

32. 土の收縮に關する二三の實驗

地震研究所 飯田 波 事

(昭和12年3月16日發表——昭和12年3月22日受理)

1. 緒 言

東京近傍特に江東地帯¹⁾或ひは丸の内地帯²⁾等の地盤沈下に關する最近の研究によると、其の原因の大部分は地表面にある軟弱地層の收縮に在る様である。従つて此の地表面の軟弱地層の收縮を生ぜしむ可き原因を調査研究する一手段として、土の種々なる物理的、力學的諸性質の研究が必要となる。從來此の方面の土の性質の研究特に表面荷重或ひは自重による土の壓縮沈下³⁾、水分減少による土の收縮⁴⁾等の實驗的研究は澤山あるが、振動による土の收縮沈下を取扱つたものが尠い様である。

吾々は自動車、電車等の交通機關或ひは工場の電動機等其の他のものが地面に與へる振動の相當大なる事を日常經驗する所であるが、石本博士⁵⁾の最近の研究によれば、地面微動に消長があり1日中に於て其の微動振幅の最大は日中に於てであり、或る場合には其の値が相當大なる値に達する事もある。又夜中に於て其の微動振幅が最小となり微動も休息した様な状態となる。斯くの如く晝夜の間に於て微動に消長のあるのは、其の原因の大部分は交通機關等に因るものであらうと思はれる。

本實驗の目的は此等の問題と關聯して行はれたもので、自然の堆積状態の土に於てその含水量減少による收縮と振動の影響による收縮とを比較研究し、又一方土の含水量減少による土の密度及び高さの變化は土の種類及び状態によつて差異ある事を前論文⁶⁾に於て指摘したが、今回は更に詳細に此等の關係を實驗的に求めたのである。猶最後に此等の實驗結果より土の構造に關し二三の考察を試みる事とした。

試験土の種類は本郷大學構内に於て地表面下2mの表面層中より採取せる赤土及び

1) 宮部直巳 地震研究所彙報 10 (1932), 884; 13 (1935), 587; 13 (1935), 763; 15 (1937), 102; 基礎研究 1 (1937), 16.

渡邊貫 地質學雜誌 42 (1935), 634; 鐵道省土質調査委員會報告 4 (1936), 63.

2) 北澤五郎 基礎研究 1 (1937), 11.

3) 鐵道省土質調査委員會報告; 基礎研究; 内務省土木試驗所報告等参照.

4) 宮部直巳 地震研究所彙報 13 (1935), 763.

高田昭 内務省土木試驗所報告 20 (1931), 1.

5) 石本巳四雄 地震研究所談話會發表.

6) 石本巳四雄, 飯田波事 地震研究所彙報 15 (1937), 67~86.

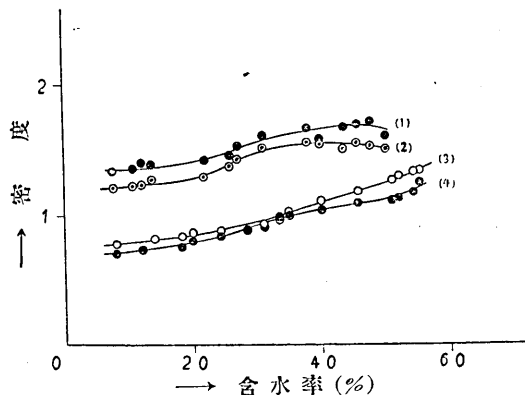
丸の内第一生命保險相互株式會社建築敷地の地表面下約8mの表面層中より採取せる沈泥質粘土にして、前回の採用したものと全く同種類のものである。

2. 實 驗

(1) 靜力學的實驗及び結果

此の實驗は要するに試験土の含水量を減少せしめ、含水量と體積減少或ひは密度の變化を測定したものである。

先づ最初採取せる自然状態に近い土塊より切斷面積は何れも4.5cm×4.5cm、高さは本郷の赤土に於て約30cm、20cm、15cm等、丸の内の沈泥質粘土に於て約25cm、15cm、10cm等の試験土柱を切り取り其の重量及び體積を測定し、次に此等を略々温度一定の室に放置し極めて徐々に水分を蒸發せしめ、約1ヶ月に亘り1日に1回乃至2回宛其の重量及び體積、高さの變化等を測定した。又同時に含水量をも測定したが、最初の含水率は本郷の赤土では55.2%、丸の内の沈泥質粘土では50.0%であつた。體積の測定には物指にて縦、横、高さを量りそれより求める方法及び水銀を充した壺の中に土柱を押し込み、土柱の體積により流出した水銀の重量を測定し、此の時の温度に相當する密度を用ひて土柱の體積を知る方法の兩方法を同時に採用したが、兩者は測定の誤差の範圍内に於て一致した。斯くして體積と重量との關係より土の密度を測定した。その密度と含水量との關係は第1圖、第I表に示してある。第1圖に示す如く、本郷の赤土は丸の内の沈泥質粘土に比較して密度が小さく又含水量に對する變化も異つてゐる。即ち含水量に對する其



第1圖 含水量と密度との關係

縱軸：密度 横軸：含水量(%)

(1), (2) は丸の内の沈泥質粘土

(3), (4) は本郷の赤土

(1), (3) は最初20分間振動を與へ後水分を減少させた場合である。

Fig. 1. Diagram showing the relation between moisture content and density of soil in the natural state.

Abscissa: moisture content (%). Ordinate: density.

(1), (2): the silty-clay at Maru-no-uti.

(3), (4): the loam at Hongō.

(1), (3): showing the effect of vibration for 20 min at initial state.

