

浸透固化処理土の強度評価に関する研究

林 規夫* 林 健太郎*
 松下 弘志** 古賀 大三郎*
 大久保 泰宏*

要 旨

兵庫県南部地震以来、耐震に関する基準が改められ、旧基準により設計された既設構造物直下の耐震性を高める必要性が唱えられている。これらのニーズに対し、当社技術研究所では浸透性の高い恒久的な薬液である、超微粒子シリカを既設構造物直下へ浸透注入し、構造物の耐震性を高める浸透固化処理工法の開発を行ってきた。これまでの現場実証実験より、施工性および改良効果に優れていることが確認された¹⁾。しかしながら、本工法を用いて広く実設計を行うためには、浸透注入された浸透固化処理土の特性を把握し、設計法を確立することが急務である。これまでの検討で浸透固化処理土の基本特性についてはほぼ明らかにすることができたが、各種の地盤に対する注入時の浸透特性や液状化強度については不明な点も多いのが現状である。したがって、今回、超微粒子シリカの浸透特性および浸透固化処理土の強度特性を各種実験により明らかにした。本報文では実験結果および浸透固化処理土の配合設計手法についてまとめている。

1. まえがき

1993年度より、技術研究所では既設構造物直下の液状化対策として浸透固化処理工法の開発に着手してきた。図-1に示すように、浸透固化処理工法は鉛直、水平あるいは斜めに注入管を建て込み、浸透性の高い恒久的な薬液、超微粒子シリカを注入することにより、既設構造物直下の液状化対策を可能にしている。1996年度には新潟市内において、本工法の実証実験を行い、写真-1に示すように直径4mの改良体が形成されたことを確認している¹⁾。また、1998年度には東京国際空港内にて、運輸省第二港湾建設局発注の試験工事を実施し、本工法の施工性と改良効果を確認した。本工法を用いて既設構造物に影響を与えずに地盤改良を行うためには事前に詳細な調査を行い、そのデータを用いて設計を行う必要がある。本文では、試験工事や各種室内試験の結果により薬



写真-1 改良体形状（新潟実証実験）

液の浸透特性や強度特性を明らかにし、さらに薬液改良土の設計法について検討している。

2. 浸透固化処理土の強度特性

2.1 配合試験

浸透固化処理土の強度に影響を与える要因として、薬液の濃度や注入時の充填率、対象地盤の細粒分含有率が挙げられる。これらの影響を考慮し、浸透注入設計を行うためには、対象地盤より試料を採取し、事前に配合試験を実施する必要がある。本章では、試料砂の細粒分含有率 F_c や薬液のシリカ濃度を变化させて配合試験を行い、これらの要因と一軸圧縮強さ q_u の関係について検討している。

試料砂には東京湾の埋立地盤より採取した砂を使用し

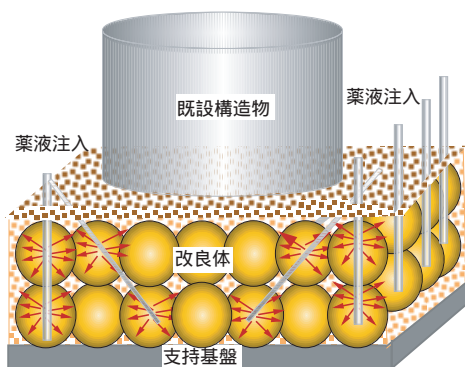


図-1 浸透固化処理工法施工イメージ図

* 技術研究所 ** 南九州支店

表-1 試料の物理特性

表-2 配合試験ケース

実験ケース	シリカ濃度(%)	細粒分含有率Fc(%)
C 1-1	3	0
C 1-2		10
C 1-3		25
C 1-4		40
C 2-1	5	0
C 2-2		10
C 2-3		25
C 2-4		40
C 3-1	6	0
C 3-2		10
C 3-3		25
C 3-4		40
C 4-1	8	0
C 4-2		10
C 4-3		25
C 4-4		40

た。試料の物理特性を表-1に示す。なお、試料のFcを調整するため、天日乾燥させ、ふるい分けにより所定のFcに調整した。また、薬液は超微粒子シリカ活性タイプを用いた。薬液のシリカ濃度および試料のFcによる一軸圧縮強さへの影響を調べるために、表-2に示す16種類の供試体について一軸圧縮試験を行った。供試体は緩い地盤を想定して相対密度60%として実施した。

供試体作製は、直径5cm、高さ10cmの一軸圧縮試験用モールド内にあらかじめ薬液を入れ、その後、空気を混入しないように振動を与えながら試料を投入した。このため、試料砂の間隙はすべて所定の濃度の薬液で充填されている。均一な供試体を作製するために、試料は3層に分けて投入し、1、2層目はそれぞれガラス棒で5回突き固めを行い、3層目は1.5kgの重りを用いて均等に載荷し、振動による締固めを行った。作製した供試体は常温にて7日間養生した後、一軸圧縮試験を実施した。また、供試体内のシリカ含有量は、供試体より5gの試料を採取して、飯尾らの方法²⁾により測定した。シリカ含有量を求める際には、未改良の試料が有する含有量の測定を行い、これらの値を差し引いたものをシリカ含有量とした。

2.2 実験結果

図-2に薬液のシリカ濃度と一軸圧縮強さquの関係を示す。すべてのケースでシリカ濃度が高くなるに従い、quも大きくなっている。また、Fc=25%までのケースでは試料中のFcが大きくなるとquが大きくなる傾向にあるが、Fc=40%のケースでは、ほ

