

改良土の引張り強度に関する実験的検討

近藤益央・宮武裕昭

1. はじめに

盛土等の軟弱地盤対策においてコスト縮減を目的として、深層混合処理工法と浅層混合処理工法を組み合わせる場合がある。浅層改良体の厚さを薄くしたり、低改良率の深層改良杭と組み合わせたりすると、図-1に示すように浅層改良体底面に曲げ応力が発生する。改良土はコンクリートのように曲げ試験をできないため、改良土の曲げ強度を直接的に評価する方法がない。コンクリートに関する既往の文献¹⁾では、コンクリートの曲げ強度は圧縮強度の1/5~1/8程度で、引張強度は圧縮強度の1/10~1/13程度であるとされていることから、引張り強度を近似値として用いることが考えられる。しかし、地盤工学会により「岩石の一軸引張り試験方法 (JGS2552-2015)」が基準化されているが、固化材改良土に対する引張り試験の試験方法は確立されていない。固化材改良土の一軸引張り試験を適切に行うためには、供試体と試験機との接着方法と共に、局所的な弱部が試験結果に影響することがないように均質な供試体の作製が重要となる。そこで、3種の地盤材料に固化材を混合した固化材改良土を作製し、一軸圧縮試験と一軸引張り試験を実施し、一般的に改良土の強度評価に用いられている圧縮強度から引張り強度(曲げ強度)を推定することを目的に検討を行った。セメント改良土の一軸引張り強度に関する報告は過去にもあるが、試験条件がそれぞれ異なる。現場施工の現状を考えると、あらかじめセメントペーストをプラントで作製して攪拌混合する場合、セメント粉体を攪拌混合する場合、生石灰を攪拌混合する場合に大別できる。過去の研究事例では、セメントペーストを添加材とする、もしくはセメント粉体を攪拌混合する場合に加水した条件に近いと考えられる。これらの事例では、一軸引張り強度 q_t は一軸圧縮強度 q_u の1/10~1/5程度^{2)~4)}であることが報告されている。

本報告では、固化材改良した土に対する供試体の締固め方法、均質な供試体を作製するための混合試料の調整方法、生石灰改良における供試体作製時の消化時間(生石灰は土中の水分と反応して発熱する反応を消化反応という。消化時間は消化反応が終了するまでの時間をいう。)について検討した結果を報告すると共に、種々の固化材を用いた改良土の一軸圧縮強度と一軸引張り強度の関係について報告する。

2. 試料、配合条件、供試体作製方法

2.1 試料および配合条件

試料は、粉末カオリンASP400(以下「カオリン」という。)、北海道北広島産の粘性土(以下「北広島粘土」という。)、茨城県美浦村産の砂質粘性土(以下「砂質粘性土」という。)の3種類を用いた。使用した試料の粒度分布を図-2に、物理特性を表-1に示す。北広島粘土は、塑性指数 $IP=54.6$ を示す高塑性な材料である。カオリンは粘土分を84%含有するものの、 $IP=17.4$ と低く低塑性な材料である。砂質粘性土は、粗粒分=26.3%、シルト分=23.6%、粘性分=50.1%で構成され、地盤材料の分類では砂質火山灰質粘性土II型に分類される。

