

締固めたシルト質土の水浸に伴うコラプス沈下挙動

亀井健史*・榎本雅夫**

締固めたシルト質土の吸水に伴うコラプス沈下挙動を支配する主要因を定量的に把握するため、標準圧密試験装置を応用したコラプス沈下試験を行った。供試体の内的条件としては種々の初期飽和度、初期乾燥密度を対象とし、外的条件としては種々の上載圧を各供試体に作用させた。その結果、締固めたシルト質土の吸水に伴うコラプス沈下特性に影響を及ぼす主要因を定量的な観点から検討している。

Key Words : compaction, compression, collapse, partially saturated soil, silt

1. はじめに

不飽和状態の地盤に水が浸透すると、その飽和度の上昇に伴い土に体積変化が生じる。このような吸水に伴う不飽和土の体積変化挙動において、地盤工學上大きな問題となって表れる現象にコラプスによる沈下現象がある。コラプスによる沈下現象は、主に乾燥地域の緩い堆積したシルト質地盤において生じており¹⁾、最も衝撃的な例としては、灌漑により5 mもの大きな沈下が生じたという報告例もある²⁾。

このような吸水に伴う不飽和土の体積変化挙動を有効応力の観点からみると、一般に、有効応力の原理に従えば、土は吸水に伴い土粒子間の負の間隙水圧が解放されて有効応力が減少し、その結果が膨張変形となって表れる。しかしながら、緩い構造を有している土の場合は、水浸に伴いサクシオンによる土粒子間力が解放され、その結果土粒子骨格構造が破壊され圧縮変形が生ずる。このようなことから Jennings and Burland³⁾ はコラプス沈下現象は、有効応力の原理に矛盾する現象として取り上げており、Bishopによる有効応力の原理適用に関する限界を指摘している。これに反して、Leonards⁴⁾ はコラプス沈下現象は水浸により有効応力が減少し、地盤のせん断強さが減少することによりせん断破壊が生じ、その結果圧縮沈下しているものであって、有効応力の原理に反している現象ではないと述べている。また、Burland⁵⁾ は水浸時の粒子間応力の変化に着目し、水浸に伴うコラプス沈下現象には微視的せん断破壊が生じていることを実験結果に基づいて指摘している。

このような水浸に伴うコラプス沈下現象は、土質、地

盤の状態(内的条件)および載荷状態(外的条件)等に大きく影響を受ける。コラプス沈下現象はシルト質地盤で多く見られるが¹⁾、Barden et al.⁶⁾ はコラプス沈下の生じやすい土として、粘土によりシルト粒子が結合され、その結果土が大きな間隙を有する緩い構造となっているシルト質土を挙げている。また、Basma and Tuncer⁷⁾ は、粒度の良い土ほどコラプス沈下しやすく、粘土含有率が多くなるほどコラプス沈下が生じやすくなると報告している。さらに、彼らは粘土含有率がある値を越えると膨潤が卓越してくることも指摘している。

Barden et al.^{6), 8)} は、最適含水比よりも乾燥側で締固めた土は、コラプス沈下が生じやすく、その主要因としてその土が間隙の大きい綿毛構造を有していることを挙げており、土の初期構造がコラプス沈下に大きな影響を与えることを指摘している。また、土がコラプス沈下を生じるために必要な条件として、土が大きな間隙を有しており、不安定な不飽和土の構造であること、土の構造が一時安定を保持できるような十分な大きさの全応力を持つことおよび不飽和状態の土が安定するために必要な十分に高いサクシオン、粒子間の結合力またはセメンテーション効果を土が有していることなどを挙げている。上記の条件に加えて Mitchell⁹⁾ は、土に水を加えることにより、水浸前に土が有していたサクシオンの減少やセメンテーション効果の消滅によって、土粒子構造間のせん断破壊が生じる可能性を土が有するとき、最もコラプス沈下が生じやすくなることを指摘している。

一方、Holtz¹⁰⁾ および Cox¹¹⁾ は土の内的条件(飽和度、乾燥密度)や外的条件(上載圧)がコラプス沈下に与える影響を検討し、コラプス沈下量は一般に締固め時の乾燥密度の増加および載荷圧の減少に伴い減少し、最終的には土の挙動が、膨潤現象に転じることを明らかにしている。また、締固め時の飽和度の上昇に伴い、水浸による土の体積変化量(コラプス沈下量、膨潤量)が減少す