7) 石本巳四雄, 飯田波事 地震研究所彙報 14 (1936), 632. 機械的分析の結果は同論文の中の第1表に示してある。

第 I 表 含水率及び密度

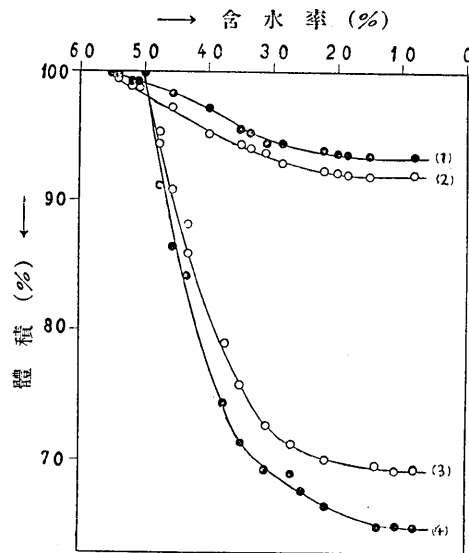
沈泥質粘土 (丸の内)			赤 土 (本 郷)		
含 水 率	密度 (No. 1)	密度 (No. 2)	含 水 率	密度 (No. 1)	密度 (No. 2)
50.0	1.60	1.49	55.2	1.34	1.25
47.6	1.72	1.56	54.3	1.33	1.18
45.6	1.70	1.54	52.0	1.30	1.13
43.4	1.67	1.59	51.0	1.27	1.11
39.8	1.60	1.68	45.7	1.18	1.09
37.8	1.67	1.63	40.0	1.11	1.04
30.9	1.61	1.53	35.0	1.03	1.00
27.0	1.53	1.48	33.6	0.97	0.99
25.9	1.45	1.39	31.1	0.94	0.93
21.9	1.42	1.33	28.6	0.90	0.89
13.6	1.39	1.29	22.2	0.88	0.84
12.1	1.38	1.26	20.0	0.86	0.80
10.8	1.36	1.21	18.2	0.84	0.75
8.0	1.34	1.20	8.0	0.78	0.73

の密度の變化は本郷の赤土に於ては殆ど直線的關係を保つて變化するが、丸の内の沈泥質粘土は含水量の減少に對し最初はその密度を増加する傾向にあるが、含水率30%以下となるに及び密度は減少し其の變化は本郷の赤土の如き傾向を示す事が判明した。圖中番號を附してあるのは土に一定時間約20分間共鳴の状態に於て振動を與へた場合と然らざる場合とを比較對照したものであつて、番號(1)、(3)は何れも振動による場合で、振動の影響により體積の減少を生じ密度が大となつてゐる。

含水率に對する體積變化、高さの變化、横幅の變化等は第2圖、第3圖、第4圖に示してある。又縦幅の變化もあるが此れは横幅の變化と同程度のため其の圖は省略した。

含水量の減少に伴ひ體積、高さ、横幅等は何れも減少するが、本郷の赤土

と丸の内の沈泥質粘土とは其の減少状態が異り、丸の内の土は50%より30%迄



第 2 圖 含水率と體積との關係

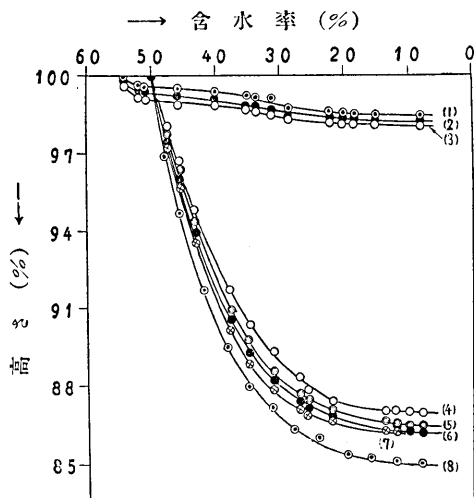
- (1), (2) は本郷の赤土
- (3), (4) は丸の内の沈泥質粘土
- (1), (3) は最初 20 分間振動を與へ後水分を減少させた場合である

Fig. 2. Diagram showing the relation between volume and moisture content.

Abscissa: moisture content (%).
Ordinate: volume (%).

- (1), (2): the loam at Hongō. (3), (4): the silty-clay at Maru-no-uti. (1), (3): showing the effect of vibration for 20 min at initial state.

の含水率の變化に對し體積，高さ，横幅等の諸量は急激に減少する。本郷の赤土⁸⁾に於



第 3 圖 含水率と高さとの關係
縦軸：高さ (%) 横軸：含水率 (%)

- (1), (2), (3) は本郷の赤土
 (1) 初めの高さ $h_0=21.2$ cm 振動を與へずに水分を取つた場合
 (2) $h_0=36.6$ cm 〃
 (3) $h_0=23.1$ cm 最初 20 時間振動を與へ後水分を取つた場合
 (4), (5), (6), (7), (8) は丸の内の沈泥質粘土
 (4) $h_0=15.1$ cm 振動を與へずに水分を取つた場合
 (5) $h_0=15.1$ cm 最初 20 分間振動を與へ後水分を取つた場合
 (6) $h_0=24.9$ cm 振動を與へずに水分を取つた場合
 (7) $h_0=24.9$ cm 最初 20 分間振動を與へ後水分を取つた場合
 (8) $h_0=14.8$ cm 最初 20 時間振動を與へ後水分を取つた場合

Fig. 3. Diagram showing the relation between height and moisture content.
 Ordinate: height (%). Abscissa: moisture content (%).

- (1), (2), (3): the loam at Hongō.
 (1) Initial height $h_0=21.2$ cm. No vibration. (2) $h_0=36.6$ cm. No vibration.
 (3) $h_0=23.1$ cm. Vibration for 20 hours at initial state.
 (4), (5), (6), (7), (8): the silty-clay at Maru-no-uti.
 (4) $h_0=15.1$ cm. No vibration. (5) $h_0=15.1$ cm. Vibration for 20 min at initial state. (6) $h_0=24.9$ cm. No vibration. (7) $h_0=24.9$ cm. Vibration for 20 min at initial state. (8) $h_0=14.8$ cm. Vibration for 20 hours at initial state.