固化材配合条件を表-2とし、一軸圧縮強度 q_u が

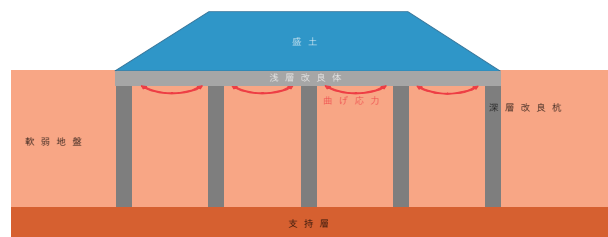


図-1 深層改良杭と浅層改良体の組み合わせ

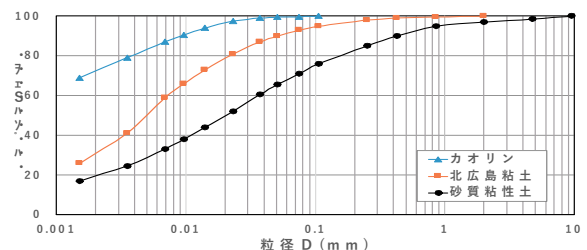


図-2 粒度分布図

表-1 試料の物理特性

	カオリン	北広島粘土	砂質粘性土
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.647	2.620	2.731
含水比 w_n (%)	75.0	110.0	56.9
液性限界 w_L (%)	51.6	82.7	92.7
塑性限界 w_P (%)	34.2	28.1	57.6
塑性指数 I_p (%)	17.4	54.6	35.1

表-2 固化材配合条件

	固化材	添加量、添加率	水セメント比 w/c (%)	材齢(日)
カオリン	セメントペースト	89, 133, 177(kg/m ³)	100.0	5
北広島粘土	セメントペースト	100, 200, 500(kg/m ³)	100.0	5
砂質粘性土	セメントペースト	10, 15, 20, 30(%)	100.0	7
	セメント粉体	10, 15, 20, 30(%)	-	7
	生石灰	2, 3, 5, 7, 10, 15(%)	-	3

200~1,000kN/m²の範囲内になるように設定した。添加量は水セメント比100.0%で試料の単位体積あたりに対してセメントペーストの添加量を、添加率は固化材の乾燥重量に対する試料の乾燥重量の率とした。セメントペーストの場合、添加割合については一般的には添加量が使用されるが、セメント粉体や生石灰の場合には添加率を用いられることが多いので添加率を使用した。砂質粘性土の固化材は、各種の施工条件を考慮してセメントペースト、セメント粉体、生石灰の3種類とし、カオリンおよび北広島粘土については混合攪拌を考慮してセメントペーストのみとした。固化材は、早強ポルトランドセメントと生石灰(0~5mm)としたが、早強ポルトランドセメントは0.125mmふるいを通過させたものを、生石灰は2mmふるいを通過させたものを用いた。試験に供する際の砂質粘性土の含水比は、異なる締固め度 D_c の供試体作製が可能な含水比として最適含水比相当の45%とした。

2.2 供試体の作製

2.2.1 カオリンおよび北広島粘土

地盤工学会基準(JGS 0821-2009)に準じて、試料と固化材をソイルミキサーにて10分間混合した。1回の攪拌混合で10供試体(直径50mm、高さ100mm)を作製した。供試体作製にあたってはモールドに3層に分けて攪拌混合した試料を投入し、各層毎に突棒で25回突固めるタッピング法を用いた。この際、10体の供試体を作製するのに約20分の時間を要した。そのため、この方法では充填中に固化が進行し、層境界が発生した。この供試体で一軸引張り試験を実施した結果、充填時の層境界で引張り破壊が生じた。その一例として、カオリン固化材改良土の試験前供試体の

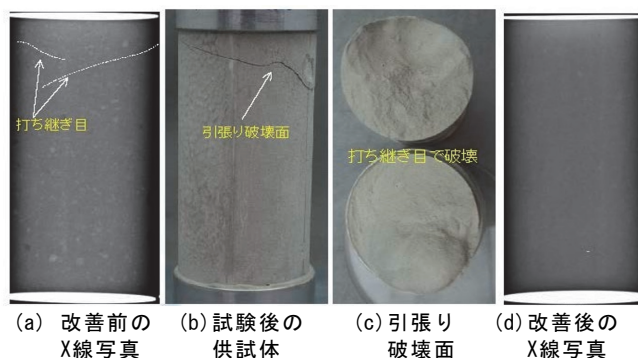


図-3 改善前・後の X 線写真と供試体写真 (カオリン固化材改良土)

X 線写真と試験後の供試体写真を図-3(a)(b)(c)に示す。層境界の発生を防ぐため、混練時間を5分間に短縮すると共に、1バッチあたり2供試体に変更し、充填時間も5分に短縮した。また、固化材改良土の充填は3層とし、下記の方法で層境界の影響を解消した。