*正会員 工博 基礎地盤コンサルタンツ(株)地盤物性研究室室長(〒145 大田区石川町2-14-1)

**正会員 工修 基礎地盤コンサルタンツ(株)地盤調査研究室

ることを指摘している。これらの結果より、不飽和土を水浸させたときに、体積変化が生じない初期乾燥密度、締固め含水比、上載圧の組合わせが存在している。

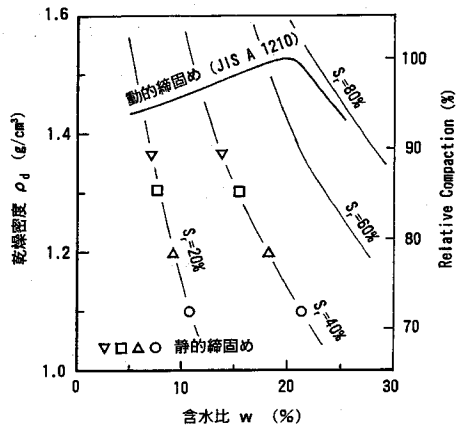
Barden et al.⁶⁾は水浸前の上載圧の大きさに関係なく、水浸時にコラプス沈下が生じない限界締固め含水比（いわゆる限界飽和度）が存在し、土によっては限界含水比が標準プロクターの最適含水比よりも高い場合もあると報告している。また、Lawton et al.¹²⁾は、任意の上載圧に対して、不飽和状態の土が水浸を受けても体積変化を生じない限界のRelative Compaction (R.C.)が存在することを明らかにし、その限界のR.C.は上載圧の増加に伴い大きくなることを指摘している。

水浸に伴うコラプス沈下は、盛土の施工などに際しては十分考慮する必要があるものと考えられるが、実務においては、水浸による沈下の検討はほとんど行われていないのが現状である。現行の設計法における締固めの施工基準では、現場における締固め度は多くの場合最大乾燥密度 $\rho_{d \max}$ で規定されており、ある機関では $\rho_{d \max}$ の90% (Relative Compaction (R.C.)=90%) の締固め度で施工するように提案されている^{13),14)}。しかしながら、その基準の工学的背景は明らかではなく¹⁵⁾、実際の盛土においても、上載圧や締固め時の飽和度等により土が水浸により膨潤を生じたり、オーバーコンパクションの結果不経済な設計となる場合も少なくない。畠ら¹⁶⁾は、このような締固め施工基準の問題点を考慮し、水浸後の締固め土の体積変化および強度低下を予測して、それより締固め施工管理基準を決定する方法を提案している。また、先述したように任意の上載圧および締固め飽和度に対して、水浸に伴う体積変化が生じない限界のR.C.が存在することが指摘されており¹²⁾、施工的な観点からもコラプス沈下現象の解明と締固め条件に関する定量的な検討は工学的に有意であると考えられる。

本研究では上記の点に着目し、コラプス沈下が生じやすい材料といわれているシルト質土¹⁾に対して、不飽和状態の土の吸水に伴うコラプス沈下挙動を定量的に把握するため、標準圧密試験装置を応用したコラプス沈下試験を行った。供試体の内的条件としては種々の初期飽和度、初期乾燥密度を対象とし、外的条件としては種々の上載圧を各供試体に作用させることにした。その結果、初期飽和度、初期乾燥密度および上載圧が不飽和シルト質土の吸水に伴うコラプス沈下特性に与える影響を定量的な観点から検討している。

2. 試料および試験方法

試料としては、主にシルト成分からなる市販のDLクレーを用いた。DLクレーの物理特性は、土粒子密度 $\rho_s=2.650 \text{ g/cm}^3$ 、粒度組成（砂分0%、シルト分90%、粘土分10%）であり、アッターベルグ限界試験は



