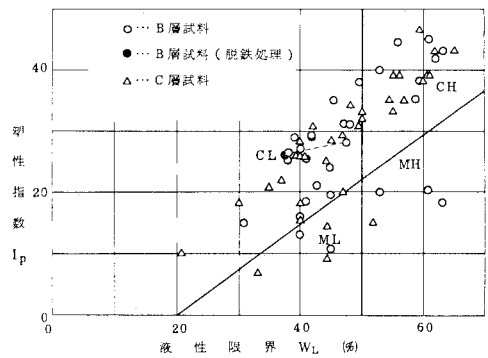


図-11 カドナ地方B層、C層試料のコンシステンシー

性限界、塑性限界とも減少している。酸化第二鉄 Fe₂O₃ 成分の多いB層試料を脱鉄処理することにより、粒度分布が、図-9に示すように細粒化していることを考慮すると一見、不合理な結果と考えられる。この原因は、酸化第二鉄 Fe₂O₃ 成分が、粒度試験の際には、土粒子を団粒化させ、粒度分布を粗いものとする一方、液性限界、塑性限界試験の際には、おのおのの限界を増大させる、すなわち保水能力を増加させる役割を果たしているためと考えられる。すなわち、粘土鉱物が主にカオリナイトであるB層試料の場合、脱鉄処理により、Na飽和試料となっており、土の保水能力が低下すると考えられる。実際、Lambeら¹⁹⁾は、粘土鉱物がカオリナイトでNa飽和している場合、液性、塑性限界は、他の陽イオンで飽和している場合より低下することを指摘している。しかし、この現象は、粘土鉱物がカオリナイトの場合に限られ、パーミュキュライトやモンモリロナイトが主粘土鉱物である風化残積土においては、脱鉄処理によってNa飽和となる場合、粒度分布も細粒化し、液性・塑性限界も増加する結果が得られている²⁰⁾。

カドナ地方のC層試料では、N.P.と判定されるものもあるが、B層、C層試料の塑性図上の位置を示すと、図-11のようになる。B層、C層試料とも、統一分類に従えば、ML、MH、CH、CLの範囲に入るが、CH、CLに区分されるものが比較的多いようである。

(4) 風化に伴う土の乾燥密度や空隙率の変化

カドナ地方における花崗岩質風化残積土地盤におい

て、風化の進行度が土の乾燥密度や間隙率にどのような影響を及ぼしており、また、日本におけるマサ土地盤とどの程度性質が異なるかを検討してみる。

カドナ地方の風化残積土地盤における乾燥密度の深度別変化を調べてみると、図-12 のようになる。土の乾燥密度は、地表下 8 m 付近の C 層で最低値を示しており、日本におけるマサ土地盤と傾向が異なる。すなわち、マサ土地盤においては、地表付近まで単調に土の乾燥密度が減少することが多く^{21),22)}、カドナ地方の場合のように、地表付近地盤で土の乾燥密度が明確に増加する傾向はみられない。また、乾燥密度のばらつき度合を示す指標である変動係数 V の値は、図からわかるように、地表下 10 m 以浅では、 $V \approx 0.1$ であるのに対し、地表下 12 m 以深では、ほぼ $V = 0.05 \sim 0.07$ となっており、上層地盤（これ以後、地表下 12 m 未満を上層地盤、12 m 以深を下層地盤と呼ぶことにする）の方が、土の乾燥密度のばらつき度合が大きいことがわかる。ばらつき度合の変化点は、地表下 10~12 m 付近であり、2. の表-1 で述べたように、平均的な地下水位低下面とほぼ一致していることは、非常に興味深い。

マサ土の風化度を示す指標に、土の間隙率を用いることが多いが^{21),22)}、カドナ地方の風化残積土に対し、深度

ごとの土の間隙率の変化を調べてみると、図-13 のようになる。土の乾燥密度の傾向から当然であるが、間隙率も、地表下 8 m 付近で最大値を示しており、また、間隙率のばらつき度合の指標である標準偏差 σ や変動係数 V の値も、上層地盤と下層地盤では、傾向が異なっている。すなわち、上層地盤では、 $\sigma = 0.05 \sim 0.07$ 、 $V = 0.12 \sim 0.18$ であるのに対し、下層地盤では、 $\sigma = 0.03 \sim 0.04$ 、 $V = 0.09 \sim 0.12$ となっている。表-1 や (1) で述べたように、上層地盤は不飽和状態、下層地盤は飽和状態であることから、飽和地盤と不飽和地盤で間隙率のばらつき度合が異なることがわかる。

