図書室用

土木試驗所報告

第七十三號

凍害を對象とせる黄土路床安定工法の判定に就いて……內務技師 藤森謙一 石井靖丸…(1)

我が國沿岸の漂砂に關する調査報告(第2報)……囑託 本間仁…(11)

溢流堰堤堤頂部縱斷形狀の溢流係數に及ぼす影響に關する水理實驗……內務技師 竹內俊雄…(19)

紅土の土質に關する實驗的研究…… 石井靖丸…(35)

昭和十八年十一月

內務省土木試驗所

凍害を對象とせる黄土路床安定工法の判定に就いて

内務技師　藤　森　謙　一
石　井　靖　丸

目　次

I. 緒　言……（1）
II. 實驗目的及び説明……（2）
III. 試料及び裝置……（2）
IV. 實驗の説明……（4）
〔1〕凍結融解繰返し試驗……（4）
〔2〕凍上試驗（其の1）……（5）
〔3〕凍上試驗（其の2）……（6）
V. 結　論……（8）

I. 緒　言

寒地に於ては氣温の低下に依り路盤は相當の深さ迄凍結し，爲に凍害を受ける．路盤の凍害とは路床土の凍結に基く凍上現象に依る路面の持上り，並に融解期に當りての凍結部分の含水量增加現象に基く地耐力の減少，この二つの現象に依る路面の被害を云ふのであつて，之等が交通に對し支障を及ぼすに至る．

之等の現象を輕減或は防止する爲の路盤凍害對策は，路盤をして凍結しても凍上現象を起さない樣にすること，並に融解期含水量過多となるも路盤の安定度減少せざる樣にすること，この二つの課題に解決を與へることに依り，路盤の凍害を征服することが可能である．本目的達成の爲考へる方法は，外的條件として地下水位を遞減せしむる外

1. 路床上の粒徑組成を凍害少き樣に改良すること．
2. 路床上を凍害少き土壤と置換すること．
3. 路床上に適當なる混和材（例へばポルトランドセメント，石灰，鹽化カルシウム等）を添加し土壤を安定せしむること．

等が考へられ，夫々現地の特殊性に隨じたる工法が採られるべきである．

本實驗は北支の黄土地帶の路盤を對象として行つた．北支に於ては土の粒徑組成の改良又は置換は困難であり同地域に對し最も實施容易なりと考へた第3の混和材を用ふる工法を採り上げた．實驗は問題に對して全くの一小部分であり，この結果より直ちに黄土地域の冬季路面凍害に關し正鵠なる解決を與へることは出來ないが，本試驗結果が幾分なりとも黄土路盤の凍害對策に資せられんことを期待するものである．

猶本試驗は東亞研究所第四調査會第一部會の研究を兼ねて行つたものである．

II. 實驗目的及び說明

在來凍上に關して種々の觀測及理論が提出されてゐるが，まだ凍上現象を定量的に一般性を以て理論付ける迄には至つてゐない．

凍上の支配的要素と考へられて居るものは 1. 氣象條件 2. 土質 3. 土中の水の狀態 でありこれらの三要素の錯綜した作用に依つて凍上が決定される．(1)(2)

從つて凍上防止工法の研究は原則としては現場實驗に依るべきであるが，先づ定性的に土質の凍上に對する難易の判定は，實驗室內に於ける實驗に依つても可能である．

凍上機構に就いては，現在一般に定說とされてゐる處は土中の水が凍結に際してレンズ狀氷を析出し，これが地下水其の他よりの水の供給を受けて成長すると說明されてゐる．(3)

本試驗に於ては土質を黃土と定めて四圍の條件を一定とし，之に安定處理を施し，之が凍上並に凍上に伴ふ含水量の增加に基因する安定度の遲減に關し互觀的な檢定試驗を行つた．

路盤の凍害を次の三つに分けて考へる，即ち

1. 凍結融解の反復繰返しに依る路盤安定度の減少．
2. 凍上に依る含水量の增加に伴ふ安定度の減少．
3. 凍上そのものに依る路面の破壞並に交通の妨害．

この三つの見地について實驗を行つた．

本實驗に就ては黃土の路盤の凍害を防止する爲に，これに石灰，食鹽を加へその効果を判定した．

混合材を加へて凍害を防止する爲には混合物を加へたことに依つて，如何なる現象が期待されるかを豫想して實驗を進めるべきであるが，凍上機構が黃土に關して明白にされてゐない爲豫め理論的な豫想を以て行ふことが出來なかつた．

石灰を混和する意味はこれ迄北支に於て路床土に石灰を加へ"灰土"と稱して一般に使用せられてゐる工法が，凍害防止に役立つてゐるのではないかと云ふことに着目したものであり，これを實證せんと試みた．

食鹽を混和材としたことは，氷點を降下させようと考へた以外の何物もない．この場合，食鹽の混和量の有効部分を見出すことが重要なる命題となつた．

實驗は實際の路床土の狀態に近い狀態にて成型されたものにつき凍結融解反復繰返しに依る安定度減少の測定，並に下部より水分の補給を自由にして上面より冷却して凍結せしめ，(4) 凍上並に之に基く含水量の增加を測定した．

III. 試料及裝置

(1) 試料 試料は黃土3種類を用ひた．機械的分析及物理試驗の結果は表-1 に示す．圖-1 に粒徑曲線を示す．

種類のみにて實驗を進めるのが本意であつたが試料の量に制限せられ3種類の黃土を用ひて行つた．

玆に土の粒徑と凍上について Casagrande の規準を記すと次の如くである．(5)(6)

Casagrande は多數の現場について凍上を調査し，土質試驗を行つて實驗的にレンズ狀氷形成の傾向を一定の物理的數字に關係付けた．即ち粒徑の影響に關係付けることに成功した．これに依ると凍害性のあるものは次の如くである．

今土粒子の60％が通過する篩目の徑 d_{60} と10％を通過する篩目の徑 d_{10} との比 $U=\frac{d_{10}}{d_{60}}$ を不均等係數と呼び

$U \leqq 5$ にて 0.02 mm 以下　10％以上

$U > 15$ にて 0.02 mm 以下　3％以上

である様な土はレンズ狀氷を形成し易い.

これは土と水とが混つてゐて凍結するに際して，土の粒子の大小に從つて，氷の結晶の中に土の粒子が存在するか，或は氷だけ遊離して氷の結晶を形成し所謂レンズ狀氷層を形造る．この二つの場合があるのであつて，上の規準の範圍のものはレンズ狀氷を形成し易いことを示すものである．

この規準はレンズ狀氷の發生し易い條件を數値的に表はしたものであり，この規準外の $5<U<15$ の場合についても0.02mm 以下の微粒子の含有量が多い場合には勿論レンズ狀氷を發生し易いのである．Casagrande もレンズ狀氷の發生を認めないものは 0.02 mm 以下が1％を超えない場合の土壌であることを指摘してゐるが，これ等の規準は或る限定された個所の現場調査の結果であり．$5<U<15$ のものについて 0.02mm 以下の量とレンズ狀氷の發生の關係は，調査結果からは判然とするに足る規準を見出し得なかつたものと考へる．

表-1

		No. 1	No. 2	No. 3
機械分析	砂　>0.075 mm	3.6	2.7	9.9
	沈泥　0.005～0.075 mm	78.6	78.9	70.9
	粘土　<0.005 mm	17.8	18.4	19.2
	計	100.0	100.0	100.0
物理的性質	比重	2.72	2.67	2.69
	遠心力含水當量	—	9.7	10.7
	收縮限界	—	21.7	22.7
	收縮比	—	1.9	1.8
	液性限界	30.6	32.6	33.6
	塑性限界	16.1	18.2	19.8
	塑性指數	14.5	14.4	13.8
摘要		山西省	北京	北京

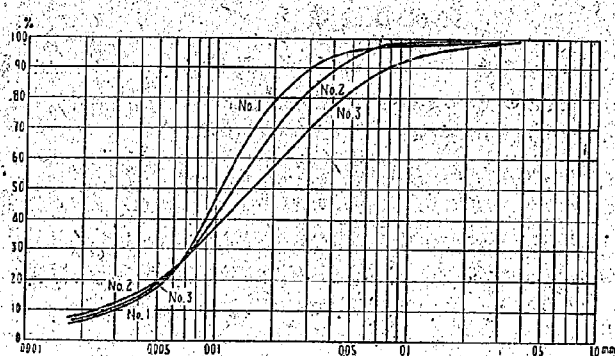
この規準に從つて本試驗に用ひた黄土の凍害性を考へて見ると，次の如くである．

黄　土　No. 1　$U=\frac{0.013}{0.003}=4.3$

同　　No. 2　$U=\frac{0.016}{0.0029}=5.5$

同　　No. 3　$U=\frac{0.022}{0.0028}=7.5$

圖-1



0.02mm 以下の量は大約*

黄土	No. 1	80%
黄土	No. 2	70%
黄土	No. 3	55%

茲に用ひた d_{10} d_{60} 0.02mm 以下の量は圖-1 の粒徑曲線より求めたものである.

以上の値にて Casagrande の規準に當嵌めると U の値は 5 より大なるものもあるが 0.02mm 以下の量の多きことに依りレンズ狀氷の形成し易いことを明かに示してゐる.

(2) 凍結融解試驗供試體

黄土 No. 1 を用ひ, 重量比にて石灰 15 %のもの及び食鹽 3 %を混和し, 水量は總氣乾重量の 15 %を用ひ混捏し之を直徑 5 cm, 高さ 10 cm. の圓壔形供試體に成型した. 成型方法は三層に分けて型枠に塡充し, 各層毎に徑 20 mm の搗棒にて壓く 20 回搗きたる後成型壓力を加へた. 成型壓力は 5 kg/cm² とし, 5 秒間載荷し 30 秒間隔に 10 秒宛 10 回載荷し, 直後に脫型した. この成型方法は, 通常の路面輾壓時の壓力に近似した 5 kg/cm² を用ひ數回の輾壓を行ひたる實際の狀況に近からしめんとした. 養生は地下室の溫度, 濕度變化少き個所に空中放置し, 毎日上下を交互せしめ 28 日後試驗を行つた.

(3) 凍上試驗供試體

內徑 5.8cm, 長 51cm, 厚 12mm の硝子管に底部にガーゼを二重にして當て紐で緊縛し, 內面にワセリンを薄く塗布したものに試料を塡充した. 試料は黄土 No. 2, No. 3 を用ひた. 試料には液性限界と塑性限界の中間程度の水量を加へ良く捏ね, 硝子棒にて搗き乍ら詰め一定液放置して安定せしめた. 硝子管には熱電對の接點を挿入する孔を側面にあけておき, 試料を塡充したる後接點を挿入し孔は膠付けで封じた.

(4) 凍上試驗用箱

圖-2 の如く二重箱とし, 側面及び底面よりの冷却を防ぎ, 上面よりのみ熱の出入を許す如く設計した. 內部の箱には氷を入れ, 凍上に伴ふ水の吸上げを自由ならしむる如くした.

圖-2

(5) 冷 却 室

內務省土木試驗所地下室の低溫室を用ひた.

IV. 實 驗 の 說 明

〔1〕 凍結融解繰返し試驗

本實驗に於て行つたことは, 通常の含水量を有する土の凍結融解に依る安定度 (壓縮强さにて表す) の遲減を求めたものである.

凍結融解に依つて如何なる過程に依り安定度が減少するかを推說すれば (1)間隙率の多少 (2)含水量の多少 (3)冷却速度の大小 (4)冷却時間の長短等の影響に著しく左右されることは推定出來る. 之等の影響に基き土粒子の結合構造が變化し安定度が遲減する. 安定度の遲減は融解時に起るもので, 丁度夜間の氣溫降下に伴ひ地盤が凍結し, 日中直射日光に依つて融解し, これが繰返されて地耐力が減少する現象を考へれ

* 粒經分布曲線から拾つた値である.

ばよい.

實驗に當り低温室は -60°C～-8.50°C とし，高温室は 13°C～20°C に保つた．24時間置きに低温室—高温室—低温室と入換へを5回反復したる後，直ちに壓縮試驗を行つた．表-2 はその結果を示す.

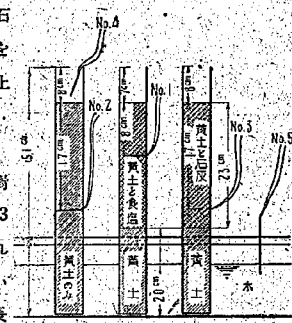
表-2

	試料	成型直後 高サ cm	成型直後 重量 gr	成型直後 間隙率 %	成型直後 含水率 %	凍結融解試驗直前 高サ cm	凍結融解試驗直前 重量 gr	凍結融解試驗直前 間隙率 %	凍結融解試驗直前 含水率 %	壓縮試驗直前 高サ cm	壓縮試驗直前 重量 gr	壓縮試驗直前 間隙率 %	壓縮試驗直前 含水率 %	壓縮強サ kg/cm²
氣乾セルモノ	黄土	10.03	381.8	38.86	14.67	—	—	—	—	9.98	330.5	30.57	3.18	15.0
	黄土＋石灰	9.82	306.0	48.73	12.59	—	—	—	—	9.81	276.0	48.57	2.89	2.9
	黄土＋食鹽	10.00	378.3	37.45	13.16	—	—	—	—	10.00	356.3	38.43	7.80	4.0
凍結融解セルモノ	黄土	10.25	379.3	40.62	14.61	10.20	338.2	39.85	3.64	10.20	335.6	39.87	2.72	8.5 (57%)
	黄土＋石灰	9.96	305.6	49.51	12.59	9.94	278.3	49.23	3.67	9.94	277.2	49.22	3.24	1.8 (61%)
	黄土＋食鹽	9.90	378.7	37.45	13.31	9.86	357.6	37.16	7.74	9.88	355.8	37.16	7.28	3.4 (85%)

之に依つて見ると凍結融解に依る壓縮强さの低下の割合は石灰並に食鹽を加へたるものが少であり，繰返し凍結融解に依る安定度減の防止策として，石灰，食鹽の混和は有效であることが判る.

〔2〕 凍上試驗（其の 1）

圖-3



供試體は3本用ひた．第1は黄土 (No. 2) のみ第2，第3は食鹽，石灰を3%混じたものを塡充した．試料塡充は 圖-3 の如く食鹽及石灰を加へたものはガラス管底部より 20cm の深さ迄黄土のみを入れ，この上に混合材を加へたる試料を詰めた．熱電對の位置は 圖-3 の通りである.

温度觀測結果

低温室温度を -20°C に調節しつゝ温度を低下せしめたるとき熱電對接點の挿入個所に於ける温度降下狀況は 表-3 に示す如くである．表-3 より混合材を加へたる際も熱傳導率は殆んど變化しないことが觀察された．又レンズ狀氷の生成に依る熱傳導率の變化は實驗の繼續時間が短いので大なる影響を現して居ないが，この實驗に於てはレンズ狀氷の生長が其れ程大きくない事に依ると思はれる.

凍結狀況

凍結を開始してから44時間，冷凍室が -20°C になつてから22時間目に取出した.

此の時黄土のみ及びこれに石灰を加へたものゝ表面下 17cm の深さに於ける温度は +1.6°C であり，食鹽の場合は深さ 8cm に於て -3.3°C である.

黄土のみとこれに石灰を混和した場合は両方共レンズ狀氷を形成して凍結して居たが，食鹽を加へた場合には全くこれは認められなかつた.

凍上現象は，實驗裝置の關係上正確なる凍上量は求め得難い．而してレンズ狀氷の形成に依り石灰を加へたるものが 2～3 mm の持上りを示したのみであつた.

表-3

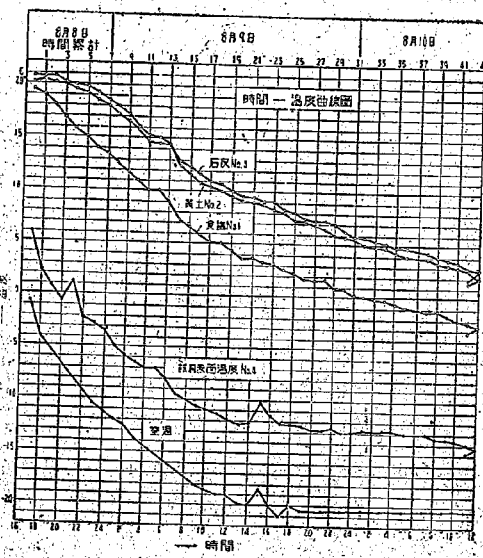
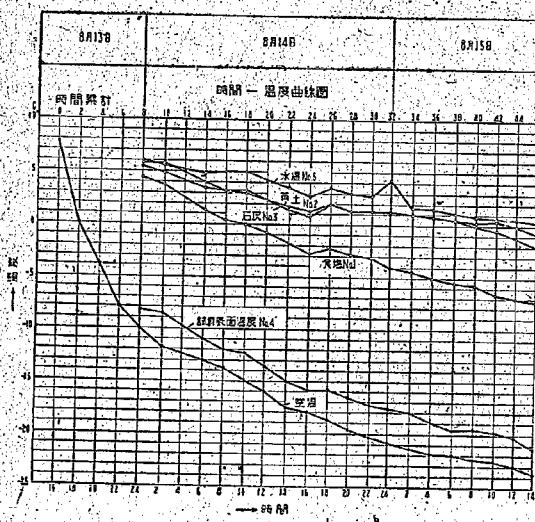


表-4



凍結深は黄土のみの場合 12.5～3 cm, 石灰を加へたる場合 11.0～11.2 cm, 食鹽を加へたものは凍結しなかつた.

次にレンズ狀氷の出來方を見ると, 氷層の出來方は黄土のみと石灰を加へたるもの兩方共表面直下 1.3～2cm の間に最も密に生ずるが, 1 cm 當りの氷層の數は最も密な場所で, 黄土のみの場合 12 層. 石灰を加へたる場合では 16.5 層で, 前者の方が氷層の厚みは大である. 猶黄土のみの場合は, 氷層は凍結部下端迄一樣な割合で減少してゐるが, 石灰を加へたる場合は凍結部中央附近以下には氷層の存在は觀察できなかつた.

融解後再凍結

以上の實驗を行つた試料を其の儘常温にて融解せしめ再び -30°C 迄冷却した. 温度降下狀況は 表-4 の如くである. 此の間に於ても食鹽を含んだものは凍結しなかつた. レンズ狀氷の出來方は前回と殆んど同じであり, 又凍結深は明確に認め得なかつた. 再凍結の狀況を寫眞に撮影したものを 圖-4 に示す.

次いでこの試料を常温で融解し再び直冷却した. この温度降下狀況は 表-5 の如くである. この三回の凍結融解の實驗後, 凍結部の含水量の增加狀況を調べたものを 圖-5 に示す.

〔3〕 凍上試驗 (其の 2)

今回の實驗に於ては試料を同一種類のものを管全體に詰めて行つた. 試料黄土は分量の關係上前回と同一のものを使用し得ず黄土 No. 3 を用ひた. 石灰及び食鹽の混和量は 10 % とし填充時の含水量は前回と同一とした. 熱電對挿入狀況は 圖-6 の如くである.

冷却は -10°C とし, 42時間冷却室にて冷却した. 温度降下狀況は 表-6 に示す.