- ①1層目充填後にタッピング
- ②2層目充填後にφ3mmの金棒を1層目の底部まで30回棒突きした後にタッピング
- ③3層目充填後にも1層目の底部まで棒突き

この改善した方法で作製した供試体のX 線写真を図-3(d)に示すが、層境界は確認されず、均質な供試体を作製できた。一軸引張り試験に用いた供試体の形状は上下部がφ50mm、中心部がφ35mmとなるドッグボーン型とし、材令3日目に成形を行い、材令5日目に一軸圧縮・引張り試験を行った。

2.2.2 砂質粘性土

砂質粘性土についてもドッグボーン型供試体の作製を試みたが、締固め度の低い供試体ではドックボーン型の成形ができなかった。そのため、砂質粘性土ではφ50mmの等径供試体を、突固め(3層)と静的締固めで作製して一軸引張試験を行った。一例として、セメント粉体(添加率30%、 $D_c=95\%$)を添加して、突固め(3層)と静的締固めで作製した試験前供試体のX線写真と試験後供試体写真をそれぞれ図-4(a)(b)、図-5(a)(b)に示す。突固め(3層)で作製した供試体のX線写真では層境界が明瞭で、この層境界付近で破壊している。一方、静的締固めで作製した供試体は層境界が見られず均質に仕上がっており、供試体中央付近で破壊している。突固め(3層)による一軸引張り強さは、静的締固めよりも小さな値であった。そこで、供試体を高さ毎の締固め度 D_c のば

らつきを検討するため、突固め（3層）と静的締固めで作製した供試体の締固め度分布の一例（セメントペースト添加率10%、目標 D_c 85~95%）を図-6に示す。図中に示した締固め度 D_c はそれぞれの高さでカットして計測した実測値である。突固め（3層）は、締固め度の凹凸が顕著で不均質な分布を示すが、静的締固めでは、いずれも供試体の中央部付近が凹となる規則的な分布形状を示