ても含水率が約 30% に迄減少する間は以上の諸量は略々直線的關係をなして減少し、

8) 高田氏の研究によれば含水率 w と収縮率 ε_s との間に $\frac{\varepsilon_s}{w} = R$ なる關係があり、即ち直線的關係が存在する。一般には體積減少の始まる時の含水率を W とすれば $(W-w)R = \varepsilon_s$ 、 $W > w$ なる關係がある。土木試験所内地表下約 3 m の箇所より採取せる赤土の収縮は 100% 以上より約 40% 迄の含水率の變化に對し體積減少率は 10% 程度であるが、40% 以下の含水率減少に對し 18% 程度の減少率を生ずる。高田昭 前掲

終局に於ける減少は最初の値に比して體積に於て約 8%，高さに於て約 2%，横幅に於て同じく 2% である。此等の減少の割合は丸の内の沈泥質粘土の終局の値即ち體積に於て約 36%，高さに於て約 15%，横幅に於て約 13% の減少等の値に比して何れも小なる値を示してゐる。

今高さの收縮を一例にとりその收縮の割合と含水率との關係を求めれば次の如くなる。最初の高さを h_0 ，收縮量を δh ，含水率を w (%)，最初の含水率を W (%) とすれば

$$\frac{\delta h}{h_0} = A(1 - e^{-B(W-w)})$$

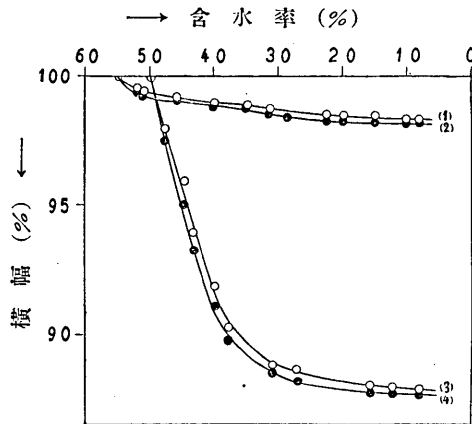
なる實驗公式が得られる。勿論 $\delta h/h_0$ は百分率で與へてある。A, B は常數であつて

$$\text{本郷の赤土} \begin{cases} A=2\% \\ B=0.0672 \end{cases} \quad \text{丸の内の沈泥質粘土} \begin{cases} A=15\% \\ B=0.0873 \end{cases}$$

である。此の關係から見ると土の種類により此等の常數が異り、從つて此等常數の差異から土の性質も判別出来るやうに思

はれる。なほ此等の圖から知られる如く最初與へし振動の影響が大である。

第 3 圖中 (5), (7) は最初 20 分間振動を與へた場合であり (3), (8) は振動によつて收縮する所迄收縮せしめ其の後水分を減少させた場合であつて、他の場合に比して何れも大なる收縮を示し丸の内の沈泥質粘土に於ては 1% 以上の差を示してゐる。此れに反し本郷の赤土に於ては餘り變化はない。又始めの土の高さの異ひによつてその變化に如何なる差異を生ずるかを示す一例として第 3 圖中 (1), (2) 及び (4), (6) に示したが高さの大なる方の收縮は稍々大なる値を示す様である。(5), (7) は (4), (5) に相當した高さの土に最初振動を與へ後水分を蒸發させて乾かした場合であつて、何れも振動が土の收縮を増加せしめる事が判る。



第 4 圖 含水率と横幅との關係

- (1), (2) は本郷の赤土
- (3), (4) は丸の内の沈泥質粘土
- (1), (3) は最初 20 分間振動を與へ後水分を減少させた場合である

Fig. 4. Diagram showing the relation between width and moisture content.

Ordinate: width (%).

Abscissa: moisture content (%).

- (1), (2) The loam of Hongō. (3), (4) The silty-clay of Maru-no-uti. (1), (3) Showing the effect of vibration for 20 min at initial state.

土の乾燥中本郷の赤土に於ては重量の減少は體積の減少に比して大であり、丸の内の沈泥質粘土に於ては重量の減少と體積の減少とは含水率 30% 迄の變化範圍では殆ど直線的關係を保持して變化する。従つて此の關係から兩者は各々その土の密度の含水率に對する變化を異にしてゐる事が判る。

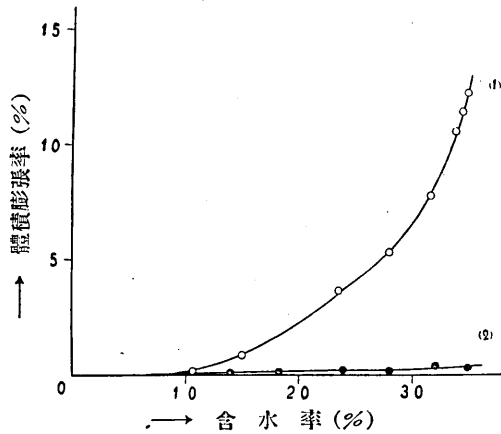
次に含水量の變化に對する土の體積膨脹率の變化を求めたのが第 5 圖である。此の

圖は試験土を含水量零の状態に迄乾燥させ次に此の土に徐々に水分を吸収せしめ、水銀を用ひ土の密度測定の際使用したと同一方法に因りその體積及び重量、含水率等を測定したものである。此の場合の土の乾燥前の寸法は何れも約 5 cm × 4 cm × 4 cm である。其の結果は丸の内の沈泥質粘土の膨脹率は含水率 10% を越えると増大するが、本郷の赤土は左程變化しない。但し丸の内の土に於ては含水率 34~35% 以上になると龜裂を生じ測定不能になつた。又本郷の土に於ても同様に含水率約 30% に於て破壊された。何れにしても