圖-4 (a)　黄土のみのもの

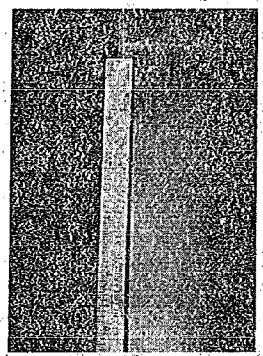


圖-4 (b)　石灰を加へたるもの

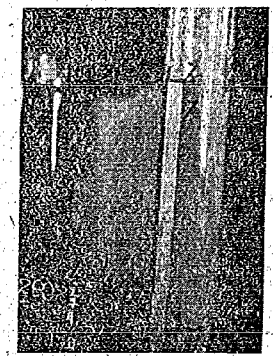
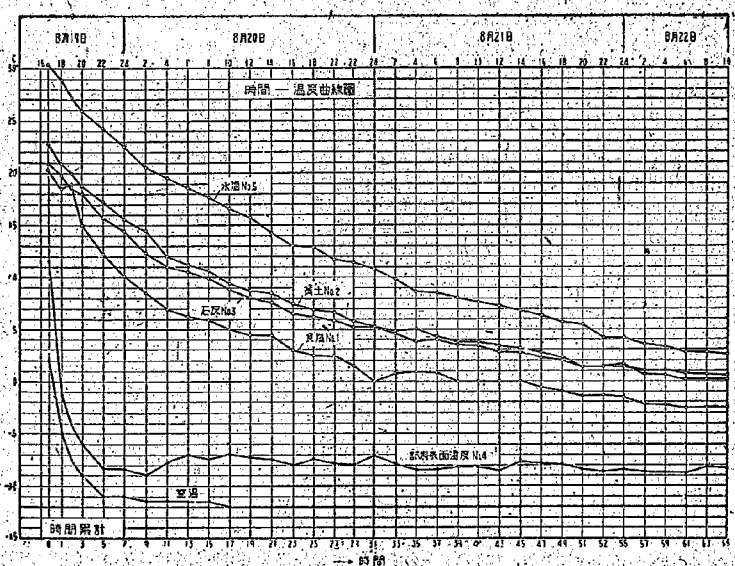


表-5



凍結狀を記すと，レンズ狀氷の生成狀態は，前回の實驗と略同樣であり，凍結深は相當の差異を示した．

即ち　黄土のみ　7.6 cm

黄土+食鹽　凍結を認めず

黄土+石灰　4.5 cm

凍結前後の含水量の變化は 圖-7 の如くであつた．

圖-5

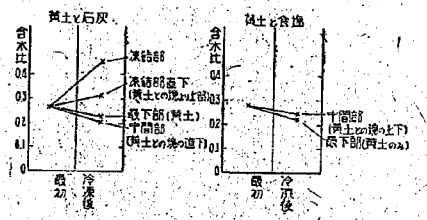


圖-6

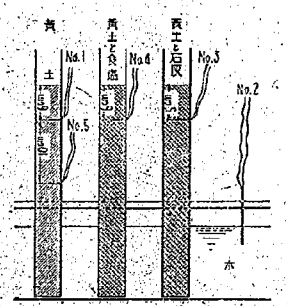


表-6

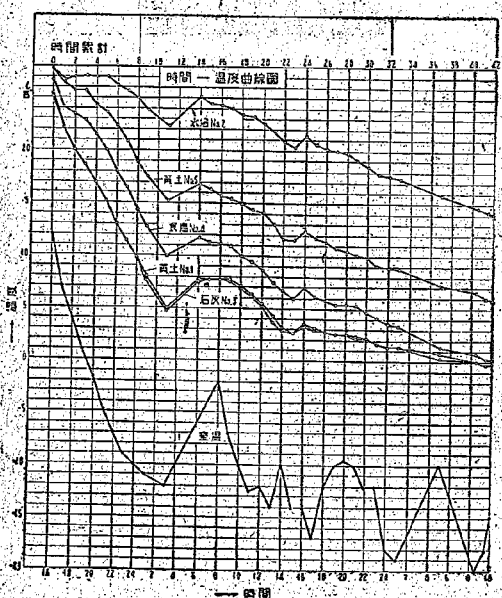
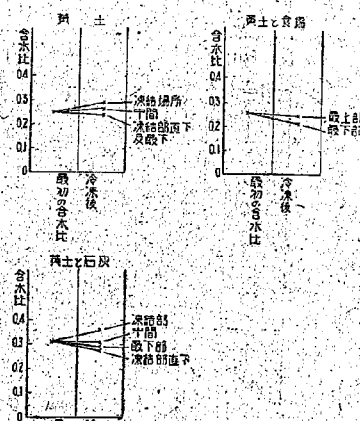


圖-7



V. 結　　論

1. 本試驗に於ける結果に依ると，黄土路床上の凍結融解による安定度の減減度は，その含水程度が乾燥期に於ける狀態に近き場合（含水率60％内外）石灰，食鹽等の混和に依り30％乃至50％減少する．

2. 黄土（天然に堆積したもの及び天然堆積のものが水で流されて沈澱したもの）は一定量以上の含水量を有する狀態で冷却される時は，凍結してレンズ狀氷を形成する．從つて凍上を生ずる可能性は見出される．

3. 黄土に石灰を混和したる"灰土"は一定量以上の含水量を有する狀態で冷却される時は矢張りレンズ狀氷を形成する．但しこの場合は黄土のみの場合に比較し，凍結深さ20～80％減少する．

4. 食鹽を混和したものは凍結しない.

本試驗は種々の事情で相當不滿の點が多いが豫備試驗と云ふ意味で玆に擱めて報告した. 本試驗は昭和16年7月より昭和17年8月に亘り實施したもので當時東京帝國大學學生一の瀧明孝君（現陸軍兵技中尉）元本所員山内正吾君, 新谷政治君, 鈴木秀藤君の手を煩はせた.

參　考　文　獻

(1) Stephen Taber: Frost Heaving. Journal of Geology Vol. 37. 1929. p. 428.

(2) Stephen Taber: The mechanics of frost heaving. Journal of Geology Vol. 38. 1930. p. 303.

(3) Hogentogler: Engineering properties of soil. p. 217.

(4) Stephen Taber: Freezing and thawing of soils as factor in the destruction of Road Pavement. Public Roads Vol. 11. p. 113.

(5) Bodenmechanik und neuzeitlicher Strassenbau (Schriftenreihe der "Strasse" 3) 1936 s. 32.

(6) Eine Zusammenfassung und gute Literatur übersicht gibt 2. B. Münichsdoifer in: Geologie und Bauwesen (1934). 3

我國沿岸の漂砂に關する調査報告（第2報）

囑　託　本　間　仁

目　次

序　言……（1）
I　東太平洋岸……（1）
II　南太平洋岸……（4）

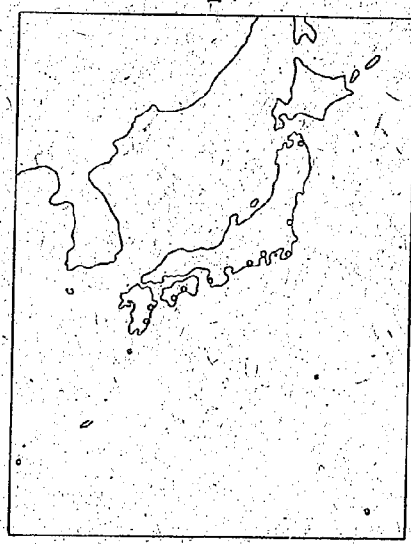
序　言

著者は本調査報告第1報[1]に於て日本海岸の漂砂移動狀況を日本海に注ぐ河川の河口洲變遷狀態の調査資料によつて推論した．第2報に於ては太平洋岸各地の漂砂移動を同樣の方法によつて推論せんとするのである．本報告中に對象とした地點は圖-1に示した約10箇所である．

I 東太平洋岸

我國沿岸に於て漂砂による砂洲の發達の主な原因となつてゐるのは，河川の渴水期に當る冬季の顯著な季節風である．然し我國東部の冬季季節風は大體 *NW—W* であるから，東海岸では之が海風とならず漂砂を支配する事が少い．從つて太平洋岸での漂砂はその地方の海風と局地的な地勢とによつて定まり，東太平洋岸全體としての顯著な特徴は殆んどなく，日本海岸の場合の樣な一般性は認める事が出來ない．この點に就ては太平洋岸全體に言へる事であつて，更に又太平洋岸には沈下性海岸[2]の少い事も漂砂が一般に著しくない事の一つの原因となつてゐると考へられる．

圖-1



東太平洋岸各地の海岸勾配に關しては，前回の報告と同樣に海岸線にほぼ直角に測つて，水深 0 から 50 m の處までの距離 a と，水深 50 m から 100 m の處までの距離 b とを 1,000,000 分の 1 の地圖から讀み取つた略値を示す．（表-1參照）

次に各河川に就て北から述べて行く．

(1) 馬淵川河口（圖-2）

馬淵川は青森縣東海岸の南部に於て太平洋に注ぎ，河口附近で新井田川に合してゐる．海風の中で著しいのは *NE—ESE* の方向と *WNW* の方向との二つがあるが

1) 報告第64號．「日本海岸の漂砂に就て（我國沿岸の漂砂に關する調査報告．第1報）」昭和17年1月．
2) 報告第64號．60頁參照．

表-1 海岸平均勾配表

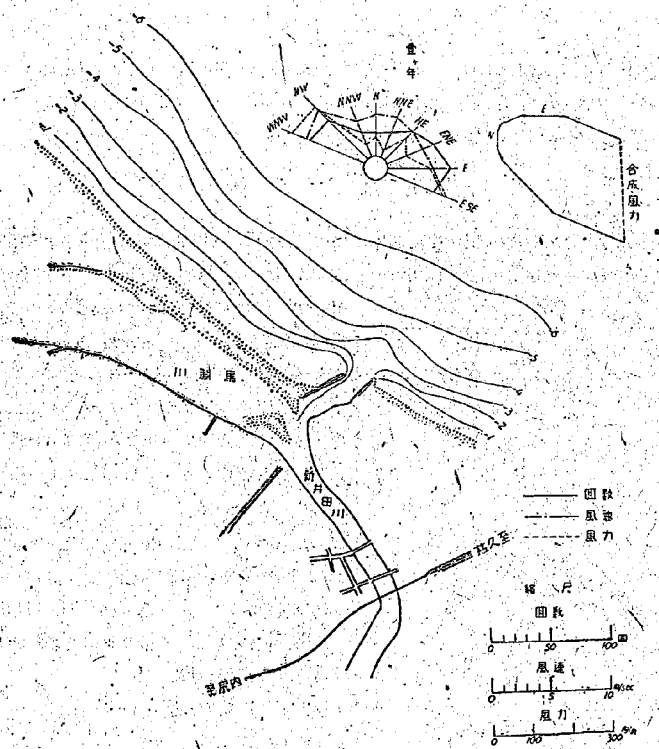
場所	a(km)	b(km)	場所	a(km)	b(km)
八戸	9	9	那珂湊	12	5
金華山	1	1	鹿島浦	10	5
阿武隈河口	30	12	銚子	14	5
小名濱	6	6	九十九里濱	20	10
久慈(茨城)	10	6	白濱	3	3

地勢的には東方に鮫港を囲む館鼻が出てゐる爲に砂洲は西北から東南東に向つて延びてゐる.

圖-2 は某年に於ける砂洲の形及び附近の潮流圖である. 附近の沿岸潮流も南東に向つてゐるが, その强度は甚だ微弱である.

岩手縣沿岸には一般に著しい漂砂が見られない. 宮城縣では阿武隈河口があるが, その河口洲は北から南に向つてゐる.

圖-2



(2) 久慈川及び那珂川

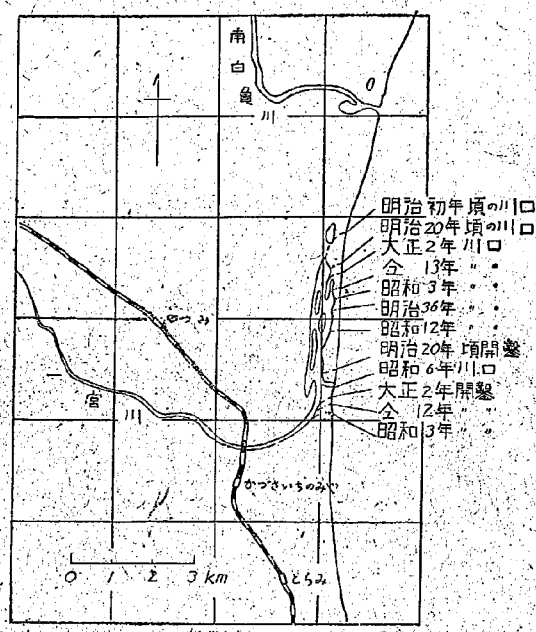
茨城縣久慈港に於て海に注ぐ久慈川の河口地方では, 最多風としては *WNW—NW* であるが, 之に次いでは *NNE—NE* であつて之が海風である爲に漂砂に影響するものである. 然し地勢的には左岸側に小さい岬がある爲に河口洲は南から北に向ふ傾向があり, 波も多くは南から來る. 茨城縣廳に於て大正 10 年 5 月に屑瓦 5 俵を河口南方の海岸に投入した所, 1 ヶ月半にして北東又は南方の海岸に 1, 2 ヶ所漂著した. その他の調査によつ

ても明瞭な漂砂移動方向は認められてゐない.

那珂川の河口漂砂[3]に就ては既に報告第 59 號に於て述べた. 過去に於ける當河口の洲の發達狀況は同報告の圖-6[4]に示した樣に常に南から北に向ふ傾向がある. 當地の南方に當る磯濱に於ても漂砂が南から北に動いてゐる事は周知であつて, 冬季の海風が *NNE—NE* であるにも拘らず砂が南から北に向つてゐる點は之等3地方に共通である.

利根川河口銚子對岸の砂洲に就ては松尾技師の調査によれば[5]砂洲の消長が風に支配されてゐる事が比較的明瞭であつて, その方向は地勢上から明かに想像される樣に北から南に向つてゐる.

圖-3



(3) 一ノ宮川河口 (圖-3)

一ノ宮川は千葉縣東岸一ノ宮町北方に於て太平洋に注ぐ河川である. この附近の海岸は所謂九十九里濱の一部をなし, 砂の動きも多い處であつてその方向は, 圖-3 に示す樣に大體北に向つてゐる. 風は *S* 乃至 *W* が多い.

當河口の北に移動する傾向は相當に顯著であつて, 明治20年, 大正2年, 同13年等は河口を海に直通せしめる開鑿工事が行はれたが, 間もなく又北に向ふ河口洲を生ずるので昭和2年には開鑿と同時に河口に三角枠を組立て, 之を漸次延長して河心を海の方に向はせ, 昭和3年6月の洪水によつて流路を完全に東に向はせた. 同時に三角枠は撤去された. 然しその後も河口は安定せず, 依然として北に移動しつつある.

3) 報告 50 號. 「那珂川河口の漂砂に就いての實驗」昭和 16 年 2 月.
4) 報告 50 號. 133 頁.
5) 土木學會誌, 23 卷, 1 號, 松尾春雄「利根川河口の砂洲の消長に就て」.

II. 南太平洋岸

南太平洋岸の名の下に本州南岸，四國南岸及び九州の東岸南岸を包括する．從つてその延長は甚だ長く，各地の狀況もかなり區々である．先づ各地の海岸勾配を次の表に示す．表中の a，b，は第1表の場合と同じく海岸線にほゞ直角に測つて，水深0から50 m の處まで及び水深 50 m から 100 m の處までの距離の略値である．

表-2 海岸平均勾配表

場所	a(km)	b(km)	場所	a(km)	b(km)
下田	2	4	室戸岬(東方へ)	1	2
蒲原	1	1	〃 (西方へ)	1	4
御前崎	2	6	高知	5	12
天龍川河口	1	2	渡川河口	3	7
波切(三重)	2	2	延岡	6	7
新宮	2	4	宮崎	13	7
御坊	7	11	佐多崎(鹿兒島)	1	3

圖-4 狩野川河口 (1)

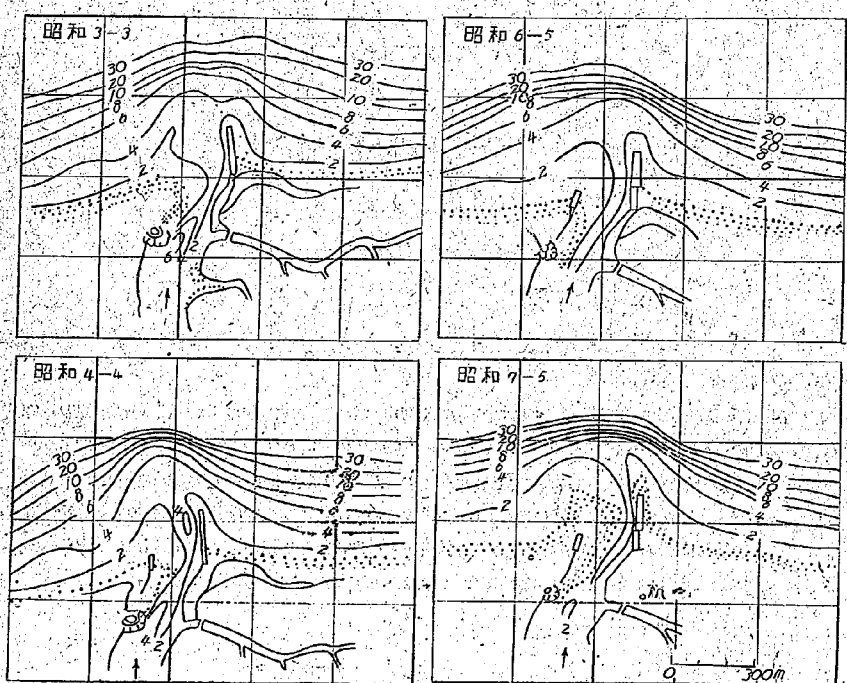
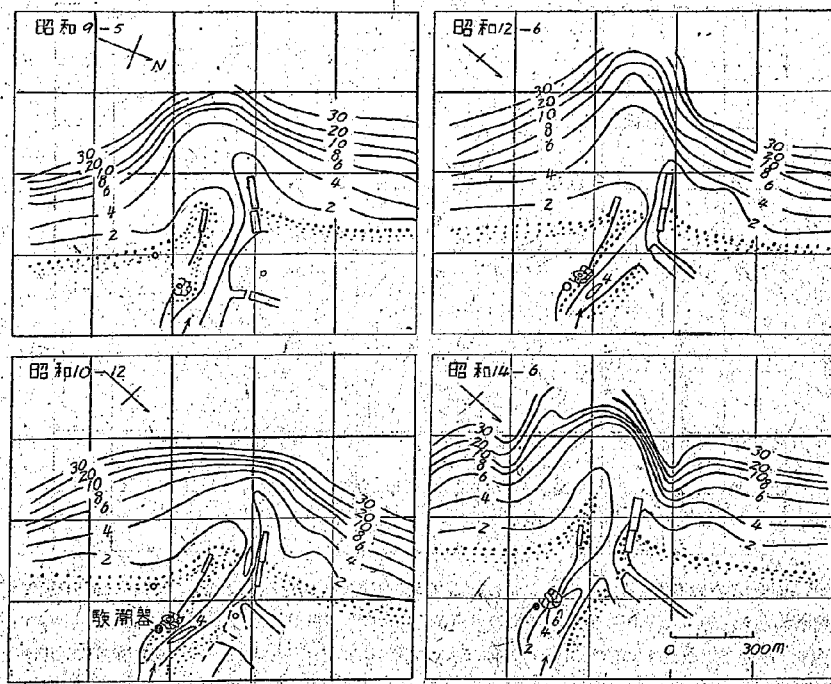


圖-4 狩野川河口 (2)



隆起性海岸として顯著なものは九州東岸等に見られるがこの地方の五箇瀬川，大淀川等の河口にも砂の移動が認められてゐる．以下は各地の河口砂洲變動の狀況を列記して行く．

(1) 狩野川河口 (圖-4)

狩野川は伊豆半島を北流する河川であるが，河口附近で黃瀨川を合せほゞ西流して駿河灣の東北隅に注いでゐる．沼津地方の風は冬季は *ENE—E* が多く，夏季は *SW—W* が多いが，强さに於ては *NE* が最大であり，*SW* は之よりやゝ弱い．昭和3年より14年に至る間の河口附近の海岸線並に等深線の變化を圖-4に示した．之等の圖によれば砂洲は南東から北西に向つて延びる傾向が見られる．原因は海風による樣に考へられ，その移動砂量は少くない樣である．

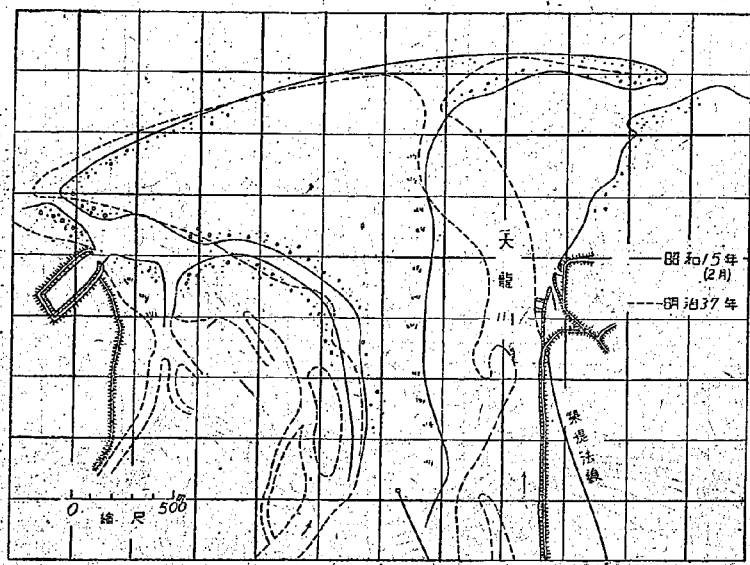
(2) 天龍川河口 (圖-5)

天龍川の東方に當る富士川は相當に流出土砂の多い河口であり，漂砂は比較的少いが，河口の形は三角洲狀をなしてゐる．然しその三角洲はあまり發達しない．その原因は當河口附近は沖灘[6] 區域で海岸勾配が $\frac{1}{100}$ ～ $\frac{1}{150}$ 程度であるが，それから先は急に深くなり勾配は $\frac{30}{100}$ 程度になる．之は漂砂の少い原因にもなつてゐる．

天龍川もその狀態に於て富士川に類似してゐる．即ち河口の形は三角洲狀であつて，その生長は極めて緩慢で

6) 報告59號61頁．

圖-5 天龍川河口



ある．海岸の勾配は急である爲に 圖-5 に示した線に砂洲の正面は殆ど前進してゐない．又その大きさに於ても變化が認められない．この地方の風は冬季に於て NNW—WNW が著しいが夏季には SW 又は E の風が多い．然しこの資料だけでは海岸の砂礫が何れの方向に動いてゐるかの推定は困難である．唯その東方御前崎附近はその形から言つて東に向つてゐると見てよい樣であり，又この點から見て砂の移動が全然行はれてゐないのではない事が判る．

(3) 日高川河口

日高川は和歌山縣中部白の御崎の南方で海に注ぐ．河口の河は大體に於て直徑數糎强度の礫から成つてゐるが，波の爲に移動して相當に著しい河口洲を形成してゐる．洲の延びる方向は SE から NW に向ふ方向であり，當地方の風は海風としては殆ど S—SW である．從つて洲は地形及び風の何れから見ても北に向ふ傾向のある事は明かである．