ところで、日本の粘土質マサと呼ばれるかなり風化の進んだマサ土では、間隙率が 60% にも達するものもある^{21),22)}が、カドナ地方の場合、風化は日本の粘土質マサより進んでいると考えられる B 層試料でも、間隙率は 40% 台であり、一般にカドナ地方の風化残積土の方が、密に締まった地盤であるといえる。

(5) 風化に伴う強熱減量の変化

日本におけるマサ土地盤の風化度合を示す指標の 1 つに、強熱減量があるが、強熱減量試験は、実験施設の少ない熱帯地方でも簡単に行える試験法である。カドナ地方における風化残積土地盤の強熱減量値を、深度ごとに調べてみると、図-14 のようになる。日本における典型的マサ土地盤の例として、鳥取市布勢地区のデータも合わせて図示する。カドナ地方試料の方が、全般的に強熱減量の値が大きく、風化が進んでいるのは、明らかである。カドナ地方における地表下 15 m 試料 (D 層) の強熱減量値 6% は、布勢地区試料の最も風化の進んだ地盤上層の値よりやや多い程度であり、風化度もやや進んだ程度と考えることができよう。小野寺ら²²⁾は、日本のマサ土において、図-15 に示すような強熱減量と土の間隙率の関係を得ているが、熱帯サバンナ気候であるカドナ地方の場合も合わせて図示すると、両者の傾向は、

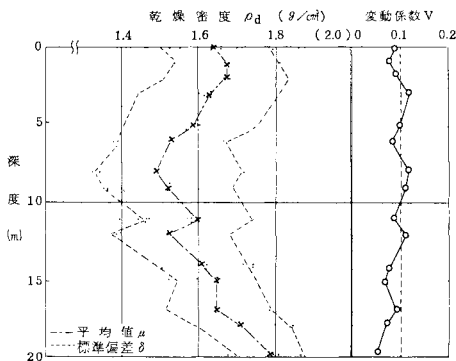


図-12 土の乾燥密度 ρ_d の深度別変化

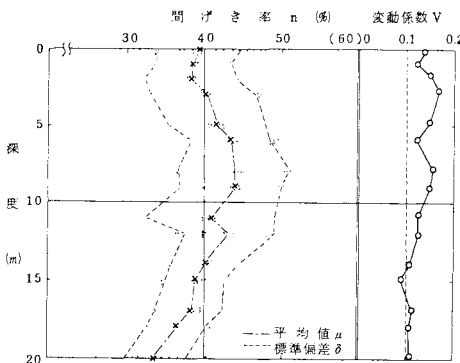


図-13 土の間隙率 n の深度別変化

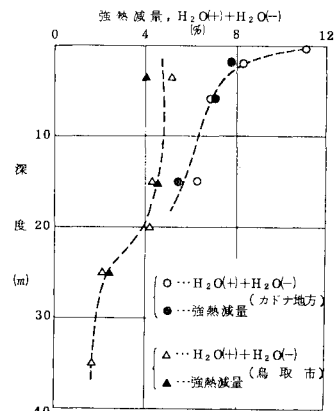
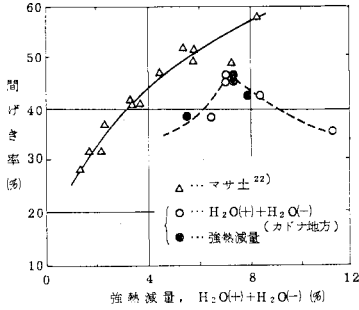