図一 試料の締固め特性と本研究で用いた供試体の内的条件

Non-plasticであった。供試体作製に際しては、静的締固めによる方法は動的締固めによる方法と比較して粒子破砕が生じにくく、より均一な供試体を作製しやすいことが挙げられ、Venkatarama Reddy and Jagadish¹⁷⁾が静的締固めが動的締固めよりも工学的な観点から優れていることを指摘していることから、本研究における供試体作製方法は静的締固めを採用した。より均一な供試体が得られることを考慮し、供試体は圧密リング内の試料を定みずみ ($\dot{\epsilon}=1 \text{ cm/min}$) 条件下で静的に締固めることにより作製した。供試体の内的条件としては、コラプス沈下が生じやすい条件を考慮して、最適含水比よりも乾燥側で、 ρ_{di} が $\rho_{d \max}$ の90%以下となる、初期飽和度 $S_{i=20, 40\%}$ 、初期乾燥密度 $\rho_{di}=1.10, 1.20, 1.30, 1.36 \text{ g/cm}^3$ を対象としている。図一は締固め試験 (JIS A 1210 1.3-b) で得られた締固め曲線と今回静的に締固めて作製した供試体の内的条件 (乾燥密度 ρ_{di} 、含水比 w) を示している。図より、今回対象とした供試体の ρ_{di} は、締固め試験 (JIS A 1210 A.1-b) より得られた最大乾燥密度 $\rho_{d \max}$ の72~89%の範囲である。なお、今回用いたDLクレーでは、圧密リング内で締固めた供試体は、作製後変形を生ずることなく安定した状態であったため、すぐに次の上載圧負荷をおこなった。

本実験は、標準圧密試験装置を応用したコラプス沈下試験であり、はじめに圧密リング内の供試体に不飽和状態のまま上載圧を負荷して圧縮変形量を測定し、その圧縮変形が終了した時点で供試体下面からの空気の入出を抑制するためセラミックディスクを介して水を吸水させ、この時の供試体のコラプス沈下量および吸水量（飽和度）の経時変化を測定している。このプロセスを各上載圧条件下で実施した。