乾燥前の状態に戻らず、龜裂を生ぜしめない様にしながら始めの含水率 50% 以上に水分を吸収せしめる事は不可能であつた。

(2) 動力學的實驗及び結果

此の實驗は土の振動による収縮を取扱つたもので其の裝置の略圖は第 6 圖に示す如くである。此の實驗裝置の主要部分は已に前論文⁹⁾に示したものと全く同様なるものであるが今回の目的に添ふ様適當な工夫をなした。即ち今回は電磁石のコイル(E.M.)の回路に 50 サイクル/秒の一定の振動電流を通し、振動鐵盤(D)の厚さを 1 mm となし、振動振幅を變化せしめる爲に電磁石のコイルを通る電流を加減し電磁石の強さを適當にかへ或ひは鐵盤上の重量を加減した。



第 5 圖 含水率と體積膨脹率との關係

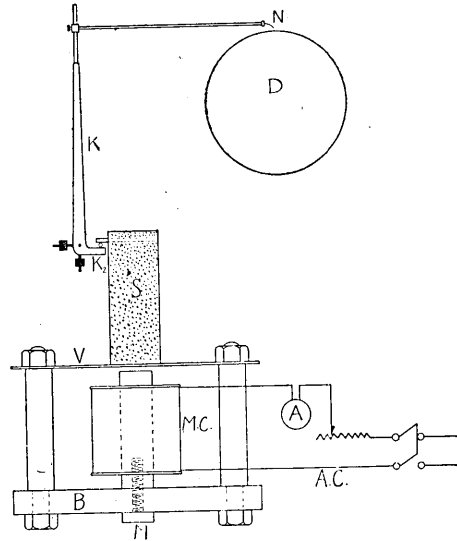
- (1) 丸の内の沈泥質粘土
(2) 本郷の赤土

Fig. 5. Diagram showing the relation between expansion of volume and moisture content.
(1) The silty-clay of Maru-no-uti, (2) The loam of Hongô.

Ordinate: expansion of volume.
Abscissa: moisture content.

9) 石本巳四雄, 飯田汲事 前掲。

斯様にして毎秒 100 振動をなす振動鐵盤 (V) を採用し、其の上土柱 (S) を乗せ土柱を振動せしめその收縮沈下状態を觀測した。今その收縮の時間的變化を擴大して連続的に記録するために圖の如き工夫をなした。即ち土の上部に細き棒をさし込み其の一端から凸起を出し、その凸起の尖端を一定廻轉軸を有する槓杆 K の劣腕 (K_2) と接觸せしめ、優腕 (K_1) にはその一部から腕を出し、描針 (N) が附してある。この描針の先端が時計仕掛回轉ドラム上に巻いた煤煙紙上に接觸してゐるので時の経過に従つて槓杆の偏りを記録する事となる。槓杆の偏り運動は土の沈下によつて行はれるものである。猶時計仕掛回轉ドラムは 1 時間 1 回轉 1 日 1 回轉等適當のものを隨時使用した。幾何倍率は約 7 倍から 10 倍迄變化せしめられるやうになつてゐる。



第 6 圖 土の振動實驗裝置

A 電流計 A.C 交流 B 鐵盤 D 時計仕掛回轉ドラム K_1 槓杆の優腕 K_2 槓杆の劣腕 M 電磁石 N 描針 M.C 電磁石コイル S 試驗土 V 振動鐵盤

Fig. 6. Experimental arrangement of vibration.

A: ammeter. A.C.: alternating current. B: steel plate. D: drum. K_1 : long arm. K_2 : short arm. M: electromagnet. N: needle. M.C.: A.C. coil. S: specimen. V: vibrating plate.

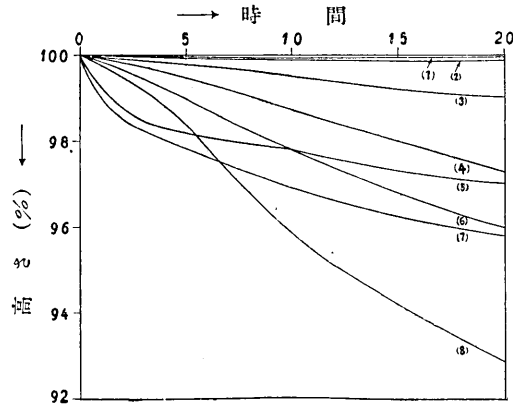
振動實驗中土の含水量及び温度の變化を成る可く防ぐために地面下 3 m の略々恒温恒濕の土中室を選び更に土の外側に

は土にふれない程度に濕布を巡らして置いた。室内の温度は實驗が一週間以上に亙る場合にも 15°C の恒温を保ち得、湿度は 100% であつた。なほ振動中土の踊りを防ぐため油粘土を用ひ土柱の底面を振動鐵盤に固着させた。實驗は次の順序で行つた。

(i) 振動のみの影響, (ii) 振動と含水減少との兩方の影響, (iii) 含水率の變化のみの影響, (iv) 振動及び含水率の變化のない場合等である。實驗前後に於て重量の測定を行ひその變化の有無を検したが、振動のみの影響を觀測する場合に於ても長時間に亙るも多くの場合 含水率の變化は 0.2% 以下であつた。又自然状態の土を一度ねり直し、これを元と同じ状態と思はれる程度迄壓縮して土柱を作り、此れを用ひて同じ實驗を繰り返した。

以上の結果を全部網羅して圖に示したのが第 7 圖である。圖から知られる如く本郷の赤土は殆ど變化なく、丸の内の沈泥質粘土は大なる變化をなす事が判明した次第で

ある、何れの場合も振動による影響は顯著で振動を與へた場合は成し得た實驗範圍内



第 7 圖 高さ時間との關係

本郷の赤土

(1) 振動を與へない場合 (含水率一定) (2) 振動を與へた場合 (含水率一定)

丸の内の沈泥質粘土

振動を與へない場合: (3) 含水率一定 (4) 含水率 3% 減少 (5) 含水率一定, ねり直しの土

振動を與へた場合: (6) 含水率一定 (7) 含水率一定, ねり直しの土 (8) 含水率 3% 減少

Fig. 7. Diagram showing the relation between height and time.