図-14 強熱減量等の深度別変化



図一五 土の間隙率と強熱減量等の関係

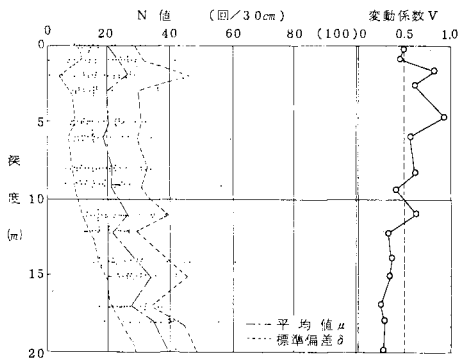
かなり異なっていることがわかる。すなわち、マサ土の場合、強熱減量の値は、土の間隙率の増加とともに、単調に増加しているが、カドナ地方の場合、間隙率は、地表下 8 m 付近の C 層地盤で最大値を示し、この深度以浅では、間隙率は、減少するが、強熱減量は、増加している。そして、最終的な風化生成物として、強熱減量 11~13%，間隙率 25~35% の丘陵地帯酸化鉄殻層となるのであろう。間隙率と強熱減量の関係が、マサ土の場合と異なるのは、地表下 0~8 m 付近の地盤において、風化が進み、強熱減量は増加するが、三酸化物の相対的集積に加え、乾期、雨期の繰り返しにより、地盤が収縮、再固結化し、間隙率のみ減少しているためと考えられる。

4. 風化残積土の力学的性質

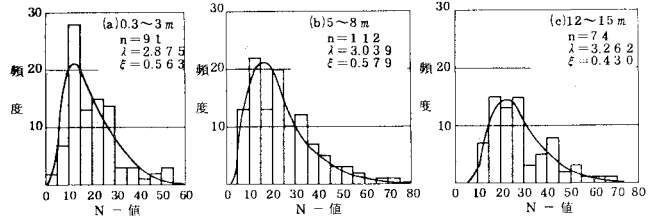
前章で述べたように、カドナ地方における風化残積土は、日本のような温帯地方における風化残積土とかなり性質が異なる。本章では、原位置における標準貫入試験や室内における三軸圧縮試験から、カドナ地方における花崗岩質風化残積土地盤の力学特性について検討する。

(1) 風化に伴う N 値の変化

カドナ地方の風化残積土地盤における標準貫入試験結果 (N 値) を示すと図一16 のようになる。N 値は、間隙率の最大値をとる C 層で 20 以下になる部分があるが、



図一16 標準貫入試験値 (N 値) の深度変化



図一17 標準貫入試験 (N 値) の深度別頻度

これ以深では、深度の増加とともに、増加していることがわかる。日本におけるマサ土地盤の N 値は、深度の増加とともに、単純増加している場合が多く²¹⁾、カドナ地方の場合のように、地盤内で最小値をとることはない。N 値のばらつき度合を調べてみると、図一16 に示すように、地表下 12 m 未満の上層地盤では、N 値の変動係数 V が、 $V \geq 0.5$ とばらつき度合が非常に大きいのに対し、地表下 12 m 以深の下層地盤では、 $V = 0.25 \sim 0.35$ となっている。すなわち、乾燥密度や間隙率と同様の傾向であるが、さらに明確に上層地盤のばらつき度合が下層地盤より大きいことがわかる。

B 層、C 層、D 層の各土層グループにおける N 値は、どのように分布しているかを調べるため、地表下 0.3~3 m (B 層)、地表下 5~8 m (C 層)、地表下 12~15 m (D 層) の 3 土層グループに分け、N 値分布を調べてみると、図一17 のようになる。各グループの N 値分布は有意水準 5% で、 χ^2 検定を行うと、(a) グループ以外、対数正規分布でモデル化できる。Lumb は、ホンコンの花崗岩質風化残積土地盤において、粘着力 c や摩擦角 ϕ の分布が、正規分布よりむしろ、ベータ分布に近いことを指摘している²⁴⁾が、これらの結果より、乾期を有する熱帯、亜熱帯地方における風化残積土の強度定数分布は、正規分布ではなく、ひずんだ分布形となることが予想される。この原因は、3.(5) で述べた地盤の収縮、再固結化が、均質にではなく、不均質に発生しているためと考えられる。なお、図で、 $\lambda = E(\ln N)$ 、 $\xi = \sqrt{\text{Var}(\ln N)}$ であり、おのおの、対数 N 値の平均値、標準偏差を表わしている。