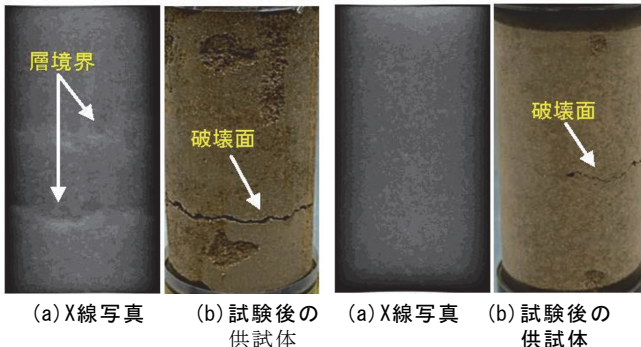


図-4 突固め(3層)による供試体

図-5 静的締固めによる供試体

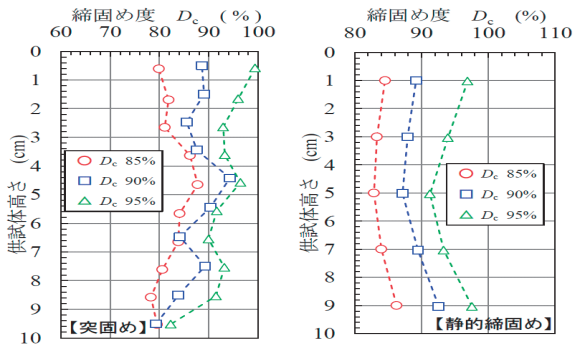


図-6 供試体内の締固め度分布

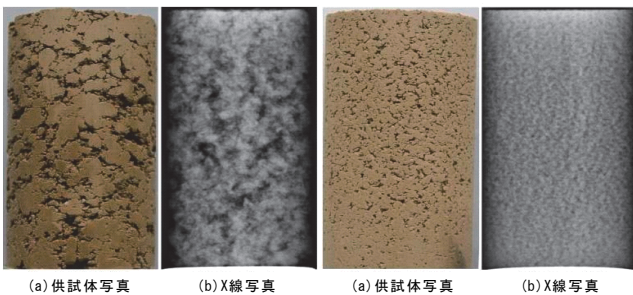


図-7 粒度調整なし

図-8 2mmふるいで調整

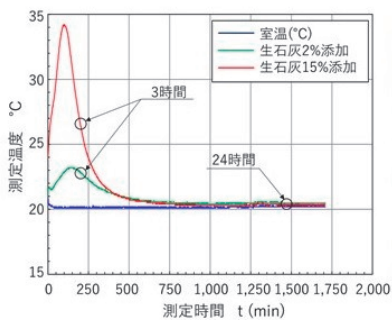


図-9 消化温度の経時変化

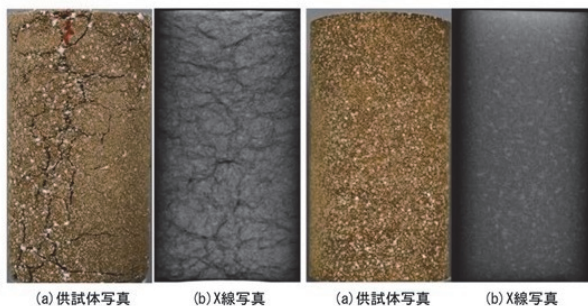


図-10 3時間で作製

図-11 24時間で作製

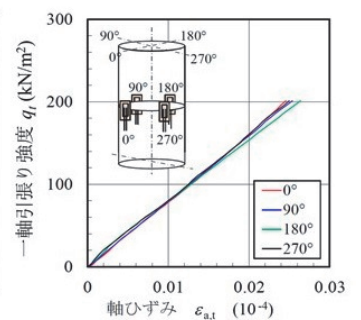


図-12 引張り強度と軸ひずみ

している。

また、供試体が最も不均質になりやすい条件（水分量が多く締固め度が低い）で作製したセメントペースト供試体（添加率30%、 D_c 85%）写真と、X線写真を図-7(a)(b)に示す。混合後の試料を手で解きほぐしながら締固め容器に投入して静的締固めを行ったが、仕上がりは非常に不均質であった。これを解消するため、混合後の試料に対して2mmふるいを通させて供試体を作製した結果を図-8(a)(b)に示すが、供試体の均質性が格段に向上した。一方、セメント粉体や生石灰混合の供試体は、1.2mmふるいでの調整で均質化を図った。なお、ふるい通過の過程で含水比が低下するが、供試体は低下した含水比を考慮して規定の締固め度に仕上がるように作製した。

次に生石灰を2%と15%添加させたケースで消化温度の経時変化を測定した結果を図-9に示す。消化温度は、混合直後から急激に上昇し、100分程度で下降に転じ、800分程度で平衡状態に到達した。消化開始後、3時間と24時間にて供試体を作製し、材令3日後に性状観察を行った。生石灰添加率15%の供試体写真とX線写真をそれぞれ図-10(a)(b)、図-11(a)(b)に示す。3時間では力学試験が困難なほどひび割れが顕著に発生したが、24時間ではひび割れは発生しなかった。この傾向は生石灰添加率2%でも同様であった。

3. 試験方法

一軸引張り試験は、低強度な材料をターゲットに開発された「50kN高精度一軸引張り試験装置」を用いた。装置は、精密ボールねじを用いたステッピングモーターにより载荷を行う機構を搭載し、制御信号によってボールねじ軸を所定の载荷速度で回転させ、高強度アルミニウム製のアッパークロスヘッドを上下させる点が特徴である。