(4) 仁淀川河口

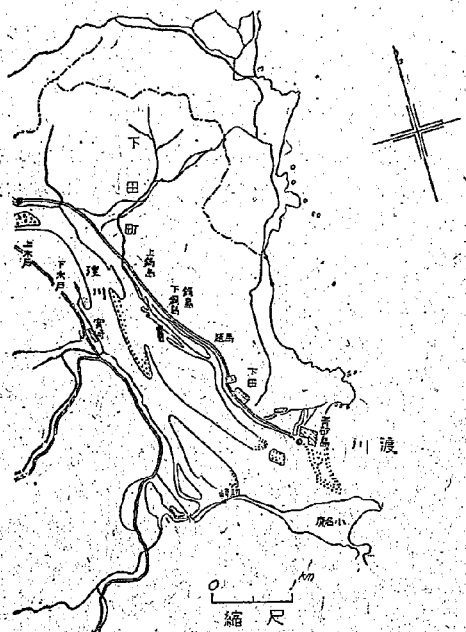
仁淀川は高知市西方に於て土佐灣に注いでゐる．本河口附近の漂砂に就ては山本工學士の詳細な調査があり，[7] その所論によれば，當地方漂砂の原因は冬季季節風による風浪の他に夏季のうねり浪が重要なものとなつて居り，特にうねりは大體北北東の方向を有して，西から東に向ふ急激な漂砂の移動を起してゐる．從つて當河口の東方にある浦戸港口に於ても著しい東向きの漂砂が見られる．

(5) 渡川河口（圖-6,7）

渡川は土佐灣の西南端附近に注いでゐるが，地勢上の條件を異にする爲に仁淀川とは洲の延び方が全く反對で

7) 山本將雄「浦戸港口漂砂問題研究及び港口計畫論」，土木學會誌，第22卷第4號，昭和11年

圖-6 渡川河口



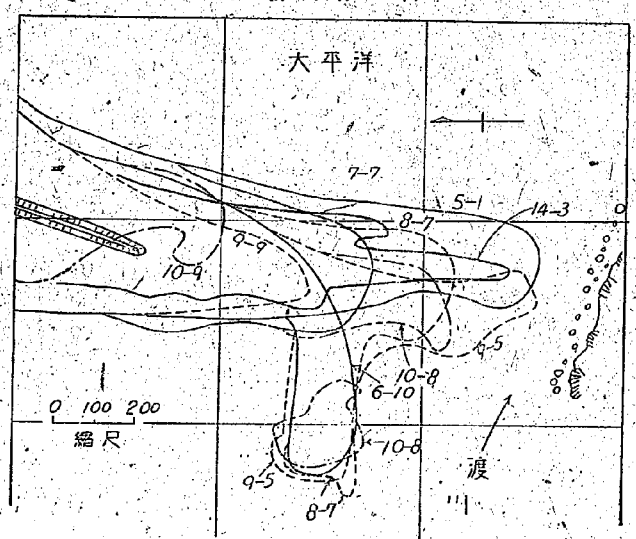
ある．即ちその西方に位する足摺岬の影響が甚だ大きい爲に河口洲は大體北から南に向つてゐる．但し附近の海岸からの砂の供給は豊富ではないから砂礫は多く渡川自身から流出するものと考へられる．

圖-7 は河口洲の變遷狀態を示すものであつて，附記した數字は例へば 9-5 ならば昭和 9 年 5 月の實測である事を表はしてゐる．之から見ると洲は夏の洪水によつて後退する以外は大體定まつた形を保つて居り，河口洲の西側に更に一箇の洲が出來る傾向が認められるが，之は潮汐による局部潮流の影響かと推察される．

(6) 五ヶ瀬川及び大淀川河口

五ヶ瀬川は延岡市附近に於て日向灘に注ぐ河川である．當地方の季節風は冬季は N であるが夏は ESE が著しい．河口左岸即ち北側には岩盤露出し，砂洲は南側から延びる．宮崎縣廳土木課の調査によれば砂洲は冬季の渇水期中に發達して河口幅は 180 m 程度と

圖-7 渡川河口洲



なり，之が夏季の增水及び颱風季の洪水によつて 270 m 程度に擴大される．然し漂砂の移動量としては颱風季に著しい．

大淀川河口地方は四季を通じて W—NW の風が多いが，海風としては夏季の NE—E である．而て當河口漂砂は北から南に向ひ，之は當河口附近を通じての傾向であると思はれる．

附　　記

本報告の資料は主として內務省の各土木出張所，又は諸府縣廳の土木課から提供されたものであつて，關係各方面の御援助に對して深甚の謝意を表すると共に，尙今後も資料の提供を受けて內容を增補して行く事が出來れば幸甚であると思つてゐる．

尙本報告では風向，深淺圖等の詳細は特に省略した．

溢流堰堤堤頂部縦斷形狀の溢流係數に及ぼす影響に關する水理實驗

內務技師　竹　內　俊　雄

要　旨

某堰堤工事にあたり提案された堤頂部形狀を少しづつ變形せしめた3種の溢流堰堤の模型に就き溢流深と溢流係數との關係を求めたところ，Creager の形狀に近いものが同じ溢流深に對して最も大きい溢流係數の値を示したが，此の程度の變形では計畫溢流深に對して大差無い事を知つた．

尙堤頂面の受ける靜水壓を測定したところ，計畫溢流深に對してやはり Creager の形狀に近いものが低壓を生ずる傾向が最も少い事が判つた．

目　次

I. 實驗の目的……（1）
II. 堤頂部縦斷形狀……（2）
III. 實驗裝置……（4）
IV. 實驗値……（8）
V. 結　語……（11）

（本實驗は横田技師御指導の下に昭和17年1月より昭和17年4月まで行つたものである．實驗中石井靖丸君より受けた有益な助言並に實驗を擔當された八木技手，濱野敬君，高山龍雄君の努力に對し深甚なる謝意を表する次第である．）

I. 實驗の目的

溢流係數に影響を及ぼす要素は極めて多いのであるが，此所では其の中溢流深と堰堤構造物形狀とを考へる事にする．

嘗に當所八木技手は此所で取扱つて居る程度の鋭頂堰に於て溢流係數が溢流深の一次函數で表はせるといふ事を實驗より求め，或る模型堰堤に對して次の如き形を示された．

$$C=1.38+4.19\,H$$

玆に

C: 溢流係數

H: 溢流深（單位　米）

但し實驗は溢流深 $H=0.024\sim0.188$ $(m=0.14\sim1.11)$ の範圍で行つた．$m=\frac{H}{H_0}$ で H_0 は計畫溢流深を表はす．

溢流深と溢流係數との間には上に述べた直線的關係が存在する事を一應認め，此の直線式の常數項の大さが堰堤構造物形狀によつて如何に變化するかを實驗的に確かめんとしたものである．

堰堤構造物形狀としては次の如きものが考へられる．

(1) 堰柱 (pier) の絞り度

(2) 堰柱の形狀及位置

(3) 堤頂部縱斷形狀

既に山本弘之氏[1]は堰柱の形狀及堤頂部形狀を一定に保つた場合絞り度が C と H との關係に及ぼす影響を實驗され，絞り度の大きい程同じ H に對して C は大きくなる事を求められた．

更に其の追加報告[2]に於て堰柱の絞り度，堤頂部縱斷形狀を一定に保ち堰柱の形狀及位置を變へこれが C と H との關係に及ぼす影響を求められた．

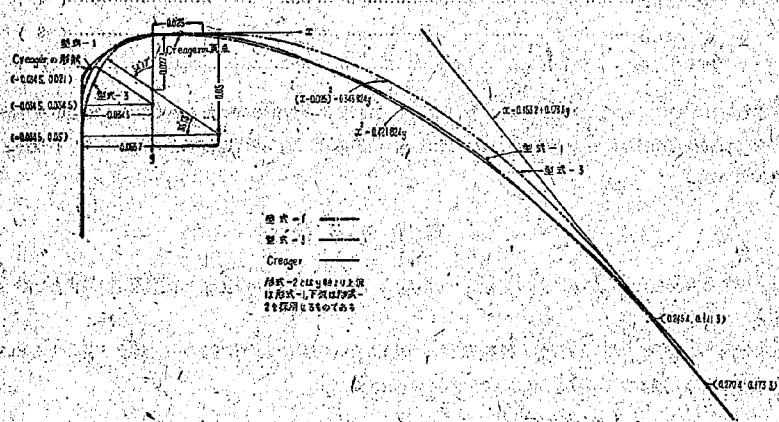
本實驗に於ては堰柱の絞り度，形狀，位置等を一定に保ち堤頂部縱斷形狀のみを變へた場合に C と H との關係は如何に變化するかを3種類の堤頂部縱斷形狀について求めた．更に構造物としての安定を考慮する目的で堤頂面の受ける靜水壓を測定し，低壓の生ずる傾向を確かめた．

II　堤頂部縱斷形狀

實驗に用ひた3種類の堤頂部形狀は計畫溢流深10米に對する Creager の形狀を基準とし，之を少し變形した形狀である．圖-1，表-1 に其の値を示してある．此の僅かな變形が溢流係數及堤頂面の受ける靜水壓にどの程度の影響を及ぼすものであるかを實驗により求めた．

計畫溢流深 10 米に對する實物堤頂部縱斷形狀を $\frac{1}{60}$ に縮めて 圖-2 に示す樣な3種類の模型を製作した．此

圖-1　堤頂部縱斷形狀



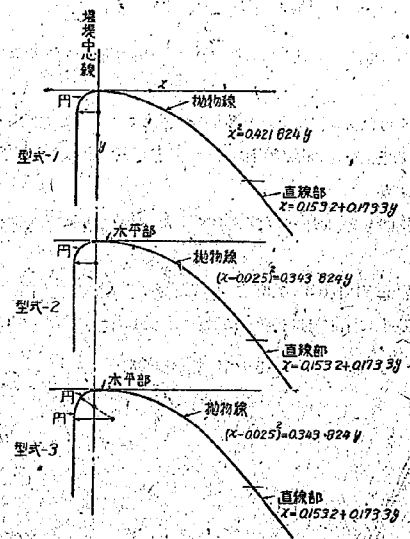
の際堰堤上流側垂直面，堤頂點，堰堤下流側傾斜面は何れも一定に保ち，堤頂點の前後の曲線部の形狀のみを變へた．堤頂部縱斷形狀を表はすのに原點を堤頂點に置き，x, y 軸の方向を圖に示す方向にとる事にした．

型式-1

堰堤上流側垂直面と堤頂點とを $\frac{1}{4}$ 圓で結び，堤頂點に頂點を有し堰堤下流側傾斜面に接する拋物線を挿入した．

1) 土木試驗所報告第66號．山本弘之「堰堤の溢流係數に關する模型實驗」
2) 同　　「　　同　　(追報)」

圖-2　模型堤頂部縱斷形狀



堰堤上流側垂直面上の一點 $(-0.034\,5,\ 0.034\,5)$ と堤頂點とを堰堤中心線上に中心を有する半徑 $0.034\,5$ の $\frac{1}{4}$ 圓で結ぶ．堰堤上流側垂直面及 x 軸は此の圓の切線になる．堤頂點に原點を有し，堰堤下流側傾斜面

$$x=0.153\,2+0.173\,3y$$

に切する拋物線

$$x^2=0.421\,8y$$

を描く．此の切點の座標は $(0.270\,4,\ 0.173\,3)$ である．

型式-3

堰堤上流側垂直面と堤頂點とを 2 つの圓弧で結び，堤頂點より水平部を設け，此の水平部の端に頂點を有し堰堤下流側傾斜面に切する拋物線を挿入した．

堰堤上流側垂直面上の一點 $(-0.034\,5,\ 0.05)$ に於て切する半徑 $0.066\,7$ の第 1 圓を描く．此の圓の中心に於て水平に對して $35°13'$ の角度をなす半徑が堰堤中心線 (y 軸) と交る點に中心を置く半徑 $0.027\,3$ の第 2 圓を描く．第 2 圓は第 1 圓と滑に連り且堤頂點に於て x 軸に切する．堤頂點より x 軸に 0.025 の水平部を設け，此の水平部の端に頂點を有し堰堤下流側傾斜面

$$x=0.153\,2+0.173\,3y$$

に切する拋物線

$$(x-0.025)^2=0.343\,8y$$

を描く．此の切點の座標は $(0.245\,4,\ 0.141\,3)$ である．

型式-2

堰堤中心線より上流側は型式-1 を，下流側は型式-3 を採用した形狀である．

III. 實驗裝置

堰堤を 2 次元的に取扱つて，堰柱を 4 徑間取入れた縮尺$\frac{1}{60}$の模型堰堤を幅 1 米の矩形水路内に造り實驗を行つた．(圖-3)

模型使用水量は樋頭水槽に設けた檢定濟幅 1 米矩形堰の溢流深より求める事が出來る．堰堤上流側水路は延長 12.6 米ある．溢流量が多くなると水面の動搖が現れ堰堤上流側 1.5 米の溢流深測定に困難を感じた．

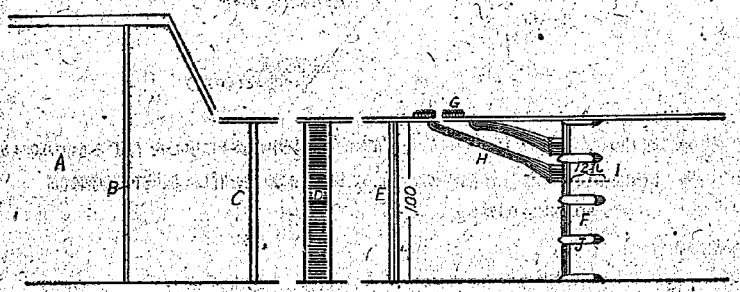
堤頂點は水路床上 0.436 に在る．

堤體はモルタルで仕上げ表面は出來る丈滑になる様に磨いた．純溢流幅は 4 徑間合計で 0.790 ある．依て此の場合の絞り度は 0.793 となる．

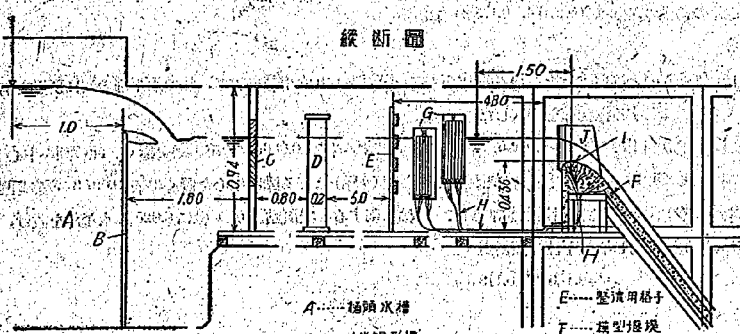
型式-1, 2, 3 に對して堰堤上流側垂直面，堤頂點，堰堤下流側傾斜面は固定し，堤頂點の前後の曲線部の形狀を變へた．此の場合堰柱は 圖-4 に示す様に各形狀に對して一定に保つてある．堰柱は杉材を用ひ圖に示す様な

圖-3 實驗裝置

平面圖



縱斷圖



A……樋頭水槽
B……1米矩形堰
C……整流用梯戸
D……鋼狀整流戸
E……整流用格子
F……模型堰堤
G……靜水圧測定用ガラス管
H……連絡ゴム管
I……堤頂面の受ける靜水圧測定用孔
J……堰柱

圖-4 堰柱詳細

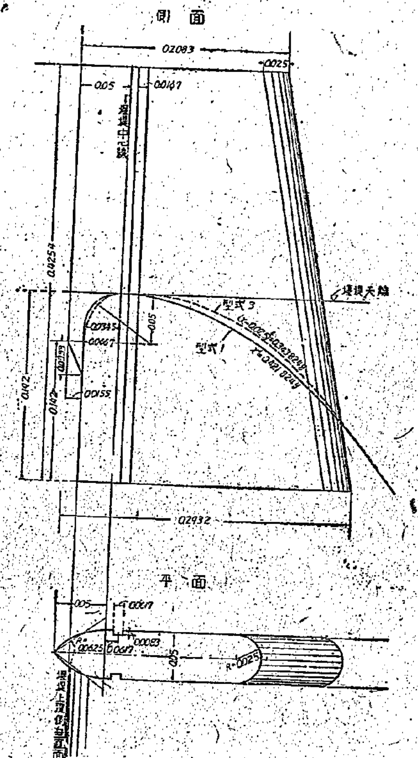
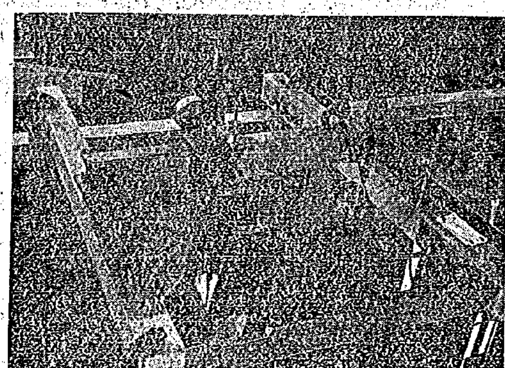


圖-5 水面測定器



扉溝を附した.

左岸より第2徑間の中央に於て水平面上を縱斷方向に移動する樣に水面測定器を据付けて（圖-5）各溢流深に對する水面の縱斷形狀を測定した. 此の場合の水面形狀は 圖-6 に示す樣なものである.

水脈縱斷形狀を測定したのと同じ徑間に於て堤頂面に 圖-7, 圖-8, 表-4 に示す位置に12箇の孔をあけ堤頂面の受ける靜水壓を測定した. 孔は堤頂面に垂直ならしめ流速の入らぬ樣に注意した. 圖-9 に示すガラス管と靜水壓測定用孔とをゴム管で連絡して, 溢流時堤頂面の受ける靜水壓をガラス管內の水柱の高さで讀む樣にした.

圖-6 水脈形狀

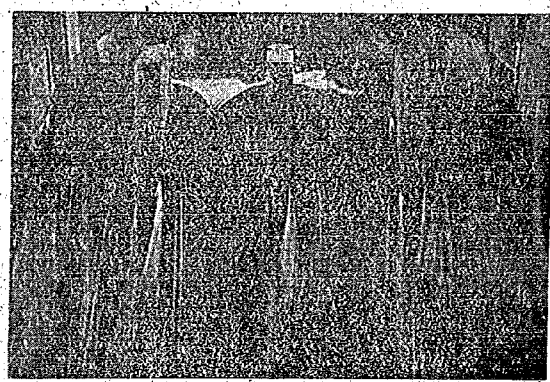


圖-7 靜水壓測定用孔

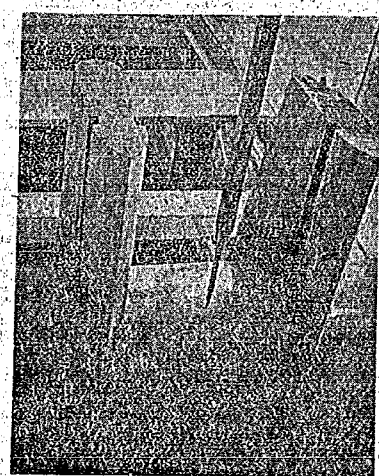


圖-8　靜水壓測定用孔の座標（設計）

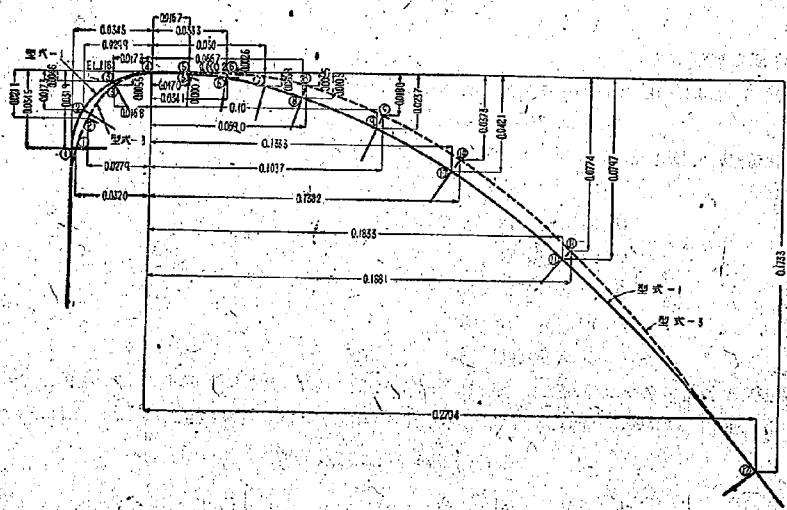
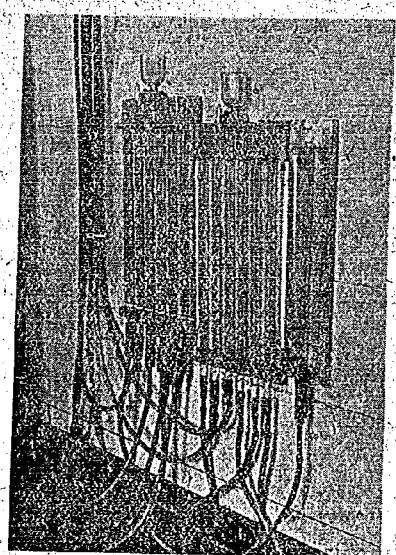


圖-9　靜水壓測定用ガラス管



IV. 實驗値.

[1] 溢流係數

型式-1, 2, 3 に對して溢流量と溢流深とを測定し，接近流速を考慮した流量公式

$$Q=CB\left\{(H+h_a)^{\frac{3}{2}}-h_a^{\frac{3}{2}}\right\}$$

より溢流係數を計算した.