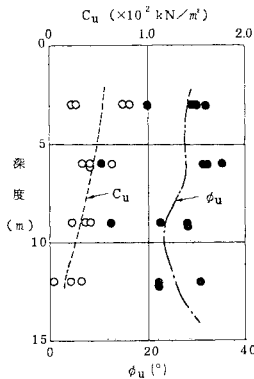
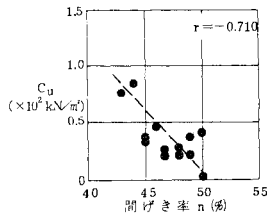
(2) 風化に伴う三軸圧縮試験値の変化

飽和度 $S_r = 70 \sim 90\%$ の風化残積土に対し、側圧 49~147 kN/m²、非圧密非排水状態での三軸圧縮試験 (UU 試験) の結果を深度ごとに示すと図一18 のようになる。粘着力の値 c_u は、深度が浅くなり、風化が進むほど、増加しており、摩擦角の値 ϕ_u は、地表下 9 m 付近で最低値を示している。

粘着力の値 c_u や摩擦角の値 ϕ_u がどのような土質係数と相関があるかを調べるため、各土質係数間の相関係数を求めてみると、表一3 のとおりとなる。飽和度 $S_r = 70 \sim 90\%$ の範囲であるが、粘着力 c_u は、飽和度 S_r 、

表-3 粘着力 c_u 、摩擦角 ϕ_u と土質諸係数との相関係数 (γ)

	飽和度 S_r	含水比 w_n	乾燥密度 ρ_d	液性限界 LL	塑性限界 PL	一軸強度 q_u	粘着力 c_u	摩擦角 ϕ_u	$<74\mu\text{m}$	間隙率 n
粘着力 c_u	0.291	-0.254	0.645	-0.376	-0.263	0.737	-	-0.065	0.074	-0.710
摩擦角 ϕ_u	-0.237	-0.511	0.524	-0.212	-0.002	0.247	-0.065	-	0.351	-0.475

図-18 c_u 、 ϕ_u 値の深度別変化図-19 粘着力 c_u と間隙率 n の相関

自然含水比 w_n 、摩擦角 ϕ_u 、細粒分含有率 ($<74\mu\text{m}$) とほとんど相関がなく、乾燥密度 ρ_d 、間隙率 n 、一軸圧縮強度 q_u とかなり強い相関があることがわかる。一方、摩擦角 ϕ_u は、自然含水比 w_n 、乾燥密度 ρ_d 、間隙率 n と弱い相関をもっている。一般に、締め固めた不飽和土においては、粘着力 c_u と土の乾燥密度 ρ_d 、ひいては間隙率とは、相関がないことが報告されている²⁵⁾。カドナ地方の乱さない風化残積土の場合、図-19 に示すように、粘着力 c_u と間隙率 n は、かなり相関が強い。この理由は、1 つには、試験の側圧が低いため、他は、乾期、雨期の繰り返しを有する熱帯サバンナ気候による風化作用で、土の収縮を伴う地盤の再固結が発達しているためと考えられる。

5. カドナ地方における風化残積土地盤の特徴と工学的土層区分

風化残積土は、沖積土や洪積土のような運積土と異なり、水による粒子選択や運搬作用を受けていないため、土層区分が明確でない。しかし、実際の土構築物、構築物の設計や施工においては、どうしても、風化残積土の