載荷速度は0.001～5mm/minの範囲で設定可能であるため、従来型の硬岩用油圧式圧縮試験装置や軟岩用の圧縮載荷装置に比べると、供試体設置時における供試体の破壊リスクが回避できると共に、載荷時の“あそび”が解消し直線性が大きく改善されることで、高品質な試験結果を得ることができる。供試体と鋼製キャップの接着には、エポキシ樹脂系のスキヤンディプレックスを用いた。接着完了後、上部キャップに取り付けたロードセルおよび下部キャップをユニバーサルジョイントにより載荷装置に接続した。軸方向変位は、長さ70mmのLDT (Local Deformation Transducer) を供試体の側面に2ヶ所設置して計測した。一軸引張り試験時の軸ひずみ速度は0.1%/minとした。ただし、一軸圧縮試験の軸ひずみ速度は1%/minとした。一軸引張り試験では、試験装置の中心軸のズレ等に伴う編芯荷重が供試体に作用すると、正しい試験結果が得られない。そこで、別途準備したカオリン改良土の供試体中央部4ヶ所にひずみゲージ(ゲージ長60mm)を貼付し、一軸引張り試験中のひずみ分布を確認した。試験結果を図-12に示す。各部の応力とひずみの関係をみると、いずれも有意な差がなく、本試験装置における編芯の影響は極めて小さいと考えられる。

4. 試験結果

4.1 カオリンおよび北広島粘土

一軸引張り試験は5供試体以上を実施するものとし、ドッグボーン部で破断した供試体で強度が大きい3供試体のデータを採用した。5供試体を実施しても3供試体の有効な試験結果を得られなかった場合には5供試体を追加して作製して試験を行った。供試体作製時に弱部ができると一軸引張り強度が小さくなることから、全平均ではなく強度の大きい3供試体のデータを採用することとした。セメント添加量と一軸引張り強度の関係を図-13および14に示す。カオリンでの添加量が133kg/m³の試験結果では一軸引張り強度のばらつきが大きいものの、カオリンも北広島粘土もセメント添加率と一軸引張り強度の間には比例的な関係が確認できる。一軸引張り試験で使用する供試体と同様の方法で配合・作製した供試体で、直径をφ35mmに成形した供試体を用いて一軸圧縮強度試験も併せて実施した。一軸圧縮強度 q_u と一

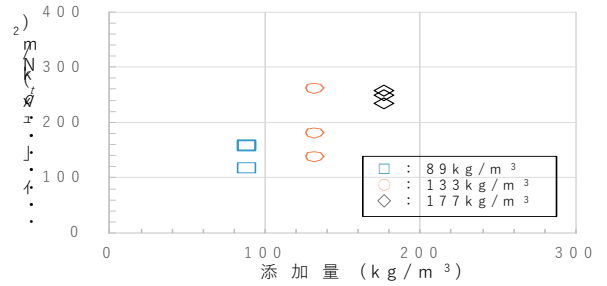


図-13 一軸圧縮強度と添加量の関係(カオリン)

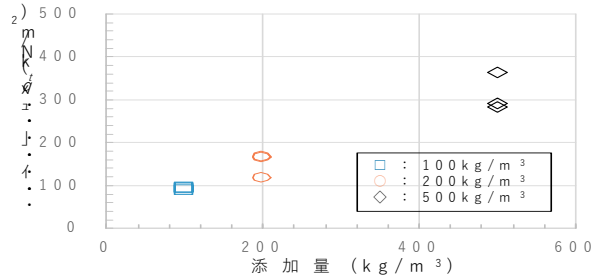


図-14 一軸圧縮強度と添加量の関係(北広島粘土)

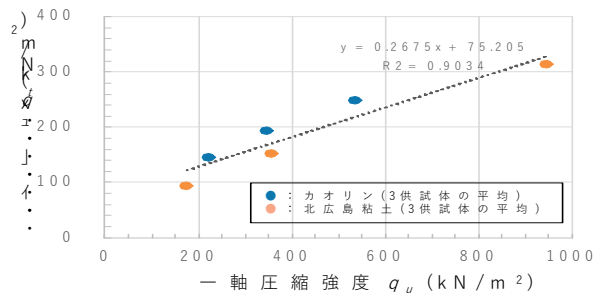


図-15 一軸圧縮強度と一軸引張り強度の関係(カオリン、北広島粘土)