玆に

Q: 溢流量 (立方米/秒)

C: 溢流係數

B: 純溢流幅 (米)

H: 溢流深 (米)

h_a: 接近流速水頭 (米)

溢流深と計算より求めた溢流係數との關係を 圖-10, 表-2 に示す. 型式-1 は 圖-1 よりわかる樣に此の計畫溢流深に對する Creager の形狀に最も近い形狀を有するものであつて，計畫溢流深までの各溢流深に對して他

圖-10 溢流深と溢流係數との關係

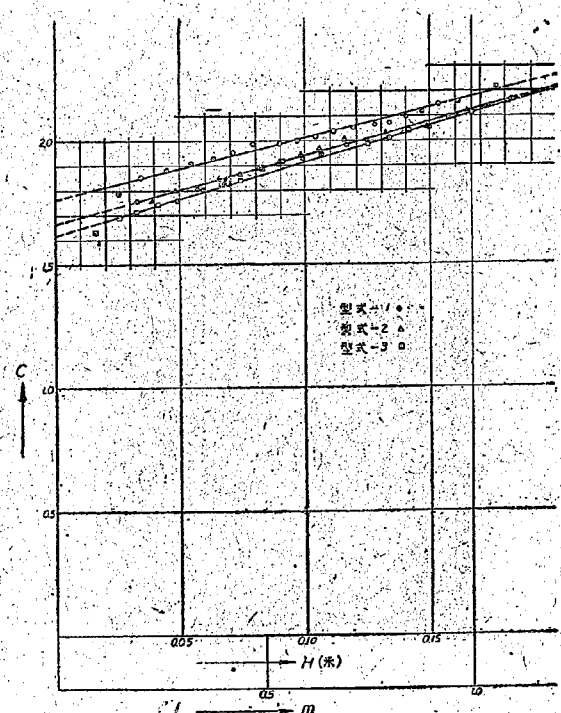


圖-11　溢流深と堤頂點に於ける水深との關係

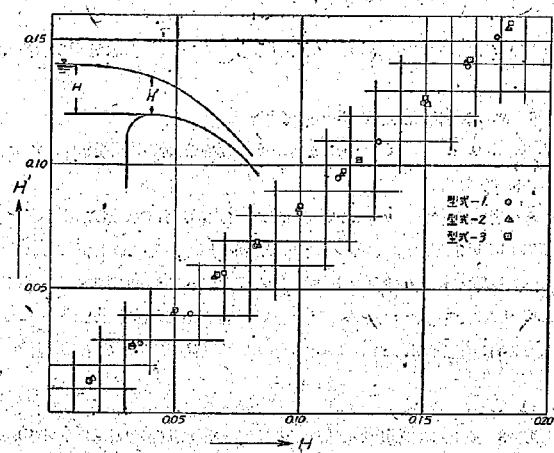
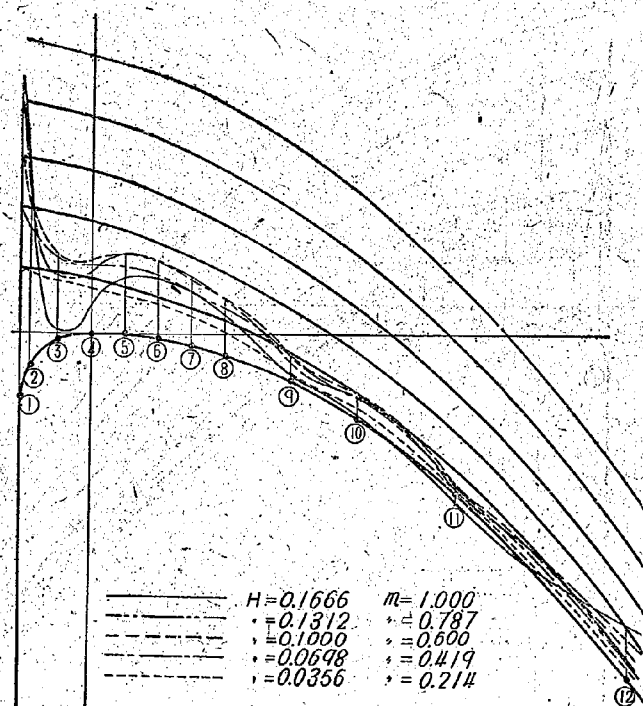


圖-12　型式-1 徑間中央に於ける水脈縱斷形狀及堤頂面の受ける靜水壓



の形狀より大きい溢流係數の値を示した．尙此の場合 $m=0.10\sim1.10$ の範圍で實驗を行つた．圖には m の値をも併せ記した．

參考の爲に堤頂點上の水深 H' と溢流深 H との比を求めた．$n=\frac{H'}{H}$ は溢流深の增加と共に僅か增して居る．(圖-11，表-3)

[2] 徑間中央に於ける水脈縱斷形狀及堤頂面の受ける靜水壓

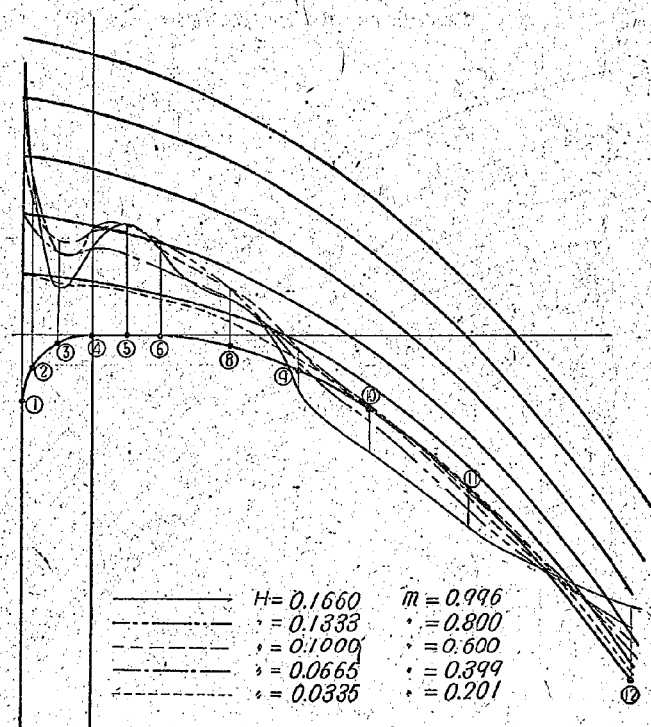
溢流深 0.03，0.07，0.10，0.13，0.17 の 5 つの場合について水脈縱斷形狀及堤頂面の受ける靜水壓の大さを測定した．(圖-12，13，14．表-4)

表-4 に示す靜水壓測定用孔の縱座標 y 及堤頂面の受ける靜水壓を示す水柱の水面の縱座標 y_2 は圖-15 に示す樣にとつた．圖-12，13，14 に於て靜水壓を示す曲線と堤頂部形狀曲線との縱距は堤頂面上の各點の受ける靜水壓を示して居る．孔の縱座標 y より靜水壓の縱座標 y_2 が大きい事は堤頂面に低壓を生じた事を示して居る．

型式-1 に於ては $m=1$ になつてやつと堤頂部下流面に低壓を生ずる傾向を示した．

型式-2 の場合測定點⑪附近に於ては溢流深の小さいうちから ($m=0.201$) 堤頂部下流面に低壓を生じ始めて居る．

圖-13　型式-2 徑間中央に於ける水脈縱斷形狀及堤頂面の受ける靜水壓



型式-3 では $m=1$ になる前に堤頂部下流面に低壓を生じた.

圖-14 型式-3 徑間中央に於ける水脈縦斷形狀及堤頂面の受ける靜水壓

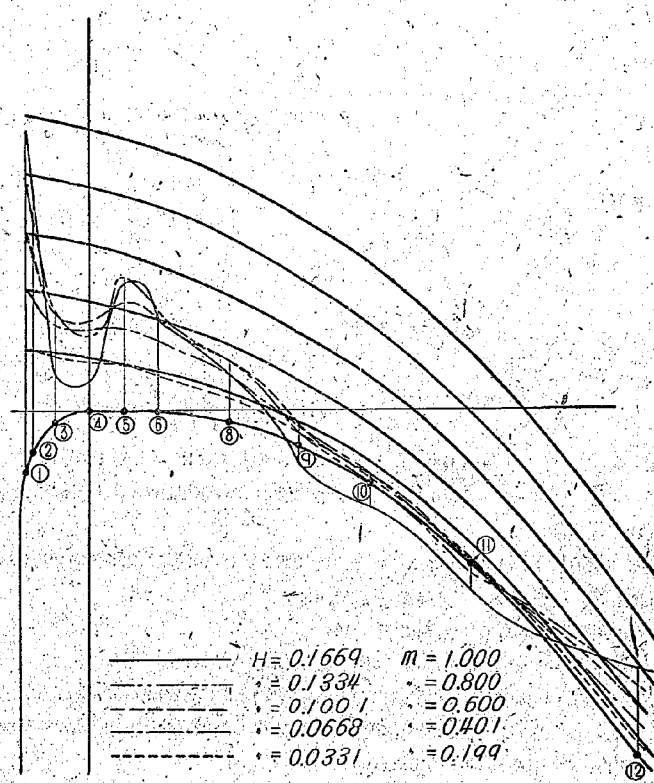
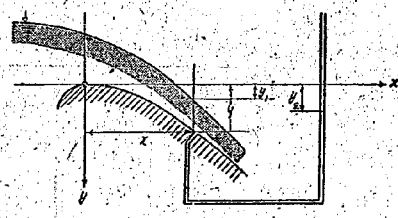


圖-15 座標のとり方

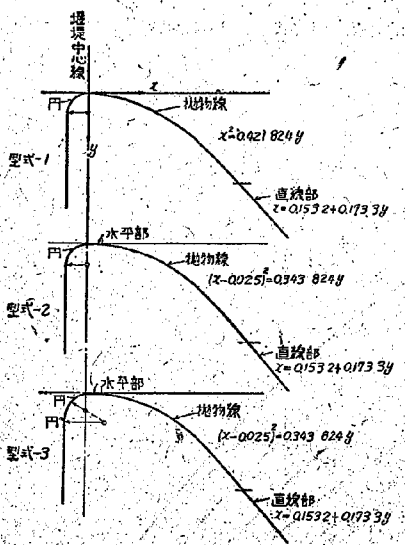


V 結　　語

〔1〕溢流係數に關して

(i) 3 型式に對し實驗式として次の 3 式を得た.

圖-16　堤頂部縱斷形狀



型式-1　$C_1=1.76+2.49\,H$

型式-2　$C_2=1.67+2.70\,H$

型式-3　$C_3=1.62+2.97\,H$

但し實驗は $H=0.016\,6\sim0.183\,4$ $(m=0.10\sim1.10)$ の範圍で行つた.

計畫溢流深 $H=0.166\,7$ $(m=1)$ に對して

$C_1=2.17$

$C_2=2.12$

$C_3=2.11$

依て

$$\frac{C_2}{C_1}=0.977$$

$$\frac{C_3}{C_1}=0.972$$

故に計畫溢流深に對して3型式の溢流係數の値は何れも大差ないと考へてよい.

(ii) 型式-3 は堤頂部に水平部を設けた爲に水平部の無い型式-1 に比べて溢流係數の値は減じた. 此の場合堤頂部に水平部を設ける事は溢流係數を減ずる原因になると思はれる.

(iii) 型式-2 と型式-3 とでは堰堤中心線より上流側の形狀を變へて溢流係數を測定したのであるが, 此の程度の變形では型式-2 が型式-3 に比べて僅か良い結果を示した.

[2] **堤頂面の受ける靜水壓に關して** (圖-12, 13, 14)

型式-1 と型式-3 とでは後者の方が堤頂面に低壓を生ずる傾向が大きい.

型式-3 は堤頂部に水平部を設け, 水平部と堰堤下流側傾斜面との間に拋物線を挿入したのであるが, 此の場合の拋物線部形狀は型式-1 の堤頂點と堰堤下流側傾斜面との間に挿入した拋物線に比べて急である事が此の部分に低壓を生ずる傾向を大ならしめる原因になると思ふ. (18.7.14)

表-1　堤頂部縱斷形狀　(單位米)

番號	型式-1		型式-2		型式-3		備考	Creager の形狀	
	横座標 x	縱座標 y	横座標 x	縱座標 y	横座標 x	縱座標 y		横座標 x	縱座標 y
1	−0.034 5	0.034 5	−0.034 5	0.034 5	−0.032 0	0.031 9	上流部圓弧	−0.034 5	0.021 0
2	−0.029 9	0.017 3	−0.029 9	0.017 3	−0.027 9	0.021 1		−0.017 8	0.006 0
3	−0.017 3	0.004 6	−0.017 3	0.004 6	−0.016 8	0.005 5		−0.001 1	0.001 2
4	0.	0.	0.	0.	0.	0.	堤頂點	0.015 5	0.
5	0.016 7	0.000 7	0.017 0	0.	0.017 0	0.		0.032 2	0.001 2
6	0.033 3	0.002 6	0.034 1	0.000 2	0.034 1	0.000 2	下流部拋物線	0.065 5	0.010 0
7	0.050 0	0.005 6	—	—	—	—		0.098 9	0.023 7
8	0.066 7	0.010 5	0.069 0	0.005 6	0.069 0	0.005 6		0.132 2	0.042 8
9	0.100 0	0.023 7	0.103 7	0.018 0	0.103 7	0.018 0		0.165 5	0.066 2
10	0.133 3	0.042 1	0.138 2	0.037 3	0.138 2	0.037 3		0.198 9	0.094 2
11	0.183 3	0.079 7	0.188 1	0.077 4	0.188 1	0.077 4	拋物線の終點(切點)	0.248 9	0.145 0
12	0.270 4	0.176 3	0.245 4	0.141 3	0.245 4	0.141 3		0.298 9	0.203 4

型式-1　　表-2　溢流深と溢流係數との關係　(單位米)

番號	H	Q	h_a	C
1	0.025 5	0.005 75	0.000 0	1.79
2	0.034 3	0.009 30	0.000 0	1.85
3	0.045 0	0.014 20	0.000 0	1.88
4	0.054 4	0.019 15	0.000 1	1.90
5	0.063 1	0.024 15	0.000 1	1.92
6	0.071 0	0.029 25	0.000 2	1.95
7	0.079 0	0.034 95	0.000 2	1.99
8	0.089 6	0.042 00	0.000 3	1.98
9	0.097 3	0.048 20	0.000 4	2.00
10	0.104 6	0.054 20	0.000 5	2.01
11	0.110 5	0.059 30	0.000 6	2.05
12	0.119 0	0.067 10	0.000 7	2.05
13	0.127 3	0.074 70	0.000 9	2.06
14	0.133 4	0.080 55	0.001 0	2.07
15	0.140 4	0.088 10	0.001 2	2.09
16	0.147 1	0.095 65	0.001 4	2.12
17	0.153 8	0.103 70	0.001 6	2.15
18	0.161 5	0.112 32	0.001 8	2.16
19	0.168 4	0.121 55	0.002 1	2.19
20	0.176 5	0.132 00	0.002 4	2.21

$$C=1.76+2.49\,H$$

型式-2　　表-2　(つづき)

番號	H	Q	h_a	C
1	0.032 8	0.008 25	0.000 0	1.76
2	0.039 8	0.011 04	0.000 0	1.76
3	0.049 1	0.015 50	0.000 1	1.80
4	0.058 0	0.020 00	0.000 1	1.81
5	0.065 8	0.024 70	0.000 1	1.85
6	0.074 3	0.029 90	0.000 2	1.86
7	0.082 1	0.035 26	0.000 2	1.89
8	0.090 0	0.041 10	0.000 3	1.92
9	0.099 3	0.048 40	0.000 4	1.95
10	0.106 5	0.054 45	0.000 5	1.97
11	0.115 9	0.063 10	0.000 7	2.01
12	0.124 8	0.070 25	0.000 8	2.00
13	0.132 6	0.078 37	0.001 0	2.03
14	0.140 1	0.085 00	0.001 1	2.03
15	0.149 3	0.094 75	0.001 3	2.05
16	—	—	—	—
17	0.155 3	0.114 35	0.001 8	2.12
18	0.173 0	0.123 80	0.002 1	2.14
19	0.182 3	0.134 80	0.002 4	2.15

$$C=1.67+2.70\,H$$

型式-3 表-2 (つづき)

番號	H	Q	h_a	C
1	0.016 6	0.002 75	0.000 0	1.63
2	0.026 3	0.005 70	0.000 0	1.69
3	0.033 1	0.008 15	0.000 0	1.71
4	0.041 4	0.011 60	0.000 0	1.74
5	0.049 9	0.015 50	0.000 0	1.76
6	0.059 4	0.020 75	0.000 1	1.81
7	0.066 8	0.024 95	0.000 1	1.83
8	0.074 2	0.029 40	0.000 2	1.83
9	0.082 7	0.035 60	0.000 2	1.89
10	0.091 4	0.042 00	0.000 3	1.92
11	0.100 1	0.048 50	0.000 4	1.93
12	0.107 1	0.054 10	0.000 5	1.94
13	0.116 9	0.063 00	0.000 7	1.98
14	0.124 8	0.069 63	0.000 8	1.98
15	0.133 4	0.078 00	0.001 0	2.01
16	0.141 4	0.086 50	0.001 1	2.04
17	0.149 9	0.095 40	0.001 4	2.04
18	0.157 0	0.104 20	0.001 6	2.09
19	0.166 9	0.114 95	0.001 9	2.10
20	0.173 1	0.122 80	0.002 1	2.12
21	0.183 4	0.136 60	0.002 5	2.16

$$C=1.62+2.97\,H$$

表-3 溢流深と堤頂點に於ける水深との關係 (單位米)

型式-1			型式-2			型式-3		
溢流深 H	堤頂點に於ける水深 H'	$n=\frac{H'}{H}$	溢流深 H	堤頂點に於ける水深 H'	$n=\frac{H'}{H}$	溢流深 H	堤頂點に於ける水深 H'	$n=\frac{H'}{H}$
0.016 7	0.012 8	0.766	0.016 9	0.013 7	0.811	0.016 6	0.013 2	0.795
0.035 6	0.027 9	0.784	0.033 5	0.027 4	0.818	0.033 1	0.026 9	0.813
0.056 4	0.045 0	0.798	0.049 8	0.040 7	0.817	0.049 9	0.040 9	0.820
0.069 8	0.056 3	0.807	0.066 5	0.055 0	0.827	0.066 8	0.055 2	0.826
0.082 2	0.066 8	0.813	0.082 8	0.067 6	0.816	0.082 7	0.068 8	0.832
0.100 0	0.081 8	0.818	0.100 0	0.082 8	0.823	0.100 1	0.083 3	0.832
0.115 7	0.095 5	0.825	0.116 6	0.096 7	0.829	0.116 9	0.098 3	0.841
0.131 2	0.109 3	0.833	0.133 3	0.112 0	0.840	0.133 4	0.112 0	0.830
0.149 0	0.125 1	0.840	0.150 0	0.124 8	0.832	0.149 9	0.126 8	0.846
0.166 6	0.140 4	0.843	0.166 0	0.141 4	0.852	0.166 9	0.141 9	0.850
0.178 5	0.151 4	0.848	0.183 0	0.155 3	0.849	0.183 4	0.157 0	0.856

型式-1

表-4　極間中央に於ける水脈縦斷形狀及堤頂面の受ける靜水壓　(單位米)

番號	靜水壓測定用孔の座標(出來上り) 横座標 x	縦座標 y	溢流深 $H=0.0356$, $m=0.214$ 水脈縦斷形狀の縦座標 y_1	堤頂面の受ける靜水壓の縦座標 y_2	$H=0.0698$, $m=0.419$ 水脈縦斷形狀の縦座標 y_1	堤頂面の受ける靜水壓の縦座標 y_2	$H=0.100$, $m=0.600$ 水面縦斷形狀の縦座標 y_1	堤頂面の受ける靜水壓の縦座標 y_2	$H=0.1312$, $m=0.787$ 水面縦斷形狀の縦座標 y_1	堤頂面の受ける靜水壓の縦座標 y_2	$H=0.1666$, $m=1.000$ 水面縦斷形狀の縦座標 y_1	堤頂面の受ける靜水壓の縦座標 y_2
1	-0.0345	0.0342	-0.0329	-0.0328	-0.0633	-0.0630	-0.0892	-0.0880	-0.1168	-0.1100	-0.1486	-0.130
2	-0.0299	0.0174	-0.0324	-0.0310	-0.0625	-0.0530	-0.0885	-0.0660	-0.1160	-0.0718	-0.1476	-0.0685
3	-0.0173	0.0041	-0.0310	-0.0270	-0.0603	-0.0385	-0.0855	-0.0395	-0.1180	-0.0295	-0.1442	-0.0010
4	0.	0.	-0.0279	-0.0224	-0.0563	-0.0344	-0.0818	-0.0370	-0.1093	-0.0310	-0.1404	-0.015
5	0.0167	0.0003	-0.0237	-0.0197	-0.0516	-0.0340	-0.0770	-0.0405	-0.1040	-0.040	-0.1357	-0.0285
6	0.0333	0.0025	-0.0188	-0.0158	-0.0457	-0.0298	-0.0704	+0.0367	-0.0991	-0.0373	-0.1307	-0.0285
7	0.0500	0.0062	-0.0128	-0.0082	-0.0387	-0.0210	-0.0633	-0.0277	-0.0910	-0.0290	-0.1224	-0.022
8	0.0667	0.0109	-0.0067	-0.0015	-0.0314	-0.0129	-0.0559	-0.0187	-0.0825	-0.0185	-0.1170	-0.010
9	0.1000	0.0286	+0.0087	+0.0190	-0.0133	+0.0112	-0.0368	+0.011	-0.0636	+0.0145	-0.0967	+0.021
10	0.1333	0.0421	0.0283	0.0360	+0.0081	0.0315	-0.0137	0.029	-0.0400	0.0305	-0.0720	0.0395
11	0.1833	0.0804	0.0677	0.0781	0.0491	0.0760	+0.0235	0.0755	+0.0033	0.0784	-0.0269	0.0855
12	0.2704	0.1733	0.1623	0.1673	0.1460	0.1620	0.1271	0.1665	0.1040	0.1520	+0.0750	0.1455