一方、コラプス沈下試験には、不飽和供試体と水浸飽和したそれぞれの供試体に対して圧密試験を行い、その圧密曲線の差から水浸に伴うコラプス沈下量を予測する

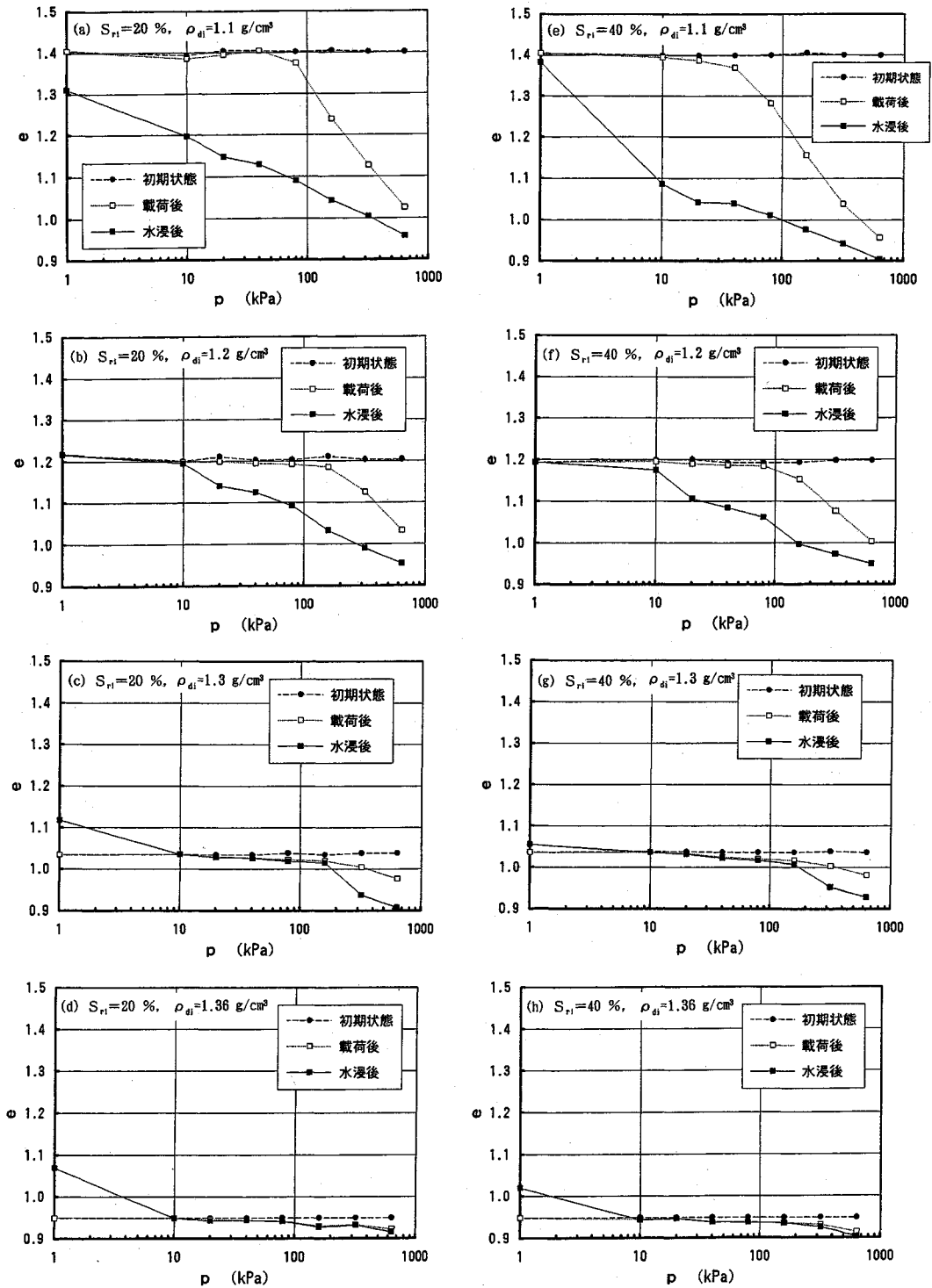


図-2 初期状態，載荷後および水浸後の間隙比 e と上載圧 p の関係

Double Oedometer Test もある。この方法は簡便であり、その結果もコラプス沈下量に関しては今回実施した方法とほぼ一致するといわれているが^{7),12)}、この手法ではコラプス沈下挙動の経時変化を測定することができない。このため本実験では、コラプス沈下の経時変化の把握や低い上載圧での膨潤量の正確な測定も可能とするため任意の上載圧下でそれぞれ水浸し、コラプス沈下試験を行った。

3. 実験結果および考察

図-2 (a)~(h) は初期飽和度 S_{ri} 、初期乾燥密度 ρ_{di} の異なる供試体から得られた初期状態、載荷後および水浸後の間隙比 e と上載圧 p の関係を示している。ここでは、8本の供試体に対して8段階の上載圧を載荷させることによって試験を行った。また、同様の試験を異なる S_{ri} 、 ρ_{di} を有する供試体に対しても実施した。なお、ここでは供試体の初期状態の精度を明確にするため、供試体の初期状態での間隙比 e を図中に示した。まず、不飽和状態での上載圧による圧縮特性をみると、 S_{ri} 、 ρ_{di} によらず供試体の圧縮変形は任意の圧力に至るまではほとんど発生せず、ある圧力を越えると圧縮変形が生じ始める。また、その圧縮変形量は上載圧の増加に伴い大きくなっている。このことは、ある上載圧まではサクションにより土の構造が保持されているため、圧縮変形が生じにくくなっているものと考えられる。さらに、載荷に伴う圧縮変形量は、 ρ_{di} が小さいほど大きくなっている傾向があり、これに及ぼす S_{ri} の影響に着目すると、同じ ρ_{di} の供試体では、 $S_{ri}=20\%$ に比べ、 $S_{ri}=40\%$ の場合にわずかではあるが圧縮変形量が大きく表れている。

一方、水浸に伴う圧縮変形量（コラプス沈下量）に着目すると、全体的には ρ_{di} が小さな供試体の沈下量が大きいことがわかる。なお、 $\rho_{di}=1.30, 1.36 \text{ g/cm}^3$ の供試体では、 $p=1 \text{ kPa}$ において膨潤挙動が認められ、 $\rho_{di}=1.36 \text{ g/cm}^3$ を有する供試体では、コラプス沈下挙動がほとんど認められないことから、 $\rho_{di}=1.36 \text{ g/cm}^3$ 以上の供試体においては、膨潤挙動が卓越してくるものと考えられる。上記のことより、以下ではコラプス沈下が生じている $\rho_{di}=1.10, 1.20, 1.30 \text{ g/cm}^3$ の供試体を対象に検討を行う。