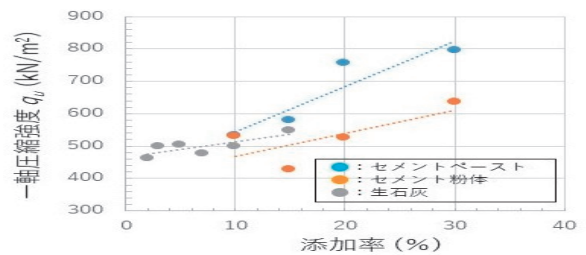


図-16 一軸圧縮強度と添加率の関係($D_c=95\%$)

軸引張り強度 q_t の関係を図-15に示す。一軸圧縮強度と一軸引張り強度 q_t の間には、比較的良好な比例関係があり、一軸引張り強度 q_t は一軸圧縮強度 q_u の1/2～1/3程度であることがわかる。ただし、ここで示している一軸引張り強度 q_t は室内で供試体内に弱部を発生させないように注意して作製した供試体を用いて得られたデータであり、現場施工で発生すると考えられる混ぜむらなどを考慮していないこと注意する必要がある。

4.2 砂質粘性土

(1)一軸圧縮強度

砂質粘性土では固化材の影響、密度(締固め度)

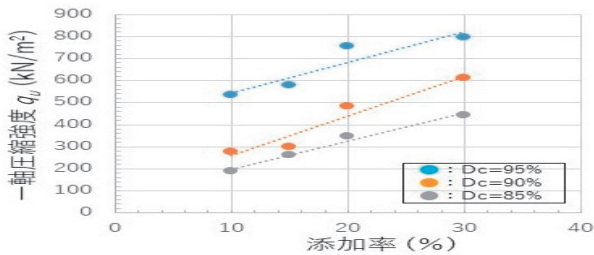


図-17 一軸圧縮強度と添加率の関係(セメントペースト)

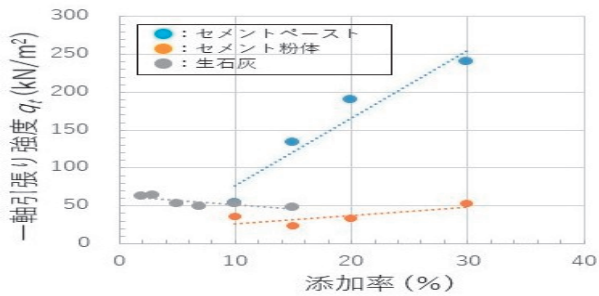


図-18 一軸引張り強度と添加率の関係(D_c=95%)

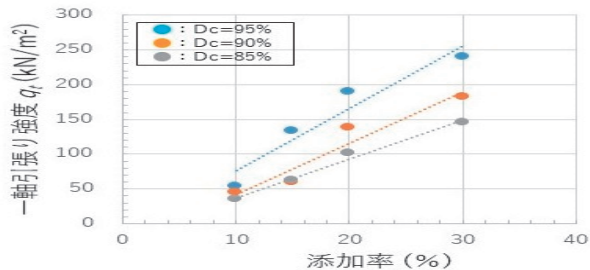


図-19 一軸引張り強度と添加率の関係(セメントペースト)

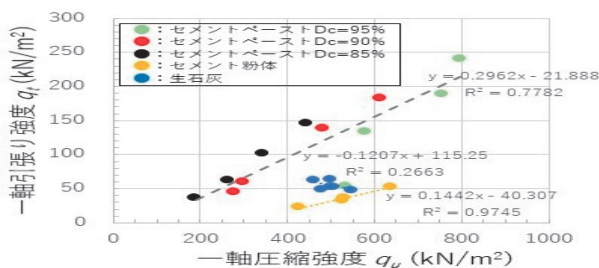


図-20 一軸圧縮強度と一軸引張り強度の関係(砂質粘性土)