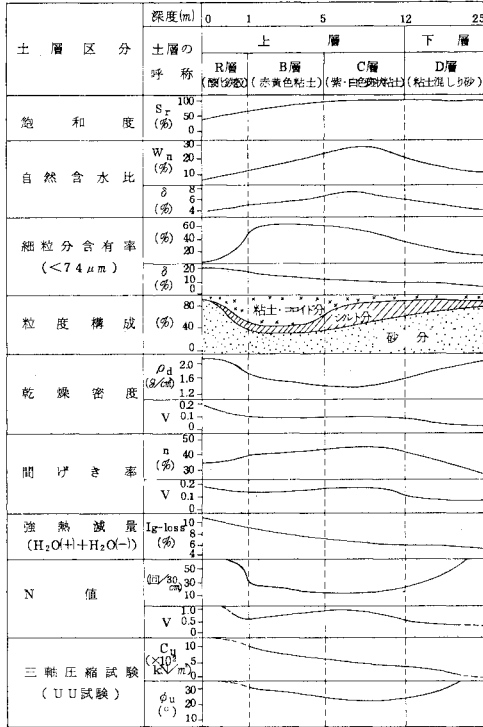
工学的土層区分が必要になってくる。たとえば、盛土の品質管理の際、盛土材料の粒度や含水比、土量変化率のための乾燥密度、およびそれらの値のばらつき度合が必要になってくるし、また、深度の異なる多くのフーチング基礎の設計には、土層ごとの N 値やそのばらつき度合を知ることが非常に重要になってくる。花崗岩質風化残積土および風化花崗岩の地層区分に対しては、これまで種々の方法が提案されている。たとえば、Ruxton と Berry²⁶⁾、Little²⁷⁾ らは、風化岩および風化残積土の風化度に対し、主に地質的特徴からの地層区分を提案しているし、Scott²⁸⁾ や Lumb¹⁷⁾ らは、岩石を構成している一次鉱物や風化によって生成した二次鉱物に注目して、風化度を判定しようとしている。また、Reiche²⁹⁾、Ruxton³⁰⁾、三浦³¹⁾ らは、風化岩や風化残積土の化学組成の変化から風化傾向や風化度を定量化しようとしているし、風化岩の引張り強度から風化度を定量化しようとする研究³²⁾ も行われている。

本研究においては、すでに 2. で、土色観察による簡易土層区分を行ったが、本章では、前章までの種々の検討成果を十分活用して、単に土色ばかりではなく、定量的裏付けのある工学的土層区分を行う。すなわち、強熱減量、間隙率、粒度分布、自然含水比といった簡便に試験の行える風化度判定手段のほかに、 N 値、 ϕ_u 値、飽和・不飽和の違い、土質諸定数のばらつき度合の違い、粒度構成等を考慮に入れて、土層区分を行う。ただし、本研究においては、実際の設計や施工の必要性から、主に風化残積土層のみの土層区分とし、風化母岩層の詳しい地質区分は行わない。また、A 層は、表-1 で述べたように、明らかに、運積土の特徴を有しており、今回の土層区分からは除くことにする。

カドナ地方における花崗岩質風化残積土地盤の土性変化および工学的土層区分を示すと、図-20 のようになる。2. で行った土色による簡易土層区分は、カドナ地方の場合、結果的にはほぼ妥当な区分であることがわかるが、表-1 でも述べたように、土色は、特に C 層で、紫色、白色粘土の場所によるばらつきが大きく、土色だけで土層区分を行うのは、適切でないと考えられる。

最後に、カドナ地方における風化残積土地盤の風化特性や工学的諸性質についてまとめると次のようになる。

(1) カドナ地方は、熱帯サバンナ気候の影響を受け、全般的に地形勾配 1/200~3/300 の非常に平坦な準平原



図—20 風化残積土の地盤特性と工学的土層区分

地形からなっており、局部的に島状丘や酸化鉄殻層のある丘陵が存在する。

(2) カドナ地方の花崗岩質風化残積土地盤では、明確な乾期、雨季を有する熱帯サバンナ気候の影響により、地下水位が季節的に変動する。地下水位は、地表下平均9m付近に存在し、季節により、±3m以上の水位変動がある。このため、地表下12m未満の上層地盤では、不飽和状態であることが多いが、12m以深の下層地盤では、常に飽和状態である。

(3) B層、D層試料の粒度分布は、Talbotの曲線に近い粒度分布となっているが、C層試料の粒度分布は、シルト分含有量が多く、締め固めには適さない粒度分布である。また、各土層の粒度構成は、深度が浅くなり、風化が進むほど、図—8に示すように、多様なものになっている。