The loam of Hongō: (1) Case of no vibration (moisture content, constant).

(2) Case of vibration (moisture content, constant).

The silty-clay of Maru-no-uti: Case of no vibration [(3) moisture content, constant, (4) decrease in moisture content, 3%. (5) mois. cont., constant, soil in recomposed state.] Case of vibration [(6) mois. cont., constant, (7) mois. cont., constant, soil in recomposed state, (8) decrease in moisture content, 3%.]

に於ては自量により沈下する場合の 4 倍も大であり、同じ時間内で含水率を 3% 變化させた場合と比較して 1.5 倍も大である。又振動させながら水分を減少させた場合は、最も大なる収縮を生ずる事が判明した。結局此の場合は (4) (6) 兩曲線を加へ合せたやうな變化を示し 46 時間後に於て 10% の高さの収縮を生じてゐる (但し圖に示してない)。又ねり直した土に於ては最初の時に於ける収縮は相當大であるが、時間の経過するに従つて其の収縮曲線は自然土の場合の曲線に追従して行くやうな傾向が見られる。何れにしても土の緻密になり行く有様が窺はれる。

又振動振幅を變へた場合は第 8 圖に示す如くであつて、振幅の大なる程土の収縮が大となる。

以上何れの場合に於ても本郷の赤土は丸の内の沈泥質粘土に比して極めて収縮の小なる事が判明した次第である。又土を振動せしめる場合其の振動周期が土の共鳴振動周期であるか否かについても考慮を要する事であり、實際共鳴振動の場合は大なる収縮

縮を生ずるのである。第7圖(8)は殆ど共鳴状態の振動の場合を取扱つたのであり、如何によく収縮¹⁰⁾を生ずるかが知れるであらう。

今試験土の最初の高さと共鳴に於ける1秒間の振動数との関係を表示すれば、次の如くである。

高さ 種類	30 cm	25 cm	20 cm	15 cm	10 cm	縦波の速度
赤 土 (本 郷)	170	200	250	330	500	200 m/sec
沈泥質粘土 (丸 の 内)	58	70	88	116	175	70 m/sec

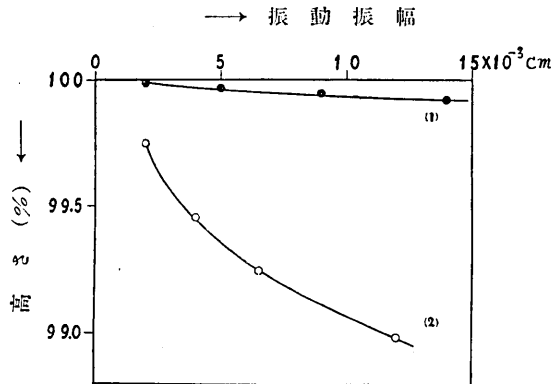
斯様な関係より知られる如く、本郷の赤土の共鳴振動数は実験の振動数 100 に比して可成り大である。然しながら静力学的実験の所に於て述べた如く共鳴振動で振動させた場合もあるが、その変化の有様は丸の内の沈泥質粘土の場合に比して左程大ではない。

3. 実験結果に対する考察

以上述べた実験結果より考察すれば、水分減少或ひは振動に因る土の収縮は、其の何れの場合に於ても丸の内の沈泥質粘土は本郷の赤土に比して大なる収縮を示し、本郷の赤土の場合には殆ど収縮を見ないとも云へよう。

今振動に因る収縮と乾燥による収縮との関係を模型的に圖示すれば第9圖の如くであつて、乾燥させた場合は高さと同程度の横の収縮を生ずるが、振動の場合には実験の範囲内に於て横の變化は殆どなく高さの減少のみを生ずる。これは土の粒子の移

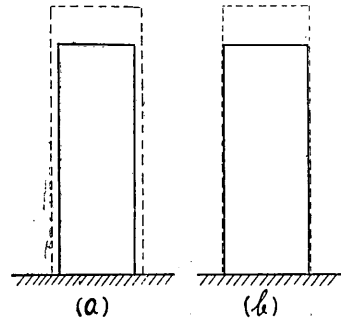
10) 振動により収縮を來す場合には土の状態も異りその結果勿論弾性も變ずる事が豫想される。但し前論文(石本巴四雄, 飯田汲事 前掲)に示した実験の如くその振動振幅は極めて小さく、実験時間も1分間程度であり収縮も約2000倍の擴大に於て5mm~10mm程度ならば、実験の前後に於て其の弾性が大體一樣であると思ふことも差支へなからうと思はれる。



第8圖 振動振幅と高さの減少の割合との関係
縦軸：高さ(%) 横軸：振動振幅
(1) 本郷の赤土 (2) 丸の内の沈泥質粘土
最初の高さ 20 cm, 5 時間後の高さの變化を示す。

Fig. 8. Relation between the height of soil and the amplitude of vibration after the elapse of 5 hours. Initial height 20 cm.
Ordinate: height (%).
Abscissa: amplitude of vibration.
(1) The loam of Hongô. (2) The silty-clay of Maru-no-uti.