の影響に着目して試験を実施した。セメントペースト、セメント粉体、生石灰に毎の固化材添加率と一軸圧縮強度 q_u の関係を図-16に示す。セメント粉体で添加率10%の一軸圧縮強度 q_u が高めの結果となっているが、これを除けばセメントペーストもセメント粉体も、セメント添加率の増加に伴って同じような勾配で一軸圧縮強度 q_u が増加することがわかる。生石灰においても、添加率の増加に伴って一軸圧縮強度 q_u が増加するが、添加率の増加に伴う一軸圧縮強度 q_u が増加割合はセメントペースト、セメント粉体に比べて小さかった。固化材をセメントペーストとし、密度(締固め度 D_c)および固化材添加率が一軸圧縮強度 q_u におよ

ぼす影響を図-17に示す。密度(締固め度 D_c)の増加と共に一軸圧縮強度 q_u も増加する傾向を示し、添加率の増加に伴う一軸圧縮強度 q_u が増加割合は密度(締固め度 D_c)に関係なく、ほぼ同じような増加傾向を示した。次に、セメントペースト、セメント粉体、生石灰に対する固化材添加率と一軸引張り強度 q_t との関係を図-18に示す。セメントペーストは、セメント添加率の増加と共に一軸引張り強度 q_t が増加する傾向を示す。セメント粉体も同様な傾向を示すが、セメントペーストに比べると固化材添加率の増加に伴う強度増加は小さく、生石灰は添加率の増加に伴って一軸引張り強度 q_t がやや低下する傾向を示した。密度(締固め度 D_c)に違いよる固化材添加率と一軸引張り強度 q_t の関係を図-19に示す。図-17に示すように密度(締固め度 D_c)が増加すると共に一軸引張り強度 q_t も増加する傾向を示し、図-19に示すように一軸圧縮強度 q_u においても添加率の増加に伴いどの密度(締固め度 D_c)においても一軸圧縮強度 q_u が増加する傾向を示した。

(2)一軸引張り強度

一軸圧縮強度 q_u と一軸引張り強度 q_t の関係を図-20に示す。セメントペーストにおいては、3種類の密度(締固め度 D_c)で試験を実施したが、セメントペーストとして1つのグループとして考察できることがわかる。これによれば、一軸圧縮強度 q_u が200~800kN/m²の範囲内ではセメント添加率や密度(締固め度 D_c)に関係なく、一軸引張り強度 q_t は一軸圧縮強度 q_u の1/4程度であった。しかし、セメント添加率が10%と少ないケースでは一軸引張り強度 q_t が大きくならないため一軸圧縮強度 q_u に対して1/6~1/10程度と低い結果となった。次に、セメント粉体の一軸圧縮強度 q_u と一軸引張り強度 q_t の関係についてみると一軸引張り強度 q_t は一軸圧縮強度 q_u の1/10程度とセメントペーストより低い結果となった。しかし、セメント粉体の相関係数はセメントペーストより高い相関がみられた。セメントペーストでは3つの密度(締固め度 D_c)のデータで検討しているため、セメント粉体と同一密度(締固め度 D_c)で比較すると、セメントペーストの $D_c=95\%$ では相関係数は90%であったがセメント粉体の $D_c=95\%$ では相関係数は97%であった。しかし、同一のセメント添加率であってもセメントペーストとセメント粉体では、一軸引