型式-2

番號	靜水壓測定用孔の座標(出來上り) 横座標 x	縦座標 y	溢流深 $H=0.0335$, $m=0.201$ 水脈縦斷形狀の縦座標 y_1	堤頂面の受ける靜水壓の縦座標 y_2	$H=0.0665$, $m=0.399$ 水脈縦斷形狀の縦座標 y_1	堤頂面の受ける靜水壓の縦座標 y_2	$H=0.100$, $m=0.600$ 水脈縦斷形狀の縦座標 y_1	堤頂面の受ける靜水壓の縦座標 y_2	$H=0.1333$, $m=0.800$ 水脈縦斷形狀の縦座標 y_1	堤頂面の受ける靜水壓の縦座標 y_2	$H=0.1666$, $m=0.996$ 水脈縦斷形狀の縦座標 y_1	堤頂面の受ける靜水壓の縦座標 y_2
1	-0.0345	0.0342	-0.0313	-0.0312	-0.0606	-0.0605	-0.0896	-0.0895	-0.1195	-0.1138	-0.1497	-0.1360
2	-0.0299	0.0174	-0.0300	-0.0300	-0.0601	-0.0540	-0.0893	-0.0708	-0.1189	-0.0792	-0.1493	-0.0800
3	-0.0173	0.0041	-0.0295	-0.0265	-0.0579	-0.0413	-0.0874	-0.0475	-0.1163	-0.0410	-0.1448	-0.0235
4	0.	0.	-0.0274	-0.0250	-0.0550	-0.0422	-0.0828	-0.0520	-0.1120	-0.0530	-0.1414	-0.0450
5	0.0170	0.	-0.0241	-0.0225	-0.0506	0.0403	-0.0790	-0.0515	-0.1078	-0.0560	-0.1371	-0.0550
6	0.0341	0.0002	-0.0202	-0.0185	-0.0453	-0.0333	-0.0726	-0.0435	-0.1016	-0.0470	-0.1316	-0.0440
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	0.0690	0.0058	-0.0105	-0.0072	-0.0326	-0.0188	-0.0590	-0.0240	-0.0876	-0.0245	-0.1154	-0.0190
9	0.1037	0.0177	+0.0037	+0.0120	-0.0157	+0.0080	-0.0406	+0.0080	-0.0676	+0.0140	-0.1076	+0.0265
10	0.1382	0.0369	0.0247	0.0360	+0.0060	0.0350	-0.0168	0.0360	-0.0434	0.0435	-0.0711	0.058
11	0.1881	0.0764	0.0654	-0.0775	0.0484	0.0780	+0.0261	0.0810	+0.0018	0.0870	-0.0261	0.096
12	0.2704	0.1733	0.1642	0.169	0.1498	0.1590	0.1284	0.1528	0.1024	0.1470	+0.0714	0.1355

型式-3

番號	靜水壓測定用孔の座標(出來上り) 横座標 x	縦座標 y	溢流深 $H=0.0331$, $m=0.199$ 水脈縦斷形狀の縦座標 y_1	堤頂面の受ける靜水壓の縦座標 y_2	$H=0.0668$, $m=0.401$ 水脈縦斷形狀の縦座標 y_1	堤頂面の受ける靜水壓の縦座標 y_2	$H=0.1001$, $m=0.600$ 水脈縦斷形狀の縦座標 y_1	堤頂面の受ける靜水壓の縦座標 y_2	$H=0.1334$, $m=0.800$ 水脈縦斷形狀の縦座標 y_1	堤頂面の受ける靜水壓の縦座標 y_2	$H=0.1669$, $m=1.000$ 水脈縦斷形狀の縦座標 y_1	堤頂面の受ける靜水壓の縦座標 y_2
1	-0.0320	0.0319	-0.0310	-0.0309	-0.0610	-0.0608	-0.0895	-0.0890	-0.1192	-0.1136	-0.1490	-0.1389
2	-0.0279	0.0211	-0.0300	-0.0300	-0.0602	-0.0591	-0.0893	-0.0810	-0.1186	-0.0962	-0.1474	-0.1080
3	-0.0168	0.0053	-0.0295	-0.0276	-0.0585	-0.0430	-0.0873	-0.0478	-0.1163	-0.0485	-0.1457	-0.0154
4	0.	0.	-0.0269	-0.0242	-0.0552	-0.0398	-0.0833	-0.0444	-0.1120	-0.0370	-0.1419	-0.0151
5	0.017	0.	-0.0235	-0.0230	-0.0509	-0.0419	-0.0788	-0.0556	-0.1078	-0.0677	-0.1372	-0.0645
6	0.0341	0.0002	-0.0197	-0.0175	-0.0457	-0.0343	-0.0732	-0.0452	-0.1030	-0.0500	-0.1323	-0.0460
7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
8	0.0690	0.0058	-0.0098	-0.0067	-0.0328	-0.0182	-0.0584	-0.0250	-0.0874	-0.0250	-0.1171	-0.0180
9	0.1037	0.0177	+0.0055	+0.0113	-0.0153	+0.0072	-0.0393	+0.0070	-0.0663	+0.0113	-0.0977	+0.0248
10	0.1382	0.0369	0.0258	0.0340	+0.0070	0.0308	-0.0165	0.0318	-0.0430	0.0368	-0.0740	0.0485
11	0.1881	0.0764	0.0665	0.0750	0.0492	0.0760	+0.0273	0.0780	+0.0014	0.0825	-0.0282	0.0906
12	0.2704	0.1733	0.1643	0.1670	0.1487	0.1679	0.1280	0.1483	0.1027	0.1385	+0.0710	0.1304

紅土の土質に關する實驗的研究

石　井　靖　丸

要　旨

南方地域の特徴ある土質である紅土系土壌南洋パラオ島アイライ產の紅土及び海南島產の褐色土に就いて，土質實驗を行ひその特質を明らかにしたものである．紅土地域の土木工作物の施工に當つて，この土質の特性を把握することの極めて重大であることは言を俟たない．

本實驗は大東亞戰爭勃發以前に着手したものであるが，種々の事情に依つて發表が遲れてしまつた．

尙實驗中，懇切な御指導と御援助を賜つた前所長藤井博士に對し厚く感謝の意を表する次第である．

目　次

I．概　　說……（1）
II．紅土，褐色土の土質實驗……（3）
〔1〕物理試驗……（3）
〔2〕力學試驗……（5）
III．結　　語……（23）

I．概　　說[1]

ラテライト（Laterite）の語源はラテン語の Later（煉瓦）から來て居り，印度の一部ではこれが切出して乾燥すれば堅硬になり，煉瓦狀を呈するから土人が建築材料として使用して居る．1807年に Buchman は之にラテライトといふ名稱を與へた．然し乍ら此の名稱は廣く熱帶地方に產する鐵及び礬土に富んだ土壤の總稱の樣に用ひられる樣になつた爲にその最初の意義は全く失はれ非常に漠然として居り今日でもラテライトの定義に關して學者の意見は一致して居ない．

i）分　布

紅土の分布は熱帶多雨地方で，アフリカの中部ではスダン，東部のタンガニイカ，ケニア，西部のコンゴー，カメルン，ギニア，ニゼリア及びシエラネオネに亘り，アジア州は南部の印度，セイロン，ビルマ，佛領印度支那，南支那に亘り蘭印及び吾が南洋諸島にも分布し，南米，中南米にも分布して居る．

ii）紅土の生成條件

風化土壤の性質は母岩の性質及び氣象條件に依つて異なるが，氣象條件の苛酷な地域に於ては母岩の性質の影響は殆んど認められない．

熱帶及亜熱帶を支配する多濕にして高溫な條件の下では，過濕で空氣の透通不良な特殊環境を伴ふ場合を除けば溫度と濕度が微生物の活動に對して理想的であるから，有機物は極めて速やかに分解し盡されて，容易に鑛物質化する．中間生成物たる有機酸類及び夫等の鹽類は生成せられるや否や微生物に依り利用され，土壤の鑛物質成分と作用する丈の時間的餘裕が與へられない．從つて二三酸化物の溶脫は殆んど起らず，又有機物中に灰分と

1）此節は，藤井眞透"熱帶多雨地方の紅土に關する調査"內務省土木試驗所速報38號に依つた．

して存在する多量の鹽基は，有機物の鑛物質化に伴つて土壤液中に溶解して來て，その反應を弱酸性乃至鹽基性ならしめる．從つて土壤中の珪酸鹽類は酸性加水分解に代つてアルカリ加水分解即ラテライト化作用 (Lateristion) を受けることになり，珪酸は二三酸化物よりも容易に溶解して流亡し，其の結果土壤の表層には二三酸化物の集積を來し，爲に珪礬比小なるラテライト型土壤が生成せられるに至る．

ラテライト型土壤中ラテライトはラテライト化作用の最も進行せるもので，鐵質ラテライトは特に鐵の含有量大なるラテライトである．赤色土及び黃色土はラテライトに比すればラテライト化作用の進行程度比較的小なるものである．

尙 Campbell 氏は熱帶に於て岩石が分解する過程を變質と風化の二種に區別した．而して眞の風化は水を以て間歇的に飽和せられる層の內部に於てのみ起り，ラテライトは此所に生成せられる．變質は常に水を以て飽和された層中で起り鐵が除去せられ，アルカリ珪酸鹽は含水珪酸礬土たるカオリンに變化する．之が風化すればラテライトを生ずる．それ故にラテライトは多濕にして溫和若しくは冷溫なる氣候の下に於て反應すると同樣な反應により一旦カオリンと可溶性珪酸鹽とを生じ，カオリンから更に珪酸が除去されて生成せられる．それが爲には飽水は間歇である必要があり，常に飽水せられて居る場合には單にカオリン生成が行はれて居るに過ぎないと違べて居る．

iii) ラテライトの定義

Martin 及び Dogne はラテライト及びラテライト型土壤の定義の基礎として粘土分の珪礬比を用ふべきことを主張し，それに基いてシエラレネオネの土壤を次の樣に分類した．

ラテライト……珪礬比 1.33 又はそれ以下

ラテライト型土壤……珪礬比 1.33～2.0

非ラテライト型土壤……珪礬比 2.0 及それ以上

又多くの研究者達は珪礬比即 SiO_2/Al_2O_3 よりも寧ろ鐵をも計算に入れた SiO_2/R_2O_3 を用ふべきであるとして居る．

iv) ラテライトの確認

ラテライト化を確認する上に於ては，層斷面につき各層發達の模樣を明らかにすることが極めて重要である．模範的ラテライトの層斷面は鐵殼層，富化層，分解層及び基層の四層より成る．鐵殼層は地表に出來るもので多胞狀乃至鐵滓狀の黑色物で主として酸化鐵より成り，下層の風化層の鐵殼が流合して出來たものである．富化層は鐵，礬土質物の集積せるもので赤色を示し，ラテライト型土壤の代表的なものである．地表近くに現はれることもあり，又一定深所に現はれることもある．乾燥すれば鐵塊の礫となり，一帶に結合して堅い鐵核層を作る．富化層の下部は通常赤斑狀を呈し，鐵，礬土質物が土塊の間に浸潤して居る．分解層は白色の粘土層より成る．母岩の分解物中鐵礬土が分離し，それが乾燥期には上部の富化層に移行する．又其の期には分解層中に炭酸石灰の沈澱が出來る．從つて土壤各成分を各層別に定量して夫等の移動，分布の狀況を知り，層發達の模樣を明らかにすればラテライト化に對する確實な資料が得られることになる．

v) 組成分

ラテライトの成分は主として鐵，礬土，珪酸，チタニウムより成る．二三酸化物は大部分含水酸化物の形となり，カオリン樣の鐵物も若干存在し，水は之等化合物に結合して居る．アルカリ及びアルカリ土金屬に乏しい事は云ふ迄もなく炭酸鹽は一般に含有せられない．

Harrssowitz に依れば模範的ラテライトの組成は次の如くである．化合水は多量の礬土と結合し，其の量は

25～30 %で，38 %に達する場合も稀くない．礬土は最も多量に存在し 50～60 %に達する．鐵の量が增加すれば礬土の量は減少し，石英の增加も亦礬土量を減少せしめる．鐵の量には非常に差異があり，僅か 1～2 % に過ぎぬものもあれば又極端に大なるものもある．ラテライトに赤色を附與するものは Glinka に依れば水酸化赤鐵鑛 ($2Fe_2O_3 \cdot H_2O$) である．模範的ラテライトでは珪酸含量は極めて小である．

vi) ラテライトの土質

ラテライト型土壤の機械的組成には一定の特徴は認められない．Martin 及び Dogne に依れば粒子が接合作用を受けて居る場合には粒徑 2 粍以上のものは 20～50 %に達する．

又珪礬比の大なる土壤と小なる土壤の間には粘土分の示す理學性に著しい相違が存在する．Bennett に依れば大體に於て $SiO_2/(Al_2O_3+Fe_2O_3)$ の比 2.0 前後を境として脆性及び粘性が著しく異つて來る．珪礬比小なるものは大なるものに比し一層脆性大となり粘性は小となる．これは膠質的性質に關する點で著しく異るものであり而もその性質の差異は粘土の量の差によるものではなく，全く粘土そのものの性質の相違に因るものと考へられて居る．

以上述べて來た樣にラテライト型土壤を一般的に特徴付けることは困難であり，且その力學的性質もラテライトの種類成分の相異に依つて著しく異つて來ると考へられる．

II. 紅土，褐色土の土質實驗

玆に報告する實驗は，南洋パラオ島アイライ產の紅土及び海南島產の紅土系土壤と考へられる褐色土に關する實驗結果である．勿論，此の二種の土壤に就いての實驗から紅土一般の土性を判定することは極めて無暴であるが，紅土特有の性質は大體摘出しうると考へる．土性の相違は，機械的組成の相違，膠質的性質の相違，化學成分，粒子形狀等の相違が重疊して生ずるものと考へられて居り，又同一系統の土質であれば以上の相違は或る程度迄明確に相關々係を把えることが出來るものである．

次に問題となるのは土質判定の試驗方法である．此れは在來行はれて居る所謂土質實驗の結果を如何に工學的，力學的指數として使用し得るかといふ點に多くの疑問が存在する．唯此處に於ては在來の方法に依つて實驗したに過ぎないが，紅土の土性と共にこれらの實驗方法に對する批判も併せて行ふ樣に努めた．

又實驗結果に對する判斷を明確にする爲に比較的性質のよく知れて居る山手赤土（關東ローム）に就いて平行して實驗を行ひ，對照することゝした．

〔1〕 物理試驗

紅土は赤褐色粗粒狀，褐色土は褐色粗粒狀である．何れも鹼酸性．

a) 試驗項目

1. 機械的分析，2. 眞比重，3. 遠心力含水當量，4. 收縮限界，5. 液性限界，6. 塑性限界，7. 野外含水當量，等である．

1 は 75 μ 以上は篩（200 番以上）に依り，それ以下はピーカー法に依つた．從つて 75 μ 以下の粒徑分布は精細に測定しえなかつた．2 はルシヤテリーの比重瓶を用ひた．3～7 は何れも土の乾燥重量に對する百分比即含水比で表はした．

b) 試驗結果

表-1 に結果を掲げた．比較の爲黃土の結果[2] をも併記した．

2) 星埜和 "黃土の築堤材料としての安定度の研究" 東亞研究所報告 p. 7.

a：北京郊外產　普通黃土

b：北京郊外產　煉瓦用黃土

c：塘沽產　埋立地のもの

表-1　紅土及褐色土の物理的性質　　( ) 內は含水率に換算した値を示す.

機械分析		紅土	褐色土	山手赤土	黃土a	黃土b	黃土c
mm以下	mm以上						
	5.0	1.1	1.0	—	—	—	—
5.0	2.5	2.4	5.1	—	—	—	—
2.5	1.2	1.5	6.1	0.1	—	—	—
砂 1.2	0.6	3.9	20.5	0.7	0.4	0.2	1.2
0.6	0.3	5.5	16.5	1.9	0.5	0.3	1.1
0.3	0.15	12.6	12.6	3.3	1.6	0.8	0.9
0.15	0.075	21.3	9.8	4.9	6.8	2.9	4.0
計		48.3	71.6	10.9	9.3	4.2	7.2
沈泥 0.075	0.005	30.7	11.2	36.9	55.3	46.1	34.7
粘土 0.005		21.0	17.2	52.2	35.4	49.7	58.2
合計		100.0	100.0	100.0	100.0	100.0	100.1
眞比重		2.755	2.635	2.421	2.706	2.697	2.704
遠心力含水當量		33.98	35.27	65.4 (39.5)	16.1 (13.9)	21.0 (17.4)	22.5 (18.4)
收縮限界		36.25(26.61)	37.81(27.44)	65.3(39.5)	17.3 (14.7)	17.6 (15.0)	17.0 (15.0)
收縮比		1.16	1.17	0.95	1.83	1.85	1.84
收縮間隙率		—	—	(60.8)	(32.4)	(31.4)	(32.0)
液性限界		81.52(44.91)	70.69(41.41)	94.2 (48.5)	41.3 (29.2)	60.2 (37.6)	58.8 (37.0)
塑性限界		56.78(36.22)	45.29(31.17)	60.3 (37.6)	16.5 (14.2)	17.3 (14.7)	19.5 (16.3)
塑性指數		24.74	25.40	33.9	24.8	42.9	39.3
容積收縮率		0.32	0.36	—	—	—	—
野外含水當量		76.16	70.18	—	—	—	—

圖-1 には粒形曲線を示す.