水浸に伴うコラプス沈下量と上載圧 p の関係を図-3 (a), (b) に示す。図より、 $\rho_{di}=1.10, 1.20 \text{ g/cm}^3$ の場合には、任意の圧力に達するまでは水浸に伴う土のコラプス沈下量は p の増加に伴って大きくなり、ピーク値を示した後減少している。また、それぞれの供試体のコラプス沈下量がピーク値を示す点に着目すると、コラプス沈下の最大量は ρ_{di} の減少に伴い増加しており、コラプス沈下量の最大値が大きくなるのに伴い、その時の上載圧 p はユニークな直線に沿って減少する。このこと

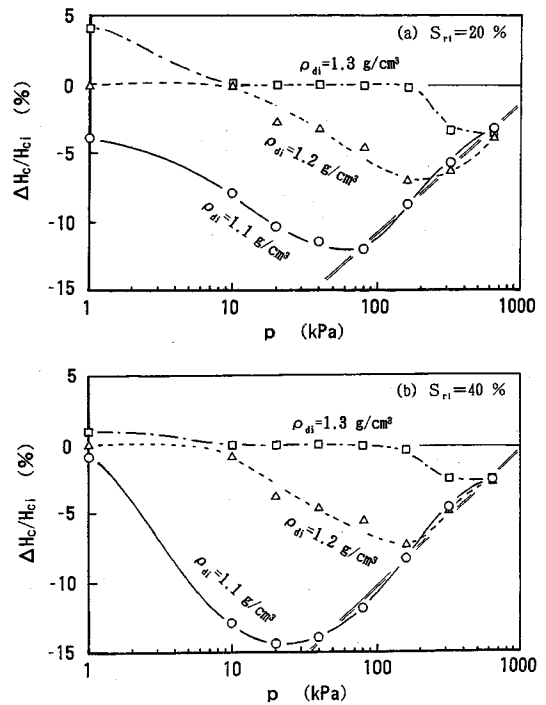


図-3 コラプス沈下量比 ($\Delta H_c/H_{ci}$) と上載圧 p の関係

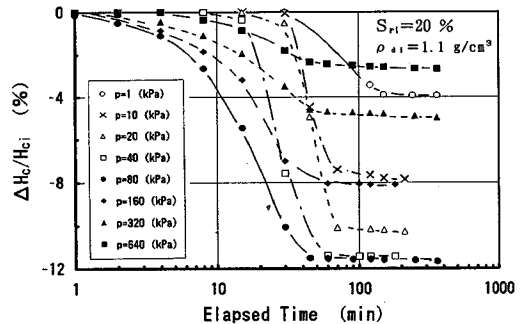


図-4 コラプス沈下量比 ($\Delta H_c/H_{ci}$) の経時変化

は Lawton et al.¹²⁾ が示した結果と一致し、また S_{ri} 、 ρ_{di} 、 p の三条件でコラプス沈下量が最大となる条件が存在することがわかる。 $\rho_{di}=1.30 \text{ g/cm}^3$ の供試体は、 $p=1 \text{ kPa}$ では膨潤を生じ、その後上載圧を増大しても水浸による供試体の体積変化はほとんど認められず、 $p=300 \text{ kPa}$ に到達すると供試体にコラプス沈下が発生する。

この結果から、水浸に伴う体積変化挙動は初期乾燥密度 ρ_{di} の影響を大きく受けることが容易に想定できる。このことは、Basma and Tuncer⁷⁾ が ρ_{di} の増加に伴ってコラプス沈下量が減少し、コラプス沈下に最も影響を及ぼすパラメータとして ρ_{di} を指摘していることと一致している。また、 $\rho_{di}=1.10 \text{ g/cm}^3$ の供試体では、 $S_{ri}=40\%$ の場合が $S_{ri}=20\%$ と比較して大きな沈下量が認められるが、 $\rho_{di}=1.20, 1.30 \text{ g/cm}^3$ では S_{ri} による有為な差は認められなかった。