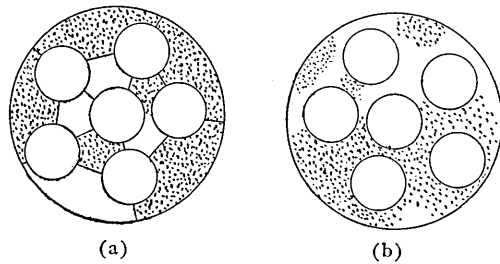
動や空隙の減少等の影響と考へられ結局緻密度に關した問題に歸せられる。今上述の2原因による土の収縮を高さの變化を標準にとり此れを比較する事にすれば、丸の内の沈泥質粘土では20時間後に於ては含水率6%の減少による収縮と 6×10^{-3} cmの振幅(毎秒100振動)の振動による収縮とは同程度である。又自重のみにて含水率の變化なき場合の収縮と比較すれば振動による場合はその4倍も大なる収縮を生ずる。本郷の赤土に於ては左程の變化が認められない。振動中は横の縮みは少いが振動停止後此れを乾燥せしめれば収縮を伴ひ、結局丸の内の土に於ては體積に於て約36%、高さに於て約15%、横に於て約13%の減少本郷の土は體積に於て約8%、その他横及び高さに於ては2%程度の減少を生ずるのである。



第9圖 土の収縮の有様を示す
 (a) 乾燥させた場合
 (b) 振動させた場合
 Fig. 9. Schematic diagram showing the shrinkage of soil.
 (a) Case of decrease in moisture content.
 (b) Case of vibration.

此等の事實より思考すれば兩者の土はその構造に相異が存すると考へられる。今其の構造を模型的に示したのが第10圖である。即ち土の粒子間の連絡が單なる粘性液體、コロイド物質及び空隙等で行はれ

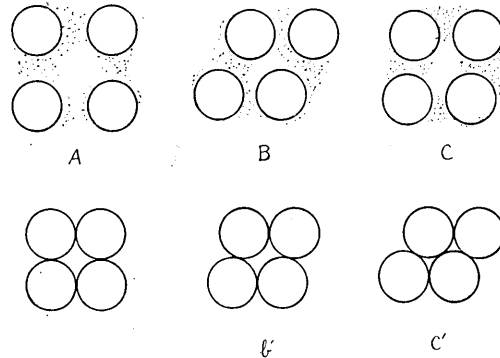
てゐるものと更にそれ以外の他の弾性體によつて連結されてゐるものとの2種類である。前者を粒子狀構造後者を海綿狀構造或は骨格構造と名づけるならば、丸の内の沈泥質粘土は前者に屬し本郷の赤土は後者に屬すると考へるのが至當である。斯様に考へる事によつて、土が水分を失ひ収縮する場合



第10圖 土の構造を示す模型圖
 (a) 本郷の赤土 (b) 丸の内の沈泥質粘土
 Fig. 10. Schematic diagram showing the structure of soil.
 (a) The loam of Hong
 (b) The silty-clay of Maru-no-uti.

に於ても振動に因つて収縮する場合に於ても、粒子狀構造をなしたものは最も緻密な状態に近づく爲によく収縮するが、海綿狀構造のものは各粒子間の連結物の爲めに多少の収縮を生ずるも、それ自體が已に一種の緻密度の最後の状態になつてゐると考へる事が出來従つて餘り収縮が行はれないのであらう。今粒子狀構造の場合に水分減少或ひは振動に因る収縮を模型的に考へるならば第11圖(簡單のために此處では土粒子の3種類の配列を考へてゐる)に示す如く、水分を含んでゐる最初の状態が例へば

Aであり最後に水分を失ひたる時の状態が a' であると假定すれば、此れは最も間隙の多い粒子の並び方であり、B→b', C→c' に移るにつれて間隙が小となる。含水を減少し或ひは振動を與へて收縮を生ぜしめる場合、間隙率の減少を生ずるならばそれはA→a' 或ひはB→b' C→c' になり得た丈でも説明されるが、含水減少に因る收縮と振動による收縮とは終局に於ては勿論振動中に於ても含水の減少を生ぜずしてその高さの減少或は間隙率を異にするならば、振動中に於て粒子の移動が A→B 或ひは B→C になりそれが最後に水分を失つて



第 11 圖 土粒子の配列の模型圖

Fig. 11. Schematic diagram of arrangement of soil particles.

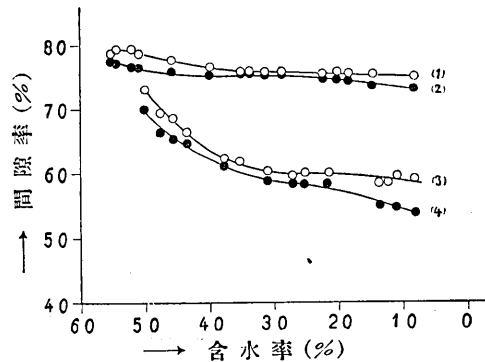
B→b' 或ひは C→c' に成り得たと假定すれば大體の説明がされるやうにも思はれる。

今間隙率と含水率との關係を最初の状態のまま乾燥せしめた場合と、振動を與へて後乾燥させた場合とに付本郷及び丸の内の試験土について求めれば第 12 圖の如くなる。此の圖に於ける間隙率 P は

$$P = 100 - \frac{G}{G_s} (1 - w)$$

なる關係から計算出来る。茲に G は含水率 w に對する比重であり、 G_s は眞の比重である。 G_s の測定は比重蠟を用ひたのであつてその結果は本郷の赤土では $G_s = 2.632$ 、丸の内の沈泥質粘土では $G_s = 2.660$ である。

第 12 圖に於て示す如く本郷の赤土に於ては最初の間隙率 78.6% のものが最後に 75.2% となりその減少率は 4.3% となる。又振動による影響を求めると最初の間隙率 77.4% のものが最後に 72.8% となり 5.95% の



第 12 圖 含水率と間隙率との關係

(1), (2) は本郷の赤土 (3), (4) は丸の内の沈泥質粘土 (2), (4) は振動の影響によりその變化の大なるを示す。

Fig. 12. Relation between porosity and moisture content.

(1), (2): the loam of Hongô. (3), (4): the silty-clay of Maru-no-uti. (2), (4): showing the effect of vibration. Ordinate: porosity (%). Abscissa: moisture content (%).