(4) 三酸化物の多いカドナ地方のB層地盤において、酸化第二鉄 Fe₂O₃ 成分は、土を団粒化させる働きがあり、見かけの粒度分布を粗いものとしている一方、土の保水能力を高める働きもしている。

(5) C層地盤の紫色・白色斑状粘土の土色の違いは、酸化第二鉄成分の有無が原因であり、自然界においても、人工的な脱鉄処理と同様な作用が働いている。

(6) C層地盤の地表下8~10m付近において、自然含水比、間隙率は最大値をもち、乾燥密度、N値、

摩擦角 ϕ_u は最小値をもつ。この原因として、地表下8mより浅い三酸化物の多い地盤において、乾期、雨季の繰り返しによる土の収縮、再固結化が考えられる。日本における花崗岩質風化残積土であるマサ土では、深度とともに、土質諸係数が単調に変化する場合が多く、カドナ地方の場合のように、土層内部で、土質諸係数が明確な最大値や最小値をもつことはない。

(7) 上層地盤における74 μm以下の細粒分含有率、間隙率、N値等の土質試験値のばらつき度合は、下層地盤より大きく、これらの試験値のばらつき度合の変化が、カドナ地方の風化残積土地盤の工学的土層区分の目安になる。

(8) 風化度判定手法として強熱減量試験は、実験施設の少ない熱帯地方においても簡単にできる試験である。カドナ地方における強熱減量の値は、地表付近ほど大きな値となっており、風化が、地表に向かって進行していることを裏付けている。

(9) カドナ地方における地表下15mのD層試料の風化度は、強熱減量や粒度分布から判断すると、鳥取市布勢地区の地盤最上層マサ土より若干進んでいる程度であり、カドナ地方地盤の方が全般的に風化が進んでいる。

(10) 同一深度グループにおけるN値の分布は、正規分布ではなく、対数正規分布で近似できる。この原因は、地盤が不均質に再固結しているためと考えられる。

(11) 非圧密非排水三軸試験による粘着力 c_u は、地表付近に近づき、風化が進むほど、大きな値となり、土の間隙率と相関をもつ。

6. あとがき

以上、ナイジェリア・カドナ地方における風化残積土の地盤特性、工学的性質や土層区分、日本のマサ土との相違点について検討した。本文をまとめるにあたり、ナイジェリア国・ベニン大学土木工学科長 S. A. Ola 教授には、種々の土質試験で助力をいただいた。大成建設技術研究所 金子誠二、安伸二、村松正重、深沢道子の諸氏には、各専門分野からの助言をいただいた。また、京都大学防災研究所 柴田徹教授、九州大学工学部 山内豊聡教授、関西大学工学部 西田一彦教授、埼玉大学工学部 小田匡寛助教授、大成建設技術研究所 中尾健児室長には、常日頃からご教示や激励のことばをいただいている。ここに合わせて深く謝意を表する。

参考文献

- 1) アメリカ合衆国政府特別調査報告 (逸見謙三・立花一雄監訳)：西暦2000年の地球 (Global 2000 Report to The President), 家の光協会刊, 環境編, pp.11, 1981年2月。
- 2) 北村ほか：熱帯農業のあり方を探る, 農業土木学会誌, Vol. 51, No. 1, pp.57~66, 1983年1月。