張り強度 q_t で5倍程度、一軸圧縮強度 q_u で1.5倍程度の差がでた。これは、練り混ぜ時の含水比を45%としたことによるものと考えられる。砂質粘性土の練り混ぜ時含水比を45%としたのは、含水比の影響が出ないようにすべての添加材で同一の含水比とするため、42.5%、45%、51%、57%の4つの含水比で供試体を作製し、供試体をX線撮影して均質性を確認した。その結果、セメントペーストでは含水比45%以下で均質性が確保され、セメント粉体では45%以上で均質性が確保できることがわかったので、練り混ぜ時の含水比を45%とした。セメント粉体を固化材として用いた場合、母材の含水比が高いほど供試体の作製が容易であるとともに、均質性が確保された。今回の検討で、4つの含水比で供試体の作製、X線撮影は行ったが、一軸圧縮試験や一軸引張り試験は含水比45%のケースでしか実施しなかった。今回の試験でセメント粉体の一軸引張り強度 q_t や一軸圧縮強度 q_u がセメントペーストに比べて強度発生が低かったのは、セメント粉体の水和反応に必要な水分が不足していたことが考えられる。生石灰でもセメント粉体と同様な傾向を示し、一軸引張り強度 q_t は一軸圧縮強度 q_u の1/10程度と低い。これも、試験に供した砂質粘性土の水和に必要な水分が不足していることに起因するものと考えられる。今回得られた一軸引張り強度 q_t と一軸圧縮強度 q_u との関係は、今回実施した配合率や一軸圧縮強度 q_u の試験範囲内での結果であることから、試験を実施した範囲外の一軸引張り強度 q_t と一軸圧縮強度 q_u との関係については今後検討する必要がある。

5. まとめ

本研究では下記の知見が得られた。

- 3つの異なる母材に対してセメントペーストを添加材として用い、浅層改良体の一般的な設計強度である一軸圧縮強度 q_u が200~800kN/m²の範囲内とした場合、粘性土の一軸引張り強度 q_t は一軸圧縮強度 q_u の1/2~1/3程度、砂質粘性土の一軸引張り強度 q_t は一軸圧縮強度 q_u の1/4程度であることがわかった。
- これは、供試体作製時にばらつきを小さくするための様々な工夫を施した結果、過去の事例に比べて大き目の一軸引張り強度 q_t となったためと考えられる。

- 砂質粘性土で添加材をセメントペースト、セメント粉体、生石灰とした場合、一軸引張り強度 q_t は一軸圧縮強度 q_u の1/10~1/15程度と小さくなった。これは、締固めで高い密度が期待できる最適含水比では、セメント粉体および生石灰の水和反応に必要な水分が不足していることが考えられる。
- 供試体の作製方法により供試体内の均質性にばらつきが生じ、試験結果に影響を及ぼすことがわかった。

今後は、異なる母材を用いた場合の一軸引張り強度 q_t と一軸圧縮強度 q_u の関係や、現場施工でのばらつきを考慮した一軸引張り強度 q_t と一軸圧縮強度 q_u の関係について検討したいと考えている。また、密度（締固め度）の影響もあることがわかったので、今後は密度等のパラメータを盛り込んだ一軸引張り強度 q_t と一軸圧縮強度 q_u の関係についても検討したいと考えている。今回得られたデータを用いて浅層改良体の曲げ破壊を検証する遠心力載荷模型実験を実施したが、一軸圧縮強度を用いて曲げ強度を評価できることが確認出来た。

参考文献

- (公社)日本コンクリート工学会：コンクリートの基礎知識、<http://www.jci-net.or.jp/j/public/kiso/StrengthProperty.html>
- 古関潤一、佐藤剛司：セメント改良土の引張強度特性、東京大学生産技術研究所、生産研究53巻、第11・12号、2001年11月
- 伊藤正巳、菅野航太、大河内保彦：セメント改良土における引張強度の推定に関する一考察、(公社)土木学会、土木学会第71回年次学術講演会、2016年9月
- 安藤嘉哉、並河努：セメント改良土の一軸引張試験、(公社)地盤工学会、第50回地盤工学会研究発表会、2015年9月
- 安藤嘉哉、並河努：セメント改良土の一軸引張り試験における供試体接着方法の影響、(公社)地盤工学会関東支部、第13回地盤工学会関東支部発表会、2016年10月

近藤益央



土木研究所地質・地盤研究グループ施工技術チーム 総括主任研究員
Masuo KONDOH

宮武裕昭



土木研究所地質・地盤研究グループ施工技術チーム 上席研究員
Hiroaki MIYATAKE