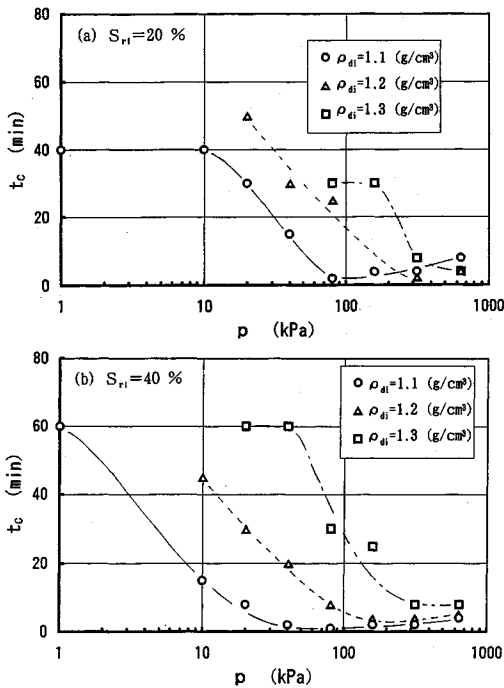


図-5 コラプス発生時刻 t_c と上載圧 p の関係

以上より今回の試験の範囲では、 S_{ri} より ρ_{di} がコラプス沈下量に大きく影響を及ぼすことがわかる。また、 S_{ri} 、 ρ_{di} によらずコラプス沈下量はピーク値を示した後、 p の増加に伴ってユニークな線に沿って減少し、 $p=640$ kPa では ρ_{di} によらずほぼ同程度の沈下量を示している。このことより、今回の実験範囲では、供試体の初期状態 (S_{ri} 、 ρ_{di}) によらず、上載圧 p に対する限界のコラプス沈下量が存在することが認められた。

図-4 は、水浸に伴う供試体のコラプス沈下量の経時変化の一例を示している。図より、上載圧 p が 40 kPa 以下においては、 p の増加に伴ってコラプス沈下の開始時間は早くなるが、 p が 80 kPa 以上に至るとコラプス沈下は 1~8 分程度の早い時間に発生し始めている。また、 $p=20, 40$ kPa の条件下では、低い上載圧であるにもかかわらず、コラプス沈下は最大値に近い大きな沈下量を短時間の間に示している。このことは、コラプス沈下が、水浸に伴う粒子間の結合力の消失によりせん断強さが減少し、その結果急激な圧縮変形が生じているものと考えられ、ある意味でコラプス沈下現象がせん断変形であるという指摘^{4),5)}を裏付けているものと考えられる。

次に、コラプスが發生する時間に着目し、図-5 (a), (b) に ρ_{di} の異なる供試体のコラプス発生時間 t_c と上載圧 p の関係を示す。ここで t_c は、水浸を開始後コラプス沈下が発生するまでに要する時間を表している。図より、 ρ_{di} 、 S_{ri} によらず t_c は p の増加に伴い減少傾向を示し、 $p=300$ kPa 程度に至るとほぼ同程度の値に収束