- 3) 室田ほか：比較河川学，土木学会誌増刊号，pp.7~12，1983年4月。
- 4) 高田・門田・末岡：熱帯風化残積土の土質工学的特性と路盤材としての利用，土と基礎，Vol.29，No.12，pp.27~32，1981年12月。
- 5) 平野 実：地域別に見る世界の土質関係規準とその運用—アフリカ，土と基礎，Vol.30，No.6，pp.30~35，1982年6月。
- 6) Ollier, C.D. (松尾新一郎 監訳)：風化—その理論と実態，ラティス刊，pp.282，1971年12月。
- 7) F. マハチュク著，H. クラウエル，C. ラチェンス改訂(松尾新一郎 監訳)：地形学，ラティス刊，pp.122~123，1976年。
- 8) 高田・末岡・坂上：ナイジェリアの生活とコンクリート，コンクリート工学，Vol.19，No.1，pp.63~66，1981年1月。
- 9) Kenze, W., Koblenz, F. and Brodda, R. : Zur eignung von laterit als betozuschlag, Betonwerk Fetigteil Technik (DEU), pp.559~561, 1976.
- 10) De Graft-Johnson : Laterite soils in road construction, 6th Reg. Conf. of Africa on S. M. F. E., pp.89~98, 1975.
- 11) Gidigasu, M. D. : Mode of formation and geotechnical Characteristics of Ghana in relation to soil forming factors, Engineering Geology, Vol.6, pp.96, 1972.
- 12) Saunders, M. S. and Fookes, P. G. : A review of the relationship of rock weathering and climate and its significance to foundation engineering, Engineering Geology 4, pp.289~325, 1970.
- 13) Ruxton, B. P. and Berry, L. : Weathering profiles and geomorphic position on granite in two tropical regions, Rev. Geomorph. Dynamique, 12, pp.16~31, 1961.
- 14) Carroll, D. 著 (松尾新一郎 監訳)：岩石の風化，ラティス刊，pp.158，1974年。
- 15) Olugboye, M. O. : Note on the hydrogeology of Kaduna River Basin around Kaduna Town, Kaduna State Geological Survey Report, No.1539, Dec.1975.
- 16) 赤井浩一：土の粒度配合による締め固め特性の変化，土と基礎，Vol.5，No.5，pp.19~22，1957年。
- 17) Lumb, P. : The properties of decomposed granite, Geotechnique Vol.12, No.3, pp.226~243, 1962.
- 18) 土質基礎工学ライブラリー：風化花崗岩とまさ土の工学的性質とその応用，土質工学会編，pp.11，1979年。
- 19) Lambe, T. W. and Whiteman, R. V. : Soil Mechanics, pp.33, John Wiley & Sons, Inc. 1969.
- 20) 金子・末岡・安：脱鉄処理による土の物理化学的性質の変化，第18回土質工学発表会，pp.171~174，1983年6月。
- 21) 西田・青山：花こう岩風化層の間ゲキ径分布と水分吸着特性について，応用地質，20巻1号，pp.3~12，1979年。
- 22) Onodera, T., Oda, M. and Minami, K. : Shear strength of undisturbed sample of decomposed granite soil, Soil and Foundation, Vol.16, No.1, pp.17~26, 1976.
- 23) 三浦 清：鳥根県加茂町付近の花崗岩類とその崩壊について，岩盤学会誌，56巻6号，pp.256~283，1966年。
- 24) Lumb, P. : Safety factors and probability distribution of soil strength, Canadian Geotechnical Journal, Vol.7, pp.225~242, 1970.
- 25) 松尾・黒田：不飽和土の土質諸係数と破壊確率に関する一考察，土木学会論文報告集，第208号，pp.65~75，1972年12月。
- 26) Ruxton, B. P. and Berry, L. : Weathering of granite and associated erosional features in Hong Kong, Bull. Geol. Soc. America, Vol.68, pp.1263~1291, 1957.
- 27) Little, A. L. : The engineering classification of residual tropical soils, Proc. Intern. Conf. on S. M. F. E. Mexico, 1, pp.1~10, 1969.
- 28) Scott, L. E. : Secondary minerals in rock as a cause for base failure, Proc. Highway Res. Board. (Wash.) 34, pp.412~417, 1955.
- 29) Reiche, P. : Graphic representation of chemical weathering, Jour. Sed. Petrology, Vol.13, pp.58~68, 1943.
- 30) Ruxton, B. P. : Measures of the degree of chemical weathering of rocks, Jour. Geol. Vol.76, pp.518~527, 1968.
- 31) 三浦 清：深成岩の風化に関する研究(第1報)—新第三紀末の赤色風化作用による江津深成岩体の風化，応用地質，Vol.14，No.3，pp.1~16，1973年。
- 32) 木宮一邦：花こう岩類の物理風化指標としての引張強度，地質学雑誌，第81巻第6号，pp.349~364，1975年。

(1983.8.29・受付)