減少を生ずる事が判明した。又丸の内の沈泥質粘土について求めれば最初 73.0% の

ものが最後に 58.3% に減じて居りその減少率は 20.2% となる。又振動の影響による場合の最初の間隙率 69.9% のものが最後に 53.6% となり 23.4% の減少を生じた。かくの如くにして吾々は土の種類により又土の状態によつて著しくその性質を異にする事を知り得た次第である。本郷の赤土は丸の内の沈泥質粘土に比して間隙率の變化の少いのは前述の如き土の構造的差異を考へる事によつても説明される。

土の粒子を一樣な大きさと假定するがその並び方或ひは緻密度に關する Gratton 及び Fraser 兩氏の研究¹¹⁾の結果を綜合して見るに、此の結果を第 II 表に於て示したが、

第 II 表

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5	Case 6
Name	Cubic	Orthorhombic	Rohmbo-hedral	Orthorhombic	Tetragonal-sphenoidal	Rhomb-hedral
Tangent neighbours	6	8	12	8	10	12
Face angle	90°	90°, 60° ~120°	90°, 60° ~120°	90°, 60° ~120°	60°~120° 75°31' ~104°29'	60°~120°
Spacing of layers	$R_1/\sqrt{4}$	$R_1/\sqrt{3}$	$R_1/\sqrt{2}$	$R_1/\sqrt{4}$	$R_1/\sqrt{3}$	$2R_1/\sqrt{23}$
Volume of unit cell	$8.00R^3$	$6.93R^3$	$5.66R^3$	$6.93R^3$	$6.00R^3$	$5.66R^3$
Volume of unit void	$3.81R^3$	$2.74R^3$	$1.47R^3$	$2.74R^3$	$1.81R^3$	$1.47R^3$
Porosity	47.64%	39.54%	25.95%	39.54%	30.19%	25.95%

粒子の並び方によつて或る列の粒子の中心を通る平面から次の列の粒子の中心を通る平面迄の距離が $2R$ (R は粒子の半径) から最小 $\sqrt{2}R$ に逆變る。又間隙率も最大 47.64% から最小 25.95% に逆變化する。今粒子と粒子との接觸が Case 1 である場合に、此等が並び方をかへて Case 2 或ひは Case 3 に變化したとすればその高さの變化率は第 III 表に示す如くなる。

第 III 表から知られる如く、何等かの擾亂によつて粒子の配列が Case 1 から Case 2 或ひは Case 1 から Case 3 等に移動したとすれば其の影響のみに因る高さの減少變化率は夫々 13.5%, 29.5% 等となる。従つて此の結果よりすれば丸の内の沈泥質粘土の粒子が振動によつて Case 1 から Case 2 或ひは Case 2 から Case 3 となる様な配列状態の場合に相當した移動を行つたとも考へられる。

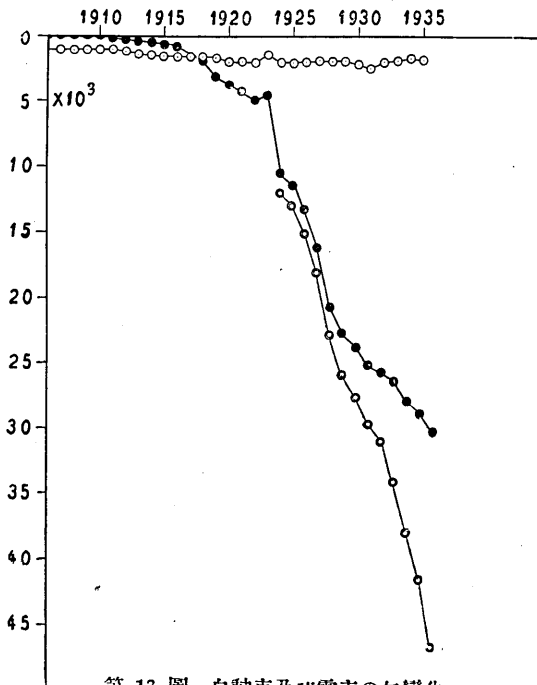
11) L. C. GRATON and H. J. FRASER, *Journ. Geol.*, 43 (1935), 785.

斯くの如く振動が土の収縮に及ぶ影響は相當大なるもので、埋め立て地の如きは最初の状態に於ては振動の影響は水分減少或ひは自重による影響以上に大である事が判明した次第である。従つて東京近傍其の他の地方の軟地盤の沈下も振動と密接な関係がある様に考へられるので、今假りに地面に振動を與へるもの例として自動車の数を取り此の数が地面に振動を與へる量に比例すると假定しその自動車数の年變化を圖示すれば第 13 圖の如くなる。¹²⁾ 同圖中に電車及び小型自動車の数をも同時に示したが電車の数は殆ど増減しないに反し、自動車の数は關東震災以後急激に増加してゐる。最近に於ては小型自動車の増加も亦著しい。今一例として茅場町所在の水準點の沈下圖¹³⁾ (第 14 圖) を取りその沈下狀況と上述の振動量とを比較すれば、大體類似な形を示してゐる。震災以後沈下速度を急激に増加してゐるが、一方自動車による振動も急激に大となり、此等が沈下の原因に相當な役割をなしてゐるやうにも思はれる。

第 III 表

Case の移動	高さの變化率	間隙率の變化
Case 1→Case 2	13.5%	17.7%
Case 1→Case 3	29.5%	45.5%
Case 1→Case 6	20.0%	
Case 6→Case 3	11.9%	
Case 2→Case 3	18.5%	25.3%
Case 2→Case 6	7.5%	
Case 1→Case 5		36.5%
Case 2→Case 5		23.6%
Case 5→Case 6		14.1%

勿論現在の沈下は種々なる原因



第 13 圖 自動車及び電車の年變化
縦軸：車臺數 横軸：年

● 自動車 (motor-car) ○ 電車 (electric-car) ◎ 自動車 (小型自動車, 自動車, 自動自轉車全部を含む)

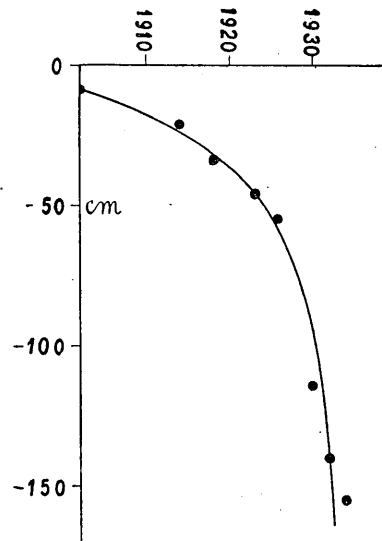
Fig. 13. Number of motor-cars and electric-cars.
Ordinate: number. Abscissa: year.