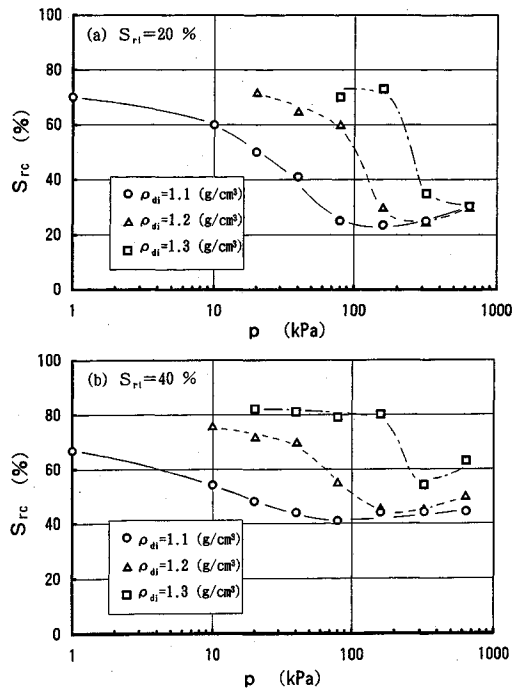


図-6 コラプス発生飽和度 S_{rc} と上載圧 p の関係

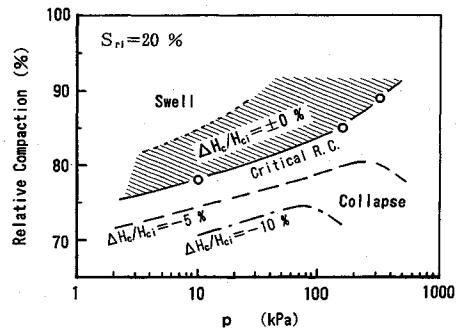


図-7 コラプス沈下に対する Critical Relative Compaction と上載圧 p の関係

している。また、供試体の ρ_{di} の増加に伴って同一上載圧における t_c は大きくなるが、 ρ_{di} が t_c に及ぼす影響は p の増加に伴い小さくなり、 $p=300$ kPa 以上に達すると t_c は ρ_{di} によらずほぼ同程度の値を示す。このことは、 p が小さな範囲においては t_c は初期の構造に依存し、 ρ_{di} が小さいいわゆる不安定な構造の土では安定した構造を有する土と比較して、コラプス沈下の発生が早く、 p が大きくなると上載圧による圧縮により初期構造の影響が小さくなり、その結果 t_c が ρ_{di} によらずほぼ同程度の値を示すものと考えられる。

図-6 (a), (b) は、 ρ_{di} の異なる供試体におけるコラプス発生飽和度 S_{rc} と上載圧 p の関係を示している。図より、全体的な傾向としては、 S_{rc} は p の増加に伴って減少し、同一上載圧条件下では ρ_{di} の小さな供試体ほど小さな S_{rc} を示す。また、 S_{rc} は 20~85% を示してお

り、その値は S_{ri} , ρ_{di} , p に依存していることがわかる。このような特性を水浸による体積変化挙動における膨潤特性と比較すると、膨潤現象は S_{ri} , ρ_{di} によらず吸水に伴って供試体の S_r が上昇し、約 82~85% に到達するとユニークに膨潤変形が発生し始めており¹⁸⁾、今回明らかとなったコラプス沈下の変形メカニズムとは異なっていることが推察できる。

水浸を受けても土がコラプス沈下を生じない限界の Relative Compaction (Critical R. C.) に着目し、図7にコラプス沈下に対する Critical R. C. と上載圧 p の関係を示す。コラプス沈下が生じない土の Critical R. C. は、上載圧の増加に伴い大きくなり、この傾向は、Lawton et al.¹²⁾ が示した結果と一致している。また、土が Critical R. C. よりも高い R. C. を有する場合には、体積変化が生じない R. C. の範囲が存在し、それを越えると土は膨潤を生じる。一方、Critical R. C. よりも低い R. C. を有する土はコラプス沈下を生じ、その体積変化量は、土の R. C. が小さくなるほど増大する傾向を示している。

道路公団は、現場における締固め土の R. C. を 90% 以上に規定しているが¹⁴⁾、今回の結果より、この基準はコラプス沈下に対してかなり安全側の評価を行っており、本研究により現行の設計手法における一つの工学的裏付けが得られたものと考えられる。

4. ま と め

締固めたシルト質土の水浸に伴うコラプス沈下挙動に及ぼす主要因をある程度定量的に明らかにした。本研究より得られた主要な結論を以下に列記する。

1) 水浸によるコラプス沈下量は、初期乾燥密度 ρ_{di} の影響を大きく受け、 ρ_{di} の増加に伴いコラプス沈下量は減少する。また、体積変化が生じないような ρ_{di} が存在し、土の ρ_{di} がその値を越えると土の挙動は膨潤に転じる。

2) 供試体の ρ_{di} によらず、水浸に伴うコラプス沈下量は上載圧の増加に伴い大きくなり、ピークを示した後ユニークな線に沿って減少する傾向がある。このことは、 ρ_{di} によらず上載圧に対するコラプス沈下量の限界値が存在することを示している。

3) 任意の ρ_{di} を有する供試体におけるコラプス沈下量の最大値は、 ρ_{di} の増加に伴い減少する。また、コラプス沈下量が最大値を示す上載圧は、 ρ_{di} の増加とともに増大する傾向がある。

4) 上載圧が小さく不安定な構造を有する土は、初期状態 (S_{ri} , ρ_{di}) がコラプス沈下量やコラプス発生時間等に大きな影響を与えるが、上載圧が大きくなり载荷による圧縮により土が安定した構造になると、コラプス沈下に与える初期構造の影響は小さくなる。