尙緊硬限界を圖示すれば 圖-2 の樣になる.

c) 試驗結果に對する考察

(1) 粒徑分布狀態は赤土，黃土等と著しく異なり，75 μ 以上が赤土，黃土に於ては 5～10 %程度にすぎないのに對し，紅土では 48.3 %，褐色土では 71.6 % に及ぶ. これは前者は風成土の風化したものであり，後者は母岩から風化して生じたものであるから當然のことである. 機械的分析の結果のみからすれば紅土，褐色土は築堤材料，路床土，等として工學的には非常に好都合に粗細粒が配分されて居り，赤土，黃土に比して有利な土質と言ふことが出來る. 又，5 μ 以下は 21 %及び 17.2% であつて，赤土，黃土の ⅓～⅙ である. 即 75 μ 以上が 5～15

圖-1

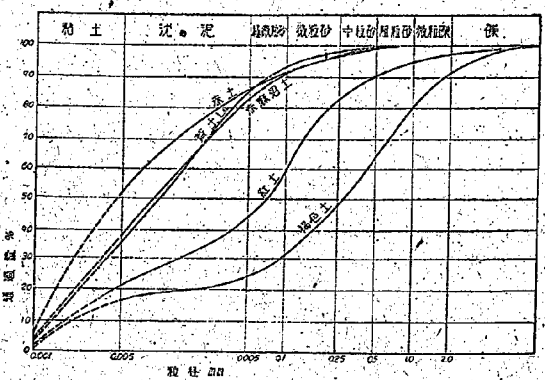
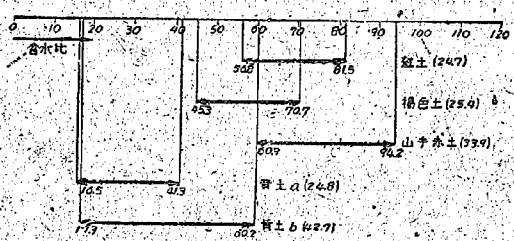


圖-2



倍であるにも拘らず割合に多い．從つて砂礫部分が多いにも拘らず相當の粘着力を有すると思はれる．且ガオリンとは異なり，鐵物質成分が酸化物の形でそのまゝ入つて居るから膠質的性質も劇しいと考へてもよいであらう．

（2）眞比重は，紅土 2.755，褐色土 2.685 であつて，黄土の 2.697～2.706 より大きく，赤土の 2.421 より著しく大きい．

（3）遠心含水當量は赤土の約½，黄土の 1.5 倍程度である．故に保水能力は黄土より大きい．これは紅土の粒徑分布が密度大なる土塊を作るに適當な爲であるか又は膠質の特有の性質であるかは明白でない．黄土は透水性著しく小なる爲，密な組織を作りえず從つて保水性が小さく成るとも考へられる．これらのことに就いては透水試驗の結果を參照して後に觸れることにする．

（4）收縮限界は赤土の½，黄土の 2 倍である．粗粒部分が多いにも拘らず，赤土に比して小さいのは注目すべきである．

（5）緊硬限界（液性限界，塑性限界）は 圖-2 に示す樣に 45～80 %の間である．各土壌に就いて，各限界の位置はそれらの土壌が生成された地域の氣象作用の影響を明白に示して居る．紅土の塑性指數は 25 程度であつて，赤土，黄土bに比して相當小さい値を示して居るから，水に對する安定性は小さいと見なければならぬ．此れも壓密度，透水度と比較して後で論ずることゝする．

〔2〕 力學試驗

實驗に使用せる紅土，褐色土は何れも自然狀態の物ではなく，粉末化したものに水を加へて捏ね，成型壓力を加へて作つたものである．從つて自然の成層位置に於ける狀態にはその儘では適用出來ない．

a）試驗項目

1. 剪斷試驗，2. 壓縮試驗，3. 透水試驗，4. 沸化試驗，である．

（1）剪斷試驗

供試體は 4×4×4 糎の立方體，成型壓力は 2.5，5，10 kg/cm², 加壓時間は 5 分間とした．剪斷試驗機は三箱

式二面剪斷器である．上下壓力は，1.25, 3.125, 5 kg/cm² の三段に變べた．

剪斷試驗に當つて，最も注目したのは含水量の影響如何といふことである．從つて成型時に當つて，含水量は大體塑性限界から液性限界の範圍を選んだ．成型含水量が異れば成型壓力一定なるときには間隙率が異つて來る．從つて含水量の影響と共に，これに對應する間隙率の影響が加つて來る．且成型直後の實驗であるから，乾燥，濕潤等に依る含水率の變化の影響を實驗したのではない．乾燥，濕潤等の影響を測定するには，供試體の收縮，膨脹の問題があり且空氣空隙量と水空隙量の比率が重要になつて來る．然しこの問題は，今は觸れぬことにする．

剪斷試驗結果は表-2～4に掲げた．表-2は紅土，表-3は褐色土，表-4は山手赤土の試驗結果である．尙，殘念なことには小型剪斷試驗器の最大剪斷力は 3.1 kg/cm² であつて，紅土，褐色土ではこれを超過する場合が多かつた．此の場合には上下壓力 1.25 kg/cm², 3.125 kg/cm² のときの剪斷力を基準として求めた．尙圖-8～11に結果を圖示した．

表-2 紅土，剪斷試驗結果

上下壓力	1.25 (kg/cm²)				3.125 (kg/cm²)				5.0 (kg/cm²)			
成型壓力 (kg/cm²)	試料番號	試驗體 含水率	試驗體 間隙率	剪斷强度 (kg/cm²)	試料番號	試驗體 含水率	試驗體 間隙率	剪斷强度 (kg/cm²)	試料番號	試驗體 含水率	試驗體 間隙率	剪斷强度 (kg/cm²)
2.5	1	22.5	68.8	1.37	21	20.6	68.3	2.40	41	22.6	68.7	3.1以上
	2	22.0	65.7	1.41	22	20.7	68.2	—	42	22.5	68.9	〃
	3	25.9	68.6	1.88	23	23.5	64.2	2.54	43	25.8	68.8	〃
	4	26.0	68.5	1.72	24	25.8	68.7	2.47	44	25.4	68.2	〃
	5	28.1	67.9	1.88	25	25.9	68.9	2.50	45	29.0	65.0	2.02
	6	27.6	68.0	1.81	26	26.4	68.0	2.54	46	29.3	67.0	2.60
	7	29.3	64.4	1.77	27	26.4	68.7	2.48	47	31.1	63.3	2.52
	8	30.7	65.4	1.72	28	22.4	61.6	2.22	48	32.0	64.6	2.22
	9	30.8	65.7	1.70	29	29.2	65.1	2.22	49	32.3	62.7	2.24
	10	31.1	63.2	1.34	30	34.0	63.2	1.50	50	32.4	64.7	2.34
	11	33.3	63.7	1.17	31	34.0	63.1	1.34	51	34.0	62.2	1.92
	12	32.8	64.0	1.17	32	34.5	61.5	1.25	52	34.2	—	1.78
	13	33.2	62.9	1.13	33	34.9	62.6	1.12	53	35.2	61.5	1.44
	14	35.0	62.9	0.89	34	37.8	63.7	0.75	54	37.0	—	0.88
	15	34.9	61.4	0.93	35	37.8	64.2	0.75	55	36.6	—	1.28
	16	34.8	63.2	0.89	36	31.0	62.3	2.02				
	17	36.8	63.3	0.72	37	32.6	62.6	1.60				
	18	37.2	63.2	0.55								
	19	40.6	65.0	0.62								

表-2 紅土 剪斷試驗結果

上下壓力	1.25 (kg/cm²)				3.125 (kg/cm²)				5.0 (kg/cm²)			
成型壓力 (kg/cm²)	試料番號	試驗體 含水率	試驗體 間隙率	剪斷强度 (kg/cm²)	試料番號	試驗體 含水率	試驗體 間隙率	剪斷强度 (kg/cm²)	試料番號	試驗體 含水率	試驗體 間隙率	剪斷强度 (kg/cm²)
5.0	1	31.0	61.1	2.26	11	27.8	63.5	2.69	21	29.0	63.6	2.87
	2	30.6	61.9	2.00	12	29.6	63.4	2.56	22	31.2	61.9	2.70
	3	32.1	60.0	1.97	13	31.0	62.2	2.36	23	32.2	61.6	2.38
	4	32.8	60.5	1.70	14	32.9	61.2	1.92	24	34.6	61.7	1.84
	5	34.2	61.0	1.17	15	34.0	61.5	1.47				
	6	34.1	61.0	1.03								
	7	34.8	61.8	1.00								
10	1	26.5	58.4	2.73	11	27.0	58.5	2.89	21	29.2	58.4	3.00
	2	27.1	59.0	2.76	12	29.1	58.4	2.81	22	30.5	58.1	2.89
	3	29.4	59.0	2.37	13	31.0	58.3	2.63	23	32.2	58.7	2.70
	4	30.6	58.2	2.19	14	32.1	58.4	2.35	24	32.4	58.8	2.37
	5	32.3	58.6	1.97	15	32.8	58.6	1.92				
	6	23.6	60.8	2.84								
	7	25.3	61.9	2.89								
	8	27.8	61.2	3.03								
	9	29.7	59.3	2.59								
	10	32.4	59.0	1.56								

表-3 褐色土 剪斷試驗結果

上下壓力	1.25 (kg/cm²)				3.125 (kg/cm²)				5.0 (kg/cm²)			
成型壓力 (kg/cm²)	試料番號	試驗體 含水率	試驗體 間隙率	剪斷强度 (kg/cm²)	試料番號	試驗體 含水率	試驗體 間隙率	剪斷强度 (kg/cm²)	試料番號	試驗體 含水率	試驗體 間隙率	剪斷强度 (kg/cm²)
2.5	1	24.2	65.7	1.84	21	25.0	59.3	2.90	41	24.4	65.4	3.1以上
	2	24.4	66.6	1.80	22	24.6	59.1	2.69	42	24.4	65.9	〃
	3	25.7	66.0	2.11	23	25.9	58.6	2.56	43	27.2	64.5	〃
	4	25.6	66.3	1.63	24	25.2	66.0	2.58	44	27.3	65.0	〃
	5	29.3	63.9	2.03	45	29.7	63.3	2.31	45	30.5	62.6	2.53
	6	29.3	64.0	2.14	26	27.6	63.0	2.47	46	30.5	63.0	2.56
	7	31.1	62.5	1.47	27	32.5	60.9	1.56	47	31.3	61.0	1.97
	8	31.8	63.3	1.42	28	32.3	60.5	1.64	48	31.7	60.7	1.88
	9	33.4	61.0	1.00	29	32.8	60.6	1.58	49	32.2	60.1	1.91
	10	33.6	61.8	1.02	30	32.9	61.0	1.53	50	32.6	60.7	1.66
	11	35.9	61.8	0.53	31	33.4	60.6	1.38	51	31.8	66.2	1.33
	12	35.7	62.0	0.59	32	33.8	61.4	1.33	52	32.3	60.5	1.94
	13	35.4	62.5	0.72					53	32.6	60.4	1.88
	14	35.9	62.8	0.70					54	31.8	59.8	2.19

表-3₂ 褐色土，剪斷試驗結果

上下壓力	1.25 (kg/cm²)				3.125 (kg/cm²)				5.0 (kg/cm²)			
成型壓力	試料	試驗體		剪斷強度	試料	試驗體		剪斷強度	試料	試驗體		剪斷強度
(kg/cm²)	番號	含水率	間隙率	(kg/cm²)	番號	含水率	間隙率	(kg/cm²)	番號	含水率	間隙率	(kg/cm²)
5.0	1	23.1	63.8	2.78	11	23.8	64.3	3.1以上	21	29.9	60.2	2.66
	2	22.8	63.9	2.53	12	23.5	64.0	〃	22	29.2	59.0	2.78
	3	26.8	61.9	2.81	13	29.6	60.0	2.53	23	30.6	58.8	2.47
	4	26.8	61.5	2.78	14	29.4	59.0	2.50	24	31.3	59.5	1.78
	5	29.6	60.4	2.06	15	26.2	56.2	1.75	25	30.8	58.0	2.44
	6	29.4	60.0	2.12	16	31.8	59.4	1.88	26	30.7	58.5	2.42
	7	31.6	59.3	1.41	17	32.6	59.6	1.56	27	32.2	59.3	1.66
	8	31.8	59.6	1.34	18	32.2	59.0	1.63	28	31.4	59.0	1.85
	9	33.1	60.0	0.95	19	32.5	59.8	1.41				
	10	34.2	60.9	0.81	20	33.2	60.3	1.50				
10	1	30.5	56.8	2.19	21	29.0	57.7	3.1以上	31	28.6	57.1	3.1以上
	2	30.8	58.0	2.09	22	29.3	57.1	〃	32	29.1	57.4	〃
	3	27.4	58.3	3.1以上	23	32.3	58.0	1.91	33	31.1	58.7	2.66
	4	27.4	58.6	〃	24	31.6	57.6	1.87	34	31.5	58.9	2.28
	5	30.5	57.0	1.84	25	30.6	57.1	2.50	35	25.6	55.4	1.53
	6	30.7	57.9	1.84	26	30.8	57.2	2.47	36	31.9	59.2	1.75
	7	31.7	58.6	1.44	27	33.3	58.7	1.72	37	32.0	59.3	1.78
	8	32.2	58.4	1.25	28	33.3	60.0	1.41				
	9	33.4	58.8	0.97								

表-4₁ 山手赤土，剪斷試驗結果

上下壓力	1.25 (kg/cm²)				3.125 (kg/cm²)				5.0 (kg/cm²)			
成型壓力	試料	試驗體		剪斷強度	試料	試驗體		剪斷強度	試料	試驗體		剪斷強度
(kg/cm²)	番號	含水率	間隙率	(kg/cm²)	番號	含水率	間隙率	(kg/cm²)	番號	含水率	間隙率	(kg/cm³)
2.5	1	35.4	73.1	1.51	31	34.6	72.9	2.32	61	34.8	73.5	2.85
	2	36.4	72.6	1.73	32	33.6	72.4	2.12	62	35.2	73.6	2.78
	3	36.8	73.6	1.12	33	34.6	73.4	2.12	63	34.8	1	3.00
	4	38.1	73.2	1.51	34	34.3	73.3	2.19	64	37.3	73.5	2.72
	5	38.2	73.2	1.41	35	36.4	72.6	2.06	65	37.4	73.5	2.88
	6	40.0	74.0	1.12	36	37.3	72.9	2.16	66	37.3	72.8	2.75
	7	35.9	73.5	1.27	37	37.7	73.3	2.09	67	39.4	73.2	2.74
	8	38.8	73.0	1.51	38	39.8	73.5	1.97	68	39.6	73.3	2.34
	9	38.9	73.2	1.53	39	39.8	73.6	2.09	69	42.4	73.3	2.26
	10	40.5	74.3	1.59	40	39.8	74.2	1.91	70	43.0	73.4	2.19
	11	41.6	73.0	1.33	41	42.5	73.5	1.52	71	40.7	72.5	2.16
	12	41.2	72.9	1.29	42	42.0	73.4	2.12	72	73.6	72.6	1.86
	13	42.3	72.8	1.37	43	42.1	73.1	1.61	73	43.4	71.7	1.91
	14	44.2	72.1	1.25	44	42.0	73.6	1.56	74	46.4	72.2	1.67
	15	44.9	72.7	1.13	45	43.5	72.1	1.27	75	45.6	71.8	1.69
	16	43.5	72.0	1.10	46	43.3	71.8	1.75	76	45.9	71.9	1.88
	17	45.4	71.5	0.94	47	45.7	71.8	1.35	77	45.3	71.9	2.19
	18	43.4	70.6	1.03	48	45.6	71.9	1.55	78	47.4	71.2	1.69
	19	46.7	72.0	1.03	49	45.5	71.9	1.41	79	43.7	69.1	1.73
	20	46.7	70.8	0.80	50	47.2	71.4	1.06	80	45.9	68.7	1.91
	21	47.4	71.4	0.93	51	47.4	71.2	1.47	81	53.3	73.2	2.03
	22	47.6	71.5	0.88	52	47.5	71.0	1.41	82	47.6	69.7	1.66
	23	49.0	70.8	0.66	53	47.4	70.8	1.50	83	46.5	69.4	2.00
	24	48.7	70.7	0.81	54	48.5	70.2	1.33				
	25	48.9	70.7	0.66								

表-4₂ 山手赤土，剪斷試驗

上下壓力	1.25 (kg/cm²)				3.125 (kg/cm²)				5.0 (kg/cm²)			
成型壓力	試料	試驗體		剪斷强度	試料	試驗體		剪斷强度	試料	試驗體		剪斷强度
(kg/cm²)	番號	含水率	間隙率	(kg/cm²)	番號	含水率	間隙率	(kg/cm²)	番號	含水率	間隙率	(kg/cm²)
5.0	1	35.8	71.9	2.25	31	35.8	72.1	2.88	51	35.4	72.3	3.01
	2	35.5	72.1	1.89	32	35.7	72.5	2.53	52	35.4	71.9	3.1以上
	3	35.6	73.4	2.31	33	36.0	72.5	2.69	53	34.8	71.7	2.91
	4	36.6	71.8	1.92	34	36.6	71.8	2.32	54	35.1	71.9	2.59
	5	37.2	72.1	1.87	35	36.2	71.7	2.16	55	36.2	71.6	3.1以上
	6	36.2	71.5	1.92	36	37.4	71.1	2.56	56	36.1	71.4	3.1以上
	7	39.0	70.9	1.75	37	38.2	71.1	2.58	57	38.6	69.7	2.78
	8	38.8	70.8	2.17	38	38.2	71.0	2.50	58	39.2	70.9	2.69
	9	39.4	70.2	2.03	39	41.4	71.9	2.24	59	38.8	71.5	2.88
	10	35.6	68.4	1.81	40	41.4	70.5	2.38	60	41.5	71.1	2.00
	11	40.4	71.0	1.88	41	39.6	70.0	1.89	61	40.2	70.9	2.50
	12	41.1	70.9	1.91	42	43.4	70.6	2.03	62	42.6	71.2	2.62
	13	43.5	70.6	1.67	43	44.0	70.3	1.83	63	41.9	69.7	2.50
	14	43.3	70.5	1.75	44	44.4	70.3	1.94	64	45.0	69.1	2.12
	15	43.8	70.5	1.75	45	45.5	69.5	1.78	65	46.1	69.5	2.00
	16	45.0	69.1	1.28	46	47.0	70.3	1.75	66	43.5	69.5	2.62
	17	45.7	69.9	1.22	47	45.8	68.2	1.90	67	44.0	70.1	2.25
	18	46.2	68.9	1.25	48	43.6	70.0	1.67	68	44.7	70.3	2.38
	19	49.1	72.5	1.28								
	20	44.5	69.9	1.22								
	21	45.1	70.6	1.17								
	22	48.2	72.5	1.19								

表-4₃ 山手赤土，剪斷試驗結果

上下壓力	1.25 (kg/cm²)				3.125 (kg/cm²)				5.0 (kg/cm²)			
成型壓力	試料	試驗體		剪斷强度	試料	試驗體		剪斷强度	試料	試驗體		剪斷强度
(kg/cm²)	番號	含水率	間隙率	(kg/cm²)	番號	含水率	間隙率	(kg/cm²)	番號	含水率	間隙率	(kg/cm²)
10	1	42.7	70.0	1.75	21	42.7	69.3	2.26	41	43.6	69.9	2.60
	2	43.2	69.6	1.69	22	43.0	69.6	2.28	42	38.7	69.3	3.1以上
	3	37.8	71.5	2.19	23	35.8	72.4	3.1以上	43	41.7	70.4	2.84
	4	37.4	70.4	2.25	24	36.0	72.4	2.88	44	40.6	69.8	3.08
	5	37.8	72.0	2.55	25	39.0	71.2	2.83	45	42.2	65.1	2.70
	6	33.9	74.8	2.66	26	38.4	70.7	3.00	46	42.8	64.0	2.60
	7	35.6	71.8	2.60	27	41.3	70.4	2.76	47	42.6	63.5	2.50
	8	35.1	71.4	2.58	28	41.2	70.6	2.46	48	44.2	69.4	2.60
	9	39.1	73.6	2.56	29	42.0	70.2	2.40	49	42.3	65.3	2.80
	10	41.1	70.7	2.09	30	43.1	69.6	2.22				
	11	41.5	70.3	1.81	31	41.5	69.7	2.38				
	12	42.8	70.0	1.52	32	43.2	—	2.46				
	13	42.9	70.2	1.59	33	43.6	69.9	1.75				
	14	43.5	70.6	1.47	34	43.0	68.4	2.30				
	15	43.6	69.8	1.66	35	46.7	70.4	1.99				
	16	43.7	69.8	1.72								

圖-3 紅土, 成型壓力 2.5 kg/cm²

三曲線は上から上下壓力 5, 3.125, 1.25 kg/cm² に對應するものである. 横軸は成型含水量, 縱軸は剪斷力である. 以下すべて同じ.