12) 此の資料は警視廳交通課統計掛の御好意により調査し得たもので茲に謝意を表する。

13) 同圖は宮部直巳博士の論文中より拜借したものである。宮部直巳 地震研究所彙報別冊 2 (1935), 215.

因により行はれてゐる事は勿論であるが、終局の所は上述の實驗の如く大體 15% 程度の収縮を生ずるのであるとすれば表面粘土層 30 m の所は約 5 m 程の沈下を生じて落付くものと思はれる。尤もこの量は絶対的のものではなく表面荷重其の他の影響により増減を生ずる事は勿論である。

表面土壌層の性質と沈下とは密接な關係を有し、或る地帯に沈下増大が認められるに拘はらず他の地方に於ては殆ど沈下を生じないと云ふが如き事實は、此等の地方を形成する表面土の性質の差異に基くものと思はれる。例へば本郷と丸の内とに於てその地盤沈下に差異の存するのは、本實驗結果の如き土の性質に差異の存する事から豫期され得る事であり、又丸の内の沈泥質粘土は本郷の赤土に比して弾性係数が小であり¹⁴⁾、丸の内の土の如きは自動車の如き振動によつて共鳴振動が起され易いやうに思はれる點も沈下に差異の存する一つの原因であらう。



第 14 圖 B. M. 3378 の沈下
縦軸：沈下量 横軸：年

Fig. 14. Subsidence of B.M. 3378.
Ordinate: amount of subsidence.
Abscissa: year.

4. 結 語

本實驗に於ては自然の堆積状態の土の収縮現象を振動及び水分減少との 2 方面から觀察した。振動による土の収縮は水分減少率 6% 程度と同程度であり、水分減少なき自量により収縮する場合の約 4 倍大であるが、此等の収縮現象は土の採取當時の含水率 50% 以上に於ける初めの状態に於てであり、振動周期は 0.01 秒、振幅 80 μ なる条件の下に於てである。又土の収縮は振動振幅（或ひは共鳴状態の周期）の増大と共に増加する。土の種類により土の状態によつて其の収縮に差異の存する事も判明した。即ち本郷の赤土は殆ど収縮變化なきも、丸の内の沈泥質粘土の収縮變化は顯著である。此等の事實から各地の土の性質の差異が地盤沈下と密接な關係にあると考へられる。

含水量の減少と共に土の密度も變化し、丸の内の沈泥質粘土は含水率 50% から 30% 迄の變化範圍に於て寧ろ稍増加の傾向を示すが、含水率のそれ以下の値に對して密

14) 石本巳四雄, 飯田波事 前掲.

度も小さくなる。此れに反し本郷の赤土は初めから含水量の減少と共に密度を減少する。又間隙率の變化は本郷の赤土は左程なきも、丸の内の沈泥質粘土は 20% 以上の變化を生じ含水量の減少と共に小さくなる。

以上の結果から土の構造を推察すれば本郷の赤土に對しては海綿構造、丸の内の沈泥質粘土に對しては粒子狀構造を考へるのが至當と思はれる。勿論此等土の粒子間は一般に粘性液體（水、コロイド物質をも含む）にて充されてゐると考へられる。

終りに臨み種々御懇篤なる御指導を賜つた石本先生並びに丸の内の實驗土を戴いた鐵道省土質調査委員會の渡邊貫博士に厚く御禮申し上げる。猶色々御注言を戴いた宮部博士に感謝の意を表する次第である。

32. *Some Experiments on the Shrinkage of Soil.*

By Kumizi IIDA,

Earthquake Research Institute.

This paper describes experiments made in connexion with shrinkage of soil in the natural state caused by vibration and decrease in moisture content of the soil. These experiments concerned with the problem of subsidence of the upper superficial layer of the earth's crust. Variation in soil density with moisture content was also investigated. Finally the structure of the soil was assumed from these experiments. In the present experiment, the same kinds of soil from Hongō and Maru-no-uti in Tōkyō were used as those in our preceding studies.

The results of the experiments are summarised as follows:

1) The density of the loam at Hongō diminishes with increase of moisture content, while that of the silty-clay at Maru-no-uti increases somewhat with moisture content ranging from about 50%~30%, and then diminishes with decrease in moisture content below 30%. In the case of the silty-clay at Maru-no-uti the variation in porosity of soil with moisture content is greater than in that of the loam at Hongō.

2) The extent of shrinkage differs with the kind and the condition of the soil. The contraction in volume of the silty clay at Maru-no-uti increases with decrease of moisture content, while that of the loam at Hongō is not so conspicuous. The shrinkage in height of the silty-clay at Maru-no-uti and of the loam at Hongō finally reach about 15% and 2% respectively.

3) The shrinkage of these kinds of soil caused by vibration is greater than that caused by decrease in moisture content. The rate of shrinkage of soil increases with increase in vibration amplitude. These relations are shown in Figs. 8 and 9.

4) From these experiments, it may be assumed that the structure of the loam at Hongō is somewhat spongy, the cavities of the elastic skeleton of which are filled with viscous liquid, while that of the silty-clay at Maru-no-uti is similar to that in which soil particles are suspended in a viscous liquid.