5) 水浸時のコラプス沈下発生飽和度は膨潤発生時の飽和度の傾向と異なっており、ある意味で水浸に伴うコラプス沈下と膨潤における変形メカニズムが異なっていることが推測できる。

参 考 文 献

- 1) Dudley, J.H. : Review of Collapsing Soils, Proc. ASCE, Vol.96, No. SM3, pp.925~947, 1970.
- 2) Lofgren, B.E. : Land Subsidence due to the Application of Water, Publication by USGS, 1969.
- 3) Jennings, J.E.B. and Burland, J.B. : Limitations to the Use of Effective Stresses in Partly Saturated Soils, Geotechnique, Vol.12, pp.125~144, 1962.
- 4) Leonards, G.A. : Discussion on the Paper by Jennings and Burland (1962), Geotechnique, Vol.12, p.354, 1962.
- 5) Burland, J.B. : Some Aspects of the Mechanical Behaviour of Partly Saturated Soils, Moisture Equilibria and Moisture Changes in Soils Beneath Covered Areas, Australia, Butterworth, pp.270~278, 1965.
- 6) Barden, L., McGown, A. and Collins, K. : The Collapse Mechanism in Partly Saturated Soil, Engrg. Geol., 7, pp.49~60, 1973.
- 7) Basma, A.A. and Tuncer, E.R. : Evaluation and Control of Collapsible Soils, Proc. ASCE, Vol.118, No. GT 10, pp.1491~1504, 1992.
- 8) Barden, L., Madedor, A.O. and Side, G.F. : Volume Change Characteristics of Unsaturated Clay, Proc. ASCE, Vol.95, No. SM 1, pp.33~51, 1969.
- 9) Mitchell, J.K. : Fabric, Structure, and Property Relationships, Fundamentals of Soils Behavior, John Wiley & Sons, New York, N.Y., pp.222~252, 1976.
- 10) Holtz, W.G. : The Determination of Limits for the Control of Placement Moisture in High Rolled Earth Dams, Proc., ASTM, Philadelphia, Pa., pp.1240~1248, 1948.
- 11) Cox, D.W. : Volume Change of Compacted Clay Fill, Proc. of Conference on Clay Fills, Institution of Civil Engineers, London, Nov., pp.79~87, 1978.
- 12) Lawton, E.C., Fragaszy, R.J. and Hardcastle, J.H. : Collapse of Compacted Clayey Sand, Proc. ASCE, Vol.115, No. GT9, pp.1252~1267, 1989.
- 13) 日本道路協会 : 道路土工—施工指針, pp.180~211, 1986.
- 14) 日本道路公団 : 設計要領 第一集 第一編土工, pp.35~60, 1983.
- 15) 久野悟郎 : 設計・施工の留意点をさぐる, 7. 土の締固め, 土と基礎, Vol. 33, No. 7, pp.57~64, 1985.
- 16) 島昭治郎・建山和由・藤本直昭 : 水浸時挙動を考慮した土の締固め施工基準の決定方法について, 土木学会論文集, 第 382 号/Ⅲ-7, pp.227~235, 1987.
- 17) Venkatarama Reddy, B.V. and Jagadish, K.S. : The Static Compaction of Soils, Geotechnique, Vol.43, No.2, pp.337~341.
- 18) 亀井健史・榎本雅夫 : 水浸に伴う不飽和シルトの体積変化挙動, 第 5 回地盤工学シンポジウム論文集, 土質工学会中部支部, pp.63~70, 1993.

(1993.9.17 受付)

WETTING-INDUCED COLLAPSE BEHAVIOUR OF COMPACTED SILTY SOIL

Takeshi KAMEI and Masao ENOMOTO

The present paper describes the experimental results conducted to investigate some aspects of the wetting-induced collapse behaviour of compacted silty soil. Compacted soils wetted under load can both swell and collapse depending on their conditions (initial dry density, initial degree of saturation) and the magnitude of the effective overburden stress. For any given set of conditions, the amount of collapse increases with decreasing the initial degree of saturation, decreasing the initial dry density, and increasing effective overburden pressure. The practical significance of the results of the investigation are discussed briefly. The applicability of these results and conclusions to other soils will require further research.