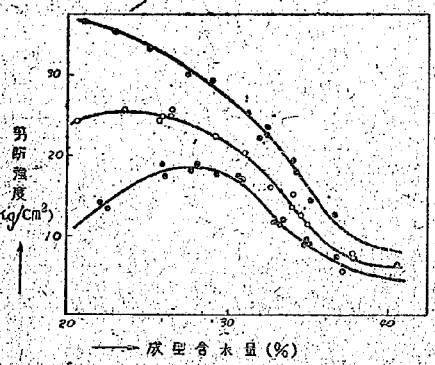


圖-4 紅土, 成型壓力 5 kg/cm²

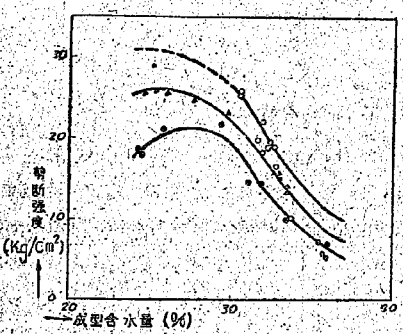


圖-5 紅土, 成型壓力 10 kg/cm²

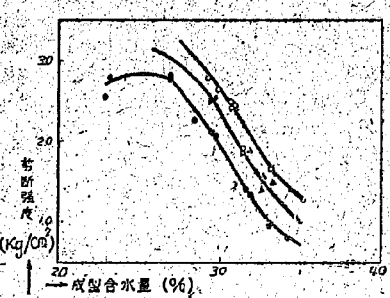


圖-6 褐色土, 成型壓力 2.5 kg/cm²

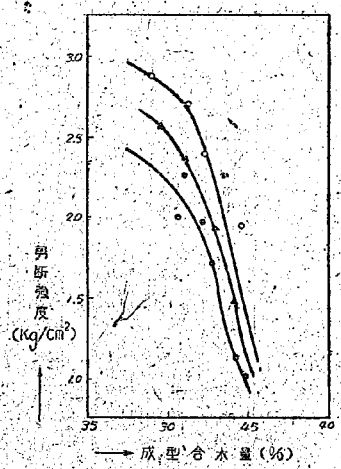


圖-7 褐色土, 成型壓力 5 kg/cm²

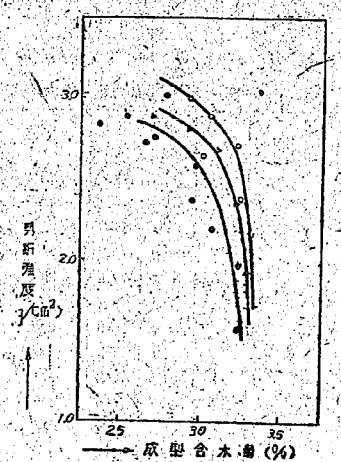
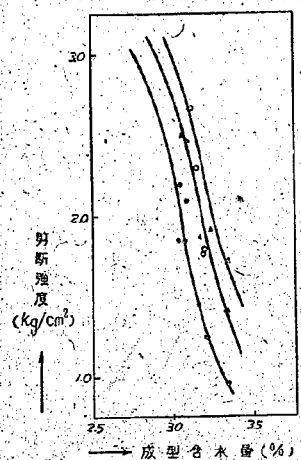


圖-8　褐色土，成型壓力　10 kg/cm²



以上の實驗結果を利用して，圖上から摩擦係數，粘着力を求めた．これを表-5～7，圖-12～19 に示した．

表-5　紅土摩擦係數及び粘着力

成型壓力 (kg/cm²)	含水率 (%)	摩擦係數 (tan φ)	粘着力 (c)
2.5	21.0	0.647	0.43
	23.0	0.545	0.82
	25.0	0.404	1.26
	27.5	0.306	1.47
	30.0	0.268	1.38
	32.5	0.268	0.92
	35.0	0.194	0.62
	37.5	0.104	0.48
	40.0	0.066	0.39
5	25.0	0.240	1.6
	27.5	0.216	1.85
	30.0	0.208	1.62
	32.5	0.196	0.98
	35.0	0.134	0.58
10	27.5	0.162	2.45
	30.0	0.186	1.74
	32.5	0.180	0.97
	35.0	0.152	0.58

圖-9　山手赤土，成型壓力　2.5 kg/cm²

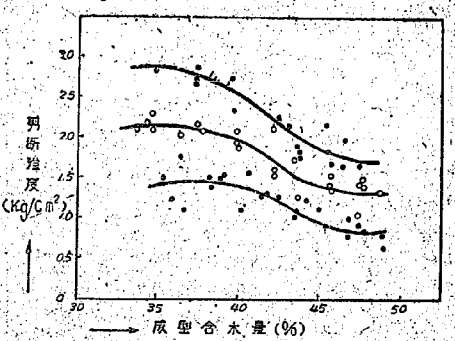


圖-10　山手赤土，成型壓力　5 kg/cm

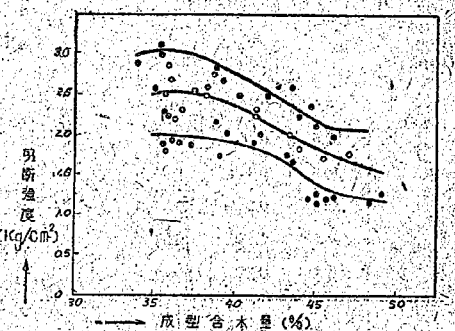


圖-11　山手赤土，成型壓力　10 kg/cm²

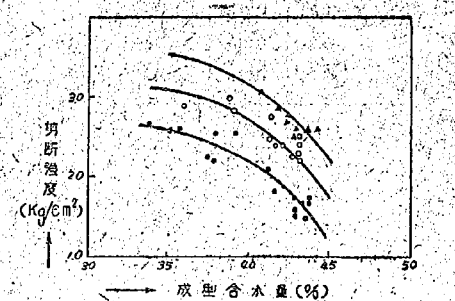


表-6　褐色土，摩擦係數及び粘着力

成型壓力 (kg/cm²)	含水率 (%)	摩擦係數 (tan φ)	粘着力 (c)
2.5	27.5	0.144	2.24
	30.0	0.156	2.02
	32.5	0.15	1.57
	35.0	0.11	0.75
5	27.5	0.074	2.71
	30.0	0.098	2.44
	32.5	0.248	1.28

表-7　山手赤土，摩擦係數及粘着力

成型壓力 (kg/cm²)	含水率 (%)	摩擦係數 (tan φ)	粘着力 (c)
2.5	35.0	0.384	0.97
	37.5	0.363	0.98
	40.0	0.302	1.03
	42.5	0.242	0.94
	45.0	0.239	0.68
	47.5	0.223	0.55
5.0	35.0	0.274	1.68
	37.5	0.268	1.68
	40.0	0.220	1.68
	42.5	0.212	1.47
	45.0	0.215	1.11
	47.5	0.216	0.97
10	35.0	0.244	2.32
	37.5	0.250	2.17
	40.0	0.268	1.86
	42.0	0.260	1.60
	44.0	0.252	1.20

圖-12　紅土，成型壓力　2.5 kg/cm²

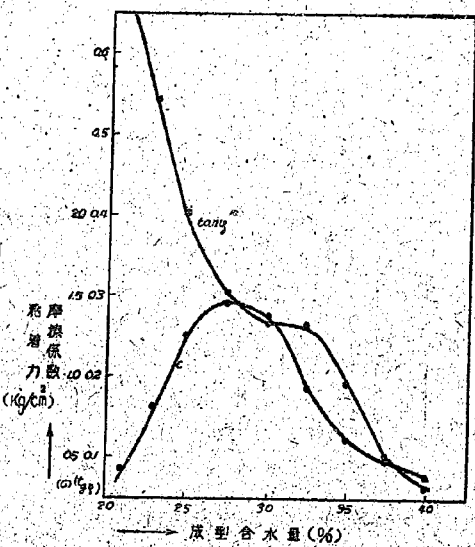


圖-13　紅土，成型壓力　5 kg/cm²

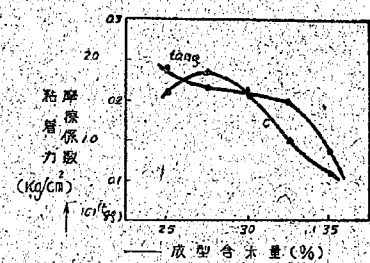


圖-14　紅土，成型壓力　10 kg/cm²

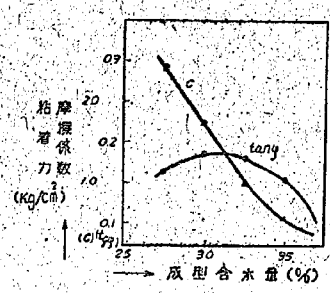


圖-15 褐色土, 成型壓力 2.5 kg/cm²

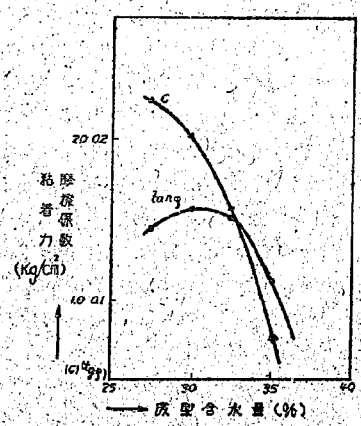


圖-16 褐色土, 成型壓力 5 kg/cm²

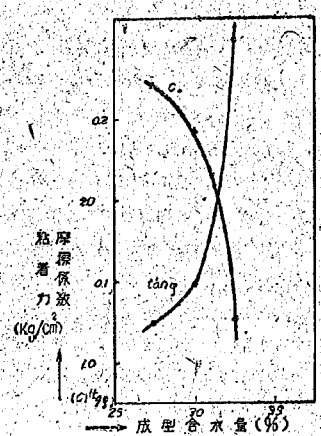


圖-17 山手赤土 成型壓力 2.5 kg/cm²

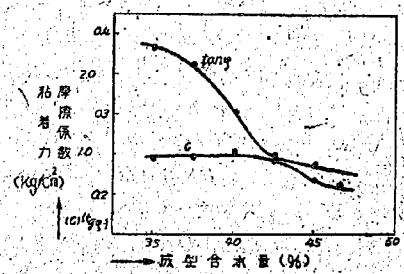


圖-18 山手赤土, 成型壓力 5 kg/cm²

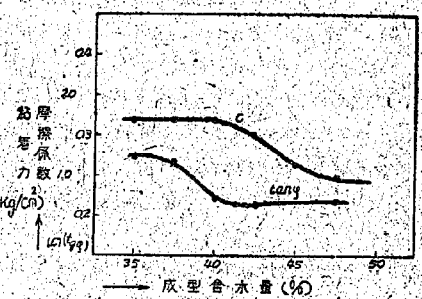
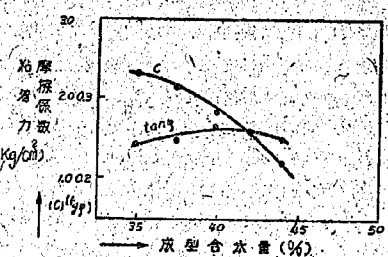


圖-19 山手赤土, 成型壓力 10 kg/cm²



剪斷試驗結果に對する考察

（1）何れの土に於ても一般的傾向として，塑性限界より5～20％小さい含水量の附近に於て最大剪斷强度を有し，塑性限界より僅か小さい含水量附近から低下して，液性限界附近に於て稍ゝ一定値に近づく．然るに此の塑性限界附近に於ける剪斷强度に低下狀況には，土に依つて著しい相違があり，且成型壓力が增加すればこの傾向は著しく明かに現はれて來る．紅土，褐色土は山手赤土に比してこの低下度が甚だしい．例へば成型壓力5 kg/cm²，上下壓力3.125 kg/cm²を例にとると，紅土では成型含水率28％附近で2.4 kg/cm²が35％附近では0.9 kg/cm²，即7％程度の成型含水率の變化に對し剪斷强度は1.5 kg/cm²の低下であり，褐色土では28％附近で2.9 kg/cm²，33％附近で1.0，即ち5％程度の成型含水率の變化に對して1.9 kg/cm²の低下，山手赤土では38％附近で2.4 kg/cm²，46％附近で1.8 kg/cm²，即8％の變化に對して0.6 kg/cm²の低下である．今これをkg/cm²％で表はすと，紅土では0.21，褐色土で0.38，赤土で0.08である．即ち紅土，殊に褐色土に於て甚だしい．此れは含水率の增加に對して，極めて危險であることを示して居る．從つて小量の含水率の增加に依つて地辷り等の心配があると一應考へられる．然し乍ら，玆に注意しなければならぬのは，今取扱つて居る含水率は人爲的な成型含水率であるから，土の保水性，吸水性，空隙率，透水度等を參照しなければ，紅土，褐色土が不安定な土壤であるといふ斷定は出來ない．後に述べる透水性，吸水性等を考へると，紅土，褐色土は，危險含水量に達する迄，水分を吸收又は保水しないと思はれるから却て安定な土壤である樣に思ふ．

（2）剪斷力は，通常大きくても紅土で3～4 kg/cm²，褐色土で3.5～4.5 kg/cm²，赤土で3.2 kg/cm²程度である．最大剪斷力を得る含水率は成型壓力，上下壓力が增加すれば減少する．これは間隙率の減少と，摩擦角の增加に依るものであるが，含水率が著しく減少すると粘着力はかへつて低下するから或る最適含水率が存在するのである．又，含水率の增加に依る剪斷强度の低下度は成型壓力が大なる程著しい．これは空氣空隙に比して水空隙は成型壓力が大きくなれば增加する．從つて剪斷に當つて絞り出される水量が多くなり，これが微細な土粒子と結合して潤滑劑の作用をする爲と思はれる．且この附近の實驗値は非常に差異が多く，明確な傾向を提出し得ない．

（3）摩擦係數は最大剪斷力附近で最大であり，それより含水率の低下に應じて減少する．最大摩擦係數は成型壓力に依つて異なるが紅土に於て0.25～0.5，褐色土に於て，紅土と同程度と推定され，赤土に於ては0.25～0.35である．即，摩擦係數に著しい相違は現はれて居ない．唯紅土，褐色土の甚しい特性は含水率の增加した場合，即，液性限界附近に於ては殆んど摩擦角が0に近づくことである．赤土に於てはこれに反して殆んど0.2以下になることはない．此の原因は紅土の土粒子そのものゝ摩擦抵抗の減少ともみられるが，寧ろ紅土の膠質部分が水を吸收して著しく液性を增加し潤滑劑の樣に作用する爲ではないかと思はれる．赤土に比して粗粒子部分の多い紅土では砂の樣な性質に近づくわけで水分を增加しても摩擦係數が沈泥分の多い赤土よりも甚だしく低下することは微粒子部分の潤滑作用として考へれば解決し易い．又一方實驗に當つて，紅土，褐色土の含水率に依る剪斷力の變化が著しい爲に僅かな實驗誤差が影響することも考へられる．何れにせよ，微細粒子が水をして潤滑作用を行ふならば，その作用の機構が一般には上下壓力に依つて變化すると考へるのが至當であり，從つて剪斷力と上下壓力の關係が直線關係を持續することは考へられず，上下壓力が增加した爲に剪斷力が減少するといふ現象が起つてもよい筈である．此の傾向は褐色土に於て認められた．然し乍ら，此の問題は土の摩擦係數の根本觀念に反するものであるから，別に質重な實驗を行つて追求して行かうと思つて居る．

（4）摩擦係數の最大値は成型壓力の增加と共に減少する結果を得た．これは紅土，褐色土のみならず赤土に於ても現はて居る．これは成型壓力が增加すれば間隙率が減少し，從つて摩擦係數は增大するといふ一般の常識

とは全く正反對な現象である．成型壓力の殘留歪が一つの土粒子の抵抗組織を作り，從つて低い上下壓力の際でも，高い上下壓力に對應する剪斷力を生ずる爲に上下壓力の上昇に對して剪斷力の上昇が伴はない爲であるとも考へられるが，これを確認するに至つて居ない．又，考へられることは成型壓力が增加し間隙率は減少するがこの際空氣空隙に對して水空隙が增大し，この單位間隙内の水分の增加が摩擦係數に影響することである．此等の考へも憶測にすぎないから今後の研究に俟たねばならぬ．

（5）紅土，褐色土の粘着力は剪斷力の最大附近の含水率に於て最大値を有し，含水率の變化に應じて減少することは摩擦係數と同じであるが，これが可成り明瞭に現はれて居る．赤土に於ては粘着力は含水率に依つて甚しい變化を示さず最大値の存在も明白ではない．

粘着力の大さは成型壓力の增加と共に著しく增加し紅土，褐色土に於ては赤土よりも著しい．紅土に於て，最大 1.5～3 kg/cm², 褐色土はこれより幾分大きく，赤土に於ては 1～2.2 kg/cm² である．

此處で考へることは，粘土量は褐色土，紅土，赤土の順に多くなるが，粘着力はこの逆になつて居る．それ故に土壤に於て結合材として働く粘土以下の微粒子の粘着力はその量よりも寧ろ質に依つて支配されると考へられる．即ち紅土，褐色土の微粒子の粘着作用は山手赤土の微粒子の粘着作用より大きいと考へてよい．

（6）紅土，褐色土に於ては粘着力の含水量の增加に伴ふ低下は，摩擦係數のそれよりも少ない含水量で初まる．これは赤土に於ては逆になつて居る．即ち含水量の增加に依る粘着力の低下は紅土，褐色土に於ては赤土に於けるよりも著しく且急速である．これは粘着力を受持つて居る微粒子の量が赤土に於けるよりも僅少である．即，含水量の變化に依る粘着力の低下にはこの微粒子の量が支配的になつて來る．これに依つて，(1) の項に述べた剪斷力の含水率に依る急速な變化はこの粘着力に依るものが多いのであらう．

（7）間隙率の摩擦係數に及ぼす影響は重大であるが，この實驗に於ては成型壓力，成型含水率が決定すれば間隙率は定まつて了ふので，單獨に取扱ふことが出來なかつた．唯，間隙率の大小と含水率の大小の何れが摩擦係數に影響するかは，砂の場合と異つて興味ある問題である．

（II）壓縮試驗

土の壓縮强度は土の狀態に依つて著しく變化し，又その破壞機構も未だ明らかでない．多くの場合，地盤の支持力に對する目安として，壓縮强度を問題とする場合が多いのであるが，先に述べた樣に，含水量，垂直壓力に對して土の密度は時間的な影響を除けば一定して來るのであつて，從つて，通常壓縮强度と稱されて居るものは，自然に於て載荷重を受けた場合の土の剛性とは著しく異なつて來る．在來の研究に依れば，土は或る程度迄彈性を有して居ると考へられて居るが，荷重の時間的變化，靜荷重，動荷重かに依つて根本的に異つた抵抗狀況を示すのである．この實驗に於ては，土の壓縮に對する抵抗の狀況を基本として研究を進めるのが常道であるが，これには著しい困難が伴ふので，單に壓縮强度を求め，土の剛性に對する目安とした．又，歪は時間の影響が著しい爲に，測定しなかつた．

供試體は 4 瓩立方體で剪斷供試體と同一のものであり，成型壓力も同じく 2.5, 5, 10 kg/cm² の三種とした．强度は成型直後の强度である．尙成型含水量は剪斷試驗の場合と同じ樣な範圍で變化させた．

試驗結果は 表-8～10, 圖-20～22 に示した．

表-8 紅土壓縮試驗結果

成型壓力	2.5 (kg/cm²)				5 (kg/cm²)				10 (kg/cm²)			
	試料番號	試驗體 含水率	試驗體 間隙率	壓縮強度 (kg/cm²)	試料番號	試驗體 含水率	試驗體 間隙率	壓縮強度 (kg/cm²)	試料番號	試驗體 含水率	試驗體 間隙率	壓縮強度 (kg/cm²)
	1	21.8	67.2	0.43	21	22.3	66.0	1.16	51	21.7	63.4	2.95
	2	21.8	67.9	0.64	22	22.6	66.3	1.25	52	21.6	62.2	2.88
	3	27.4	64.6	1.03	23	25.4	65.1	1.88	53	25.6	60.7	3.69
	4	27.8	63.6	1.25	24	25.9	65.9	1.73	54	25.1	61.6	3.50
	5	26.0	67.9	0.71	25	28.0	64.2	1.94	55	26.7	59.8	3.75
	6	28.6	68.4	0.81	26	27.6	63.4	1.94	56	27.3	60.1	4.06
	7	29.2	71.2	0.84	27	25.0	64.2	1.86	57	27.6	59.2	4.25
	8	30.9	65.3	1.03	28	27.3	63.8	2.17	58	27.1	60.2	3.69
	9	31.0	65.7	1.03	29	30.2	60.4	2.10	59	28.6	59.5	3.83
	10	30.6	65.9	0.98	30	31.1	61.4	2.28	60	29.8	59.3	4.43
	11	32.4	64.1	1.21	31	32.6	61.1	2.18	61	31.6	59.1	3.12
	12	32.6	64.8	1.20	32	33.3	60.1	1.57	62	31.4	57.8	3.47
	13	33.0	63.7	1.20	33	33.4	60.6	1.63	63	31.0	57.8	3.17
	14	33.6	64.8	1.00	34	33.4	61.0	1.91	64	32.0	58.5	2.85
	15	33.4	64.4	0.97	35	33.6	61.4	2.09	65	31.5	58.1	2.81
	16	35.6	63.1	0.88	36	35.2	60.9	1.41	66	33.8	61.1	1.81
	17	35.9	61.4	0.81	37	35.3	61.4	1.03	67	34.1	60.5	1.69
	18	37.4	63.6	0.59	38	35.2	61.1	1.01	68	35.2	60.9	1.19
	19	37.2	63.7	0.68	39	37.1	62.8	0.81	69	35.4	61.0	1.19
	20	37.3	63.9	0.68	40	37.2	62.6	0.68	—	—	—	—
	—	—	—	—	41	38.7	64.0	0.50	—	—	—	—

表-9 褐色土壓縮試驗結果

成型壓力	2.5 (kg/cm²)				5 (kg/cm²)				10 (kg/cm²)			
	試料番號	試驗體 含水率	試驗體 間隙率	壓縮強度 (kg/cm²)	試料番號	試驗體 含水率	試驗體 間隙率	壓縮強度 (kg/cm²)	試料番號	試驗體 含水率	試驗體 間隙率	壓縮強度 (kg/cm²)
	1	28.8	65.4	0.71	21	21.7	64.0	1.41	41	24.3	59.9	3.44
	2	27.8	64.9	0.76	22	22.3	64.2	0.80	42	25.2	54.6	2.62
	3	28.4	65.3	0.74	23	25.5	63.0	1.84	43	27.1	56.6	3.38
	4	29.0	64.3	0.76	24	24.7	62.7	1.15	44	26.9	57.2	3.56
	5	28.5	65.3	0.85	25	32.2	59.4	1.0	45	30.1	59.4	2.31
	6	34.2	63.2	0.73	26	31.5	58.8	1.15	46	31.4	57.3	1.81
	7	32.5	63.5	0.56	27	32.7	59.6	0.80	47	32.1	57.7	1.62
	8	34.5	62.1	0.51	28	32.4	59.6	0.91	48	32.4	63.3	2.88
	9	34.1	62.1	0.48	29	23.4	62.8	1.09	49	34.4	59.6	1.28
	10	35.4	64.0	0.48	30	22.9	63.5	1.22	50	33.9	59.3	1.15
	11	35.9	63.1	0.41	31	25.6	62.1	1.19	51	33.8	59.2	0.80
	12	24.5	67.4	0.48	32	26.2	62.2	1.37	52	35.5	60.1	0.64
	13	22.3	66.1	0.61	33	42.3	64.9	0.90	—	—	—	—
	—	—	—	—	34	37.7	63.0	0.65	—	—	—	—

表-10 山手赤土壓縮試驗結果

成型壓力 (kg/cm²)	試料番號	試驗體 含水率	試驗體 間隙率	壓縮強度 (kg/cm²)
2.5	1	30.5	72.0	0.63
	2	31.7	72.4	0.53
	3	33.4	72.2	0.47
	4	33.5	72.5	0.54
	5	34.1	73.0	0.51
	6	35.8	—	0.69
	7	36.6	—	0.50
	8	37.3	72.3	0.59
	9	37.2	72.3	0.64
	10	38.4	72.7	0.58
	11	39.5	73.1	0.71
	12	40.4	73.5	0.55
	13	40.9	73.3	0.84
	14	41.0	73.3	0.76
	15	41.1	73.3	0.74
	16	42.8	72.0	0.71
	17	42.3	71.7	0.52
	18	42.4	71.3	0.86
	19	42.3	72.3	0.60
	20	43.0	72.9	0.70
	21	43.0	70.1	0.61
	22	43.8	72.0	0.61
	23	43.6	72.5	0.63
	24	43.1	72.8	0.73
	25	44.8	71.7	0.60
	26	44.9	71.5	0.53
	27	44.0	72.3	0.65
	28	44.7	71.0	0.55
	29	43.7	71.5	0.61
	30	45.7	76.1	0.46
	31	43.6	71.0	0.59
	32	45.1	69.3	0.45
	33	45.1	71.7	0.54
	34	46.8	69.2	0.49
	35	46.4	70.4	0.58
	36	46.8	68.1	0.64
	37	46.7	68.5	0.71
	38	47.3	69.8	0.51
	39	47.8	70.1	0.57
	40	50.0	81.6	0.39
	—	—	—	—
	—	—	—	—

成型壓力 (kg/cm²)	試料番號	試驗體 含水率	試驗體 間隙率	壓縮強度 (kg/cm²)
2.5	41	56.1	75.7	0.64
	42	58.8	77.0	0.56
	43	57.3	78.8	0.60
	44	62.8	79.6	0.50
5.0	51	30.3	70.5	0.81
	52	31.7	71.0	0.75
	53	33.7	70.9	0.92
	54	33.3	70.5	1.20
	55	33.0	70.2	1.20
	56	35.8	71.7	0.90
	57	36.0	72.0	1.16
	58	37.9	70.3	0.97
	59	37.6	70.0	1.23
	60	38.7	70.2	1.30
	61	38.0	71.5	1.39
	62	38.0	71.2	1.65
	63	38.1	70.9	1.78
	64	37.9	70.6	1.25
	65	38.0	70.5	1.97
	66	41.6	70.0	1.44
	67	42.4	79.8	1.47
	68	41.4	68.6	1.81
	69	42.7	65.1	0.54
	70	43.6	69.9	1.06
	71	43.2	69.2	1.06
	72	44.7	67.4	0.67
	73	45.1	67.6	0.72
	74	45.9	67.5	0.86
	75	45.6	67.7	0.82
	76	47.5	69.9	1.22
	77	46.0	68.7	1.06
	78	45.5	68.1	1.09
	79	45.8	68.2	1.12
	80	46.2	68.1	0.91
	81	46.7	68.7	0.97
	82	45.5	68.9	0.90
	83	46.1	68.5	0.79
	84	45.6	67.8	1.16
	85	46.0	68.4	1.41
	86	45.5	68.1	1.09

表-10 2 山手赤土壓縮試驗結果

成型壓力 (kg/cm²)	試料番號	試驗體 含水率	試驗體 間隙率	壓縮强度 (kg/cm²)
	91	28.0	69.2	1.21
	92	28.6	69.1	2.00
	93	35.2	69.1	1.75
	94	34.2	69.1	2.06
	95	36.4	69.8	1.53
10	96	35.9	69.5	2.60
	97	34.8	69.0	2.19
	98	38.2	69.6	1.88
	99	38.2	69.3	2.40
	100	39.3	67.6	2.23
	101	38.5	67.0	2.34
	102	40.3	68.8	2.06
	103	40.3	68.2	3.12
	104	42.2	71.2	2.50
	105	43.6	66.0	1.28
	106	43.3	66.0	1.50
	107	43.1	64.6	1.75
	108	43.0	65.4	1.35
	109	43.9	66.1	1.35
	110	43.6	65.6	1.35
	111	43.8	66.1	2.28
	112	43.9	66.1	2.18
	113	43.7	65.9	1.86
	114	43.9	67.0	1.97
	115	44.0	66.8	2.10
	116	44.0	66.7	1.72
	117	44.5	67.4	1.83
	118	44.5	67.2	2.03
	119	44.6	66.8	2.03
	120	44.3	66.5	1.91
	121	44.6	66.8	2.06
	122	44.4	66.8	2.38
	123	44.6	66.8	2.34
	124	45.4	67.0	2.44
	125	45.7	67.6	1.94
	126	45.8	67.9	1.63
	127	49.4	73.4	1.88
	128	59.8	75.4	2.16
	129	60.5	76.7	1.85
	130	—	—	—
	—	—	—	—
	—	—	—	—

圖-20 紅 土

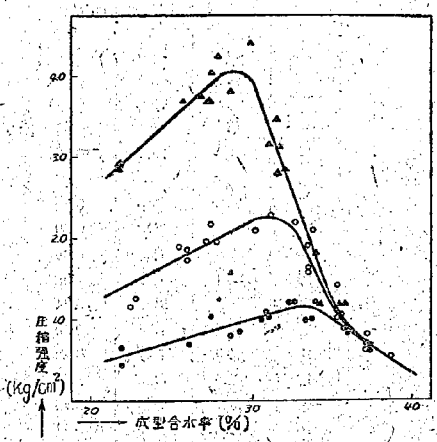


圖-21 褐 色 土

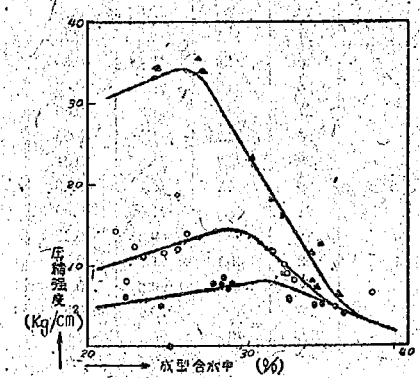
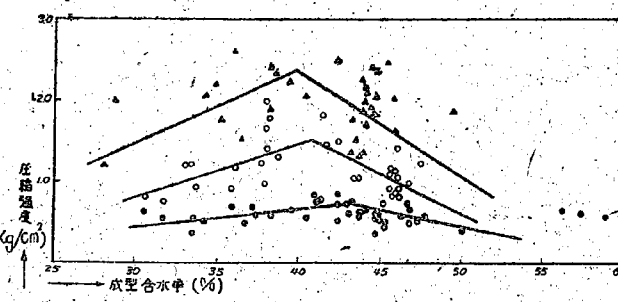


圖-22　山手赤土



壓縮試驗結果に對する考察

壓縮試驗結果は剪斷に比し，比較的明瞭な結果を得ることが出來た．紅土，褐色土は含水率及び成型壓力の影響を非常に敏感に表はして居る．然るに赤土は剪斷試驗の結果とは逆に，含水率の影響が極めて不明瞭であつて一定の傾向を提示して居ない．これは摩擦角，粘着力の含水率に依る變化が僅少な爲である．結果を要約すれば

（1）剪斷強度最大附近の含水率で壓縮強度最大値を示し，これより含水率の增減に從つて減少して居るが，成型壓力大なる程この減少度は著しい．H，成型壓力の影響は極めて明白に現はれて居り，又，最大値を與へる含型率以下の所では成型壓力と壓縮強度の比が大體一定値になつて居る．

（2）壓縮強度は紅土で最大 4.0, 2.1, 1.1 kg/cm², 褐色土で 3.4, 1.5, 0.8 kg/cm², 赤土で 2.4, 1.5,0.7 kg/cm² である．卽，成型壓力 10 kg/cm² では 1 : 0.85 : 0.6, 5 kg/cm² では 1 : 0.7 : 0.7, 2.5 kg/cm² では 1 : 0.72 : 0.63 である．卽，5～10 kg/cm² の成型壓力に依り紅土は赤土に比して著しく强度を增加する．

（3）最大壓縮强度の含水率は最大密度の含水率よりも僅か多い．又，含水率の增加に依る急速に强度の低下する區域は剪斷强度の場合と同樣であつて，空隙に水が滿たされる度が多くなれば粘着力の劇しい減少に依つて强度が低下する．又，成型壓力が增加すると最大强度を生ずべき含水率が減少する．卽ち，最大强度をうるためには，間隙率の小さいことの外に空氣空隙と水空隙の間の一定の比率が存在するのではないかと思はれる．これは剪斷試驗に於ても同樣であつた．

含水率が塑性限界を超過する附近に於ては成型壓力の影響は全く現はれず，含水量のみが支配的なものとなる．赤土に於てはかゝる現象はない．卽ち前に述べた樣に紅土，褐色土に於ては或る含水率以上になると粘着力を失ひ，砂質に近づく爲である．

（4）含水率，間隙率の關係

壓縮試驗及び剪斷試驗に用ひた試料の含水率-間隙率の關係を成型壓力に應じて圖示すると 圖-23～25 の樣になる．

塑性限界以上になると，含水率と間隙率の關係は大體一定となり，成型壓力に關せず直線である．然し，この傾向は紅土，褐色土に於ては赤土程明瞭ではない．卽相當大きな含水率に至る迄は成型壓力に依つて，空隙のに依る滿たされ方に差が現はれて居る．

最大密度は紅土では成型壓力 2.5, 5, 10 kg/cm² のとき含水率 35 % で間隙率 63 %, 33 % で 61 %, 31 % で

圖-23　紅　土

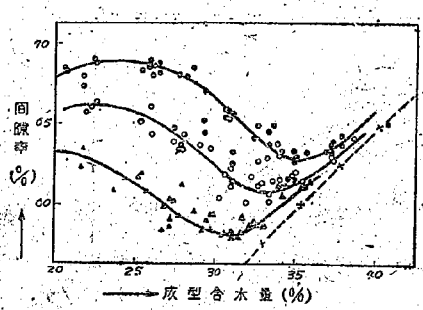
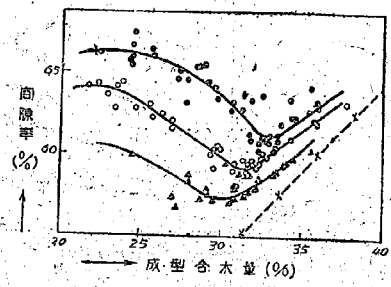


圖-24　褐色土

……×……は飽和したときの關係



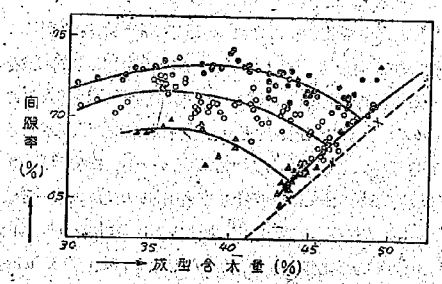
58 %，褐色土では 33 %で61 %，31.5 %で 50 %，30 %で57 %であり，赤土では 44 %で 70 %，46.5 %で 68.5 %，44 %で 66 %である．

（Ⅱ）透水試驗

間隙率を變化させて透水係數を測定した．試料の關係上，褐色土に就いてはこれを行はなかつた．試料の厚さは 4.5 糎，半徑 5 糎の圓筒形で側壁の影響を除くために中央部のみをとつた．

水頭は 100 糎一種類とした．結果は 表-11～12 に示した．赤土の結果は 圖-26 に圖示した．

圖-25　山手赤土



表からみられる樣に，赤土では間隙率と透水係數の關係が略々規則關係を示すことは一般の法則通りであるが，紅土に於ては非常に複雜な結果しか得られて居ない．一般に透水試驗の際透水を始めてから，一定の水量を

表-11　紅土透水係數試驗結果

試驗番號	含水率 (%)	間隙率 (%)	透水係數
1	34.0	65.3	628.8×10^{-6}
2	34.9	65.5	185.1 〃
3	35.2	65.0	382.0 〃
4	38.1	65.1	83.4 〃
5	38.4	65.8	5.2 〃
6	〃	〃	0
7	38.9	65.0	12.7 〃
8	39.5	65.1	0

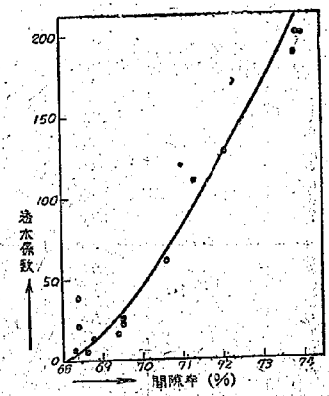
表-12　山手赤土透水係數試驗結果

試驗番號	含水率 (%)	間隙率 (%)	透水係數
1	39.9	74.0	200.3×10^{-6}
2	41.0	73.3	187.6 〃
3	41.3	73.9	200.4 〃
4	41.5	71.3	110.2 〃
5	43.3	72.1	128.7 〃
6	44.0	72.3	171.2 〃
7	44.4	71.0	120.5 〃
8	44.6	70.6	61.2 〃
9	44.7	69.5	23.6 〃
10	45.6	69.5	25.0 〃
11	46.0	68.4	39.8 〃
12	47.4	68.8	12.7 〃
13	47.6	68.6	5.3 〃
14	47.8	68.4	20.3 〃
15	49.1	69.4	1.6 〃
16	49.8	68.3	6.1 〃

透水するに至る迄は相當の時間を必要とし，初期透水量は一定に落付いたときの透水量の2倍程度である．然るに紅土に於ては一定透水に至る迄1～2時間を要し，且透水量は初期透水量の¼～½である．その上，この一定透水の狀態が持續される場合は極めて稀れであつて，次第に減少するか若しくは土粒子が流出して崩壞してしまふ．

表-11 から明かな樣に紅土の透水係數は間隙率が僅か65.%から65.8 %の間で0～62.8×10⁻⁶迄變動する．間隙率の實驗精度はせいぜい0.1 %であるから，間隙率透水係數の關係を求めることは無意味であり，又不可能である．即ち紅土に於ては，間隙率 65 % 以下では水頭差100糎の場合不透水性，これ以上では透水に依つて土粒子が流出し，透水層を形成することはない．と言ふことが出來る．この紅土の性質はⅠの推論に述べた樣に，間斷なく，飽水と空洞を繰り返すといふ紅土の生成條件を非常によく說明すると思ふ．

圖-26　山手赤土



扨て，かゝる紅土の特異性の原因としては紅土は微粒部分が少ない爲に，間隙率が少し增加すれば分離して流れてしまふことゝ，或る一定間隙率に達すれば，不透水性の薄層を表面に形成する爲ではないかと思はれる．これは壓密透水試驗を行つて，間接的な方法で透水係數を求めれば尙明白になるであらう．水頭差を與へて透水係數を測定することは，紅土の樣な土質の際には不適當である．何れにせよ，紅土の膠質粘土部分の物化學的性質が明白にならぬ限り解決出來ない．透水中の土粒子の流失又は組織の變化に依る透水量の增減は著しく，從つて透水係數を間隙率に對應させて一定値として考へることに既に無理があり，寧ろ透水中の流量の變化を精細に實驗する必要がある．又，水頭差を變化させた場合の透水，不透水の限界を見出すことが重要である．これらは試料の不足の爲，實施出來なかつた．

（Ⅳ）沸化試驗

土粒子結合狀態の水に對する安定性を試驗すべく，沸化試驗を行つた．安定度は沸化時間の大小に依つて決定する．此の試驗に於ては，安定性を一定の物理指數として提出することは出來ないが，一つの目安として考へることは出來よう．裝置は前に述べた星埜助教授の論文中に說明してある．試驗結果は表-13～14 に掲げた．

供試體の大さは直徑 2.5 糎，高 2.5 糎の圓筒形，成型壓力は 2.5, 5, 10 kg/cm² の三種，成型して一週間氣乾狀態に保つた後實驗した．又，比較の爲，同じ供試體に就いて壓縮試驗を行つた．成型含水率は 20～40 % とした．

結果を圖示すれば，成型壓力毎に一定の傾向を示して居るが，これを間隙率の函數として表はすと，圖-27，圖-28 の樣に成型壓力の影響を受けて居ない．

結果を要約すれば次の樣になる．

（1）紅土では間隙率 50 % 附近，褐色土では 45 % 附近で著しく沸化時間が增大する．即ちこの附近の間隙率では水に對する抵抗性が極めて大きくなる．

（2）沸化時間は殆んど間隙率のみの函數と考へることが出來る．勿論，氣乾狀態で實驗を行つたのであるから，含水率は大體 5～10 % の範圍であるが，これが著しく異つて來れば異つた結果を得るであらう．

表-13 紅土，沸化試驗結果

試驗番號	成型壓力 (kg/cm²)	成型時 含水率 (%)	成型時 間隙率 (%)	試驗時 含水率 (%)	試驗時 間隙率 (%)	沸化時間 (秒)	壓縮强度 (kg/cm²)
1	2.5	27.7	66.2	7.78	65.0	8	2.08
2		33.0	64.3	6.83	58.7	16	7.66
3		33.1	64.2	7.32	58.9	15	8.50
4		36.0	62.2	8.23	53.7	28	16.90
5		37.5	62.3	8.92	51.5	111	21.90
6		38.5	63.2	8.01	49.6	195	19.01
7		39.9	64.6	8.64	51.5	88	11.73
8	5.0	26.5	64.9	8.4	63.4	10	2.42
9		28.5	63.5	7.7	59.4	12	5.11
10		30.5	61.2	5.0	55.7	13	10.89
11		33.4	60.3	4.8	55.3	25	14.95
12		35.7	61.0	4.9	51.3	77	20.60
13		38.6	63.2	4.8	46.6	168	32.83
14		40.0	64.4	4.2	47.0	214	27.03
15	10.0	23.7	62.2	4.7	61.7	15	3.57
16		26.0	60.5	4.5	59.5	22	7.03
17		28.5	58.0	6.6	53.5	29	16.20
18		31.0	57.1	6.4	50.4	88	20.70
19		33.1	57.9	7.8	48.3	130	26.70
20		35.1	59.8	5.8	48.5	155	24.20
21		37.1	61.6	6.7	46.4	142	29.10
22		39.6	64.3	6.8	46.5	124	34.50

表-14 褐色土，沸化試驗結果

試驗番號	成型壓力 (kg/cm²)	成型時 含水率 (%)	成型時 間隙率 (%)	試驗時 含水率 (%)	試驗時 間隙率 (%)	沸化時間 (秒)	壓縮强度 (kg/cm²)
1	2.5	27.8	63.9	9.5	62.2	8	2.76
2		28.2	63.8	9.2	59.4	7	3.55
3		32.5	60.9	10.5	53.2	11	14.00
4		34.6	59.8	10.6	50.0	24	18.16
5		36.3	61.4	11.0	51.0	25	17.73
6	5.0	23.2	63.2	8.6	60.7	8	1.76
7		29.6	60.3	12.7	54.3	33	1.06
8		32.5	58.8	15.2	51.7	17	17.63
9		34.9	59.2	10.1	50.8	32	16.83
10		39.5	62.6	8.5	50.7	24	14.60
11	10	23.3	59.8	6.4	55.7	9	5.42
12		23.7	55.2	6.6	47.8	18	22.50
13		29.2	54.9	8.5	47.3	26	22.56
14		34.5	58.7	6.8	45.2	57	27.34
15		35.5	60.0	6.0	47.8	23	19.13

圖-27　紅　土

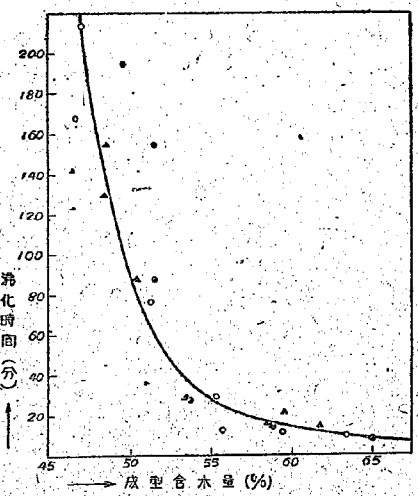
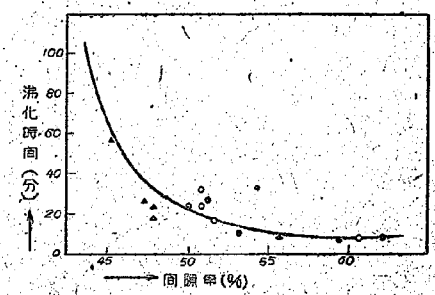


圖-28　褐色土



(3) 間隙率が著しく小さくなれば，吸水膨脹に依つて裂開を生じ，沸化時間が減少する傾向がある．初めに述べた樣に，沸化時間と土の水に對する安定性とを如何に關係付けるかは未だ疑問である．

III. 結　　語

以上述べて來た所に依つて，紅土の土性を判斷すると次の樣になる．但し，此處に取扱つた紅土は一種のみであつて，紅土全般に對して，その儘適用されるか否かは問題であるが，紅土系土質の特質は十分窺知し得ると思ふ．

(1) 紅土は細粗粒，適當に混合して居て土質としては良好であり，膠質部分に劇しい特性がある．從つてこの膠質部分の性質を十分活用する樣な工法が必要である．

(2) 水分の增加に依る安定性の喪失は比較的顯著である．從つて水分の增加に對する抵抗性を增大せしめる必要がある．

(3) 乾燥時の剛性は非常に大きく，煉瓦として用ひ得る材料である．

(4) 透水性に當つては，透水性ならざる樣に十分注意しなければならぬ．

總じて，水分の增加に對しては十分警戒の要があるが，簡單な施工に依つて防ぎ得る土質であり，十分壓密乾燥すれば堅固になるのであるから，厄介な施工上の問題を惹起することはないであらう．