ぼ、Fc=10%と同程度の強度まで低下している。これは試料の細粒分含有率が40%では、今回の供試体作製方法では試料の粘性が高いために、突き固めが十分ではなかったと考えられる。

次に、シリカ濃度と供試体のシリカ含有量の関係を図-3に示す。薬液中のシリカ濃度が高くなるに従い、供試体中のシリカ含有量も増加しており、両者の間には線形関係が成り立っている。供試体のシリカ含有量とquの関係を図-4に示す。この結果より、すべてのケースでシリカ含有量とquには線形関係が認められ、quはシリカ含有量の増加に比例することがわかった。以上のこ

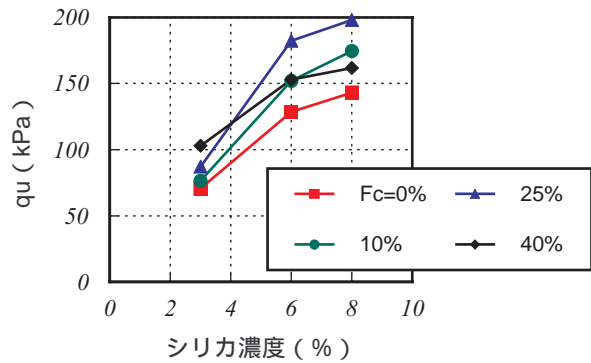


図-2 quとシリカ濃度の関係

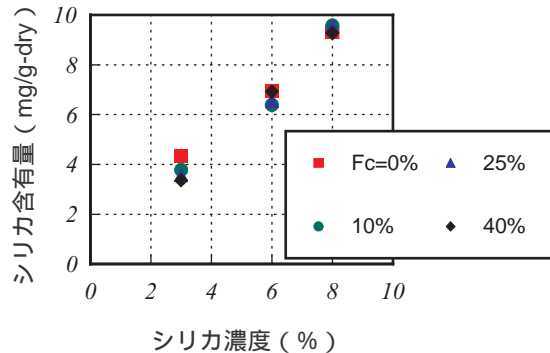


図-3 シリカ含有量と濃度の関係

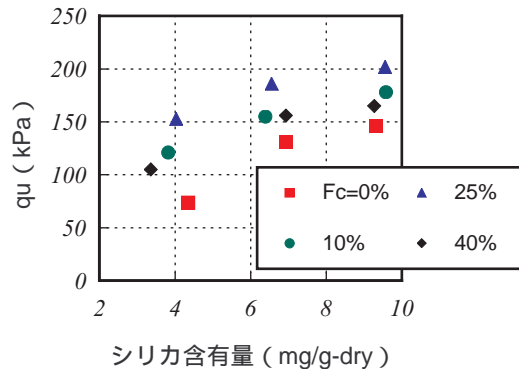


図-4 quとシリカ含有量の関係

表-3 注入実験ケース

細粒分含有率Fc(%)	0		10			25			40	
モデル地盤長さh(cm)	170.0	250.0	100.0	170.0	250.0	100.0	170.0	250.0	100.0	170.0
浸透到達距離 L_0 (cm)	131.9	200.0	75.3	131.9	194.0	80.0	136.0	155.4	80.0	127.8

とから、施工後に改良地盤のシリカ含有量を調べることで、改良地盤の強度を推定することが可能である。

3. 薬液の浸透特性

3.1 一次元浸透注入実験

砂地盤に浸透性の高い薬液を浸透注入した場合、注入した薬液は地盤内の間隙水と置き換わりながら充填される。しかしながら、浸透注入によって注入範囲のすべての間隙を薬液で置き換えることは困難である。このため、実施工では充填率と言う概念が用いられ、砂質土地盤の場合、充填率80～90%、粘性土地盤の場合では40%程度といった値が一般的に用いられている。また、従来の薬液注入では浸透距離が50cm程度と小さいため、浸透距離によらず、土質によって一定の充填率が用いられている。しかしながら、本工法では目標とする浸透距離が2～4mと大きいことから、充填率は浸透距離あるいは細粒分含有率により影響を受けることが予想される。このため、一次元浸透注入実験を行い、薬液のシリカ濃度や浸透固化処理土の一軸圧縮強さ、単位体積重量について測定を行い、充填率について検討を行った。

今回の実験では、直径5cm、長さ150～250cmの塩化

ビニール管内に一次元のモデル地盤を作製し、薬液の浸透注入を行った。実験装置を図-5に示す。注入実験はモデル地盤の長さhおよび地盤内の細粒分含有率Fcを変化させて、合計10ケースの実験を行った。実験ケースの詳細を表-3に示す。ここに示す浸透到達距離とは、モデル地盤の間隙を100%薬液で置き換えたと仮定し、注入薬液量より求めた距離である。実験には配合試験で用いた試料と同じ東京湾の埋土地盤より採取した試料を天日乾燥後にふるい分けを行い、細粒分含有率を調整し、使用した。モデル地盤は細粒分含有率を調整した各試料を相対密度が60%となるように空中落下法により作製し、間隙をCO₂で満たした後、脱気水を下部から注入し地盤を飽和させ、薬液を浸透注入した。浸透注入実験に使用した薬液は、シリカ濃度が5%の超微粒子シリカ活性タイプである。薬液の注入量は、作製したモデル地盤の間隙の80%を置換することを目標に設定し、浸透注入を行った。実験終了後、常温にて7日間養生した後、モデル地盤の各浸透距離において供試体(φ=5cm、h=10cm)を採取した。この供試体を用いて一軸圧縮試験を行い、試験終了後、供試体のシリカ含有量試験を行った。

3.2 実験結果

3.2.1 シリカ含有量測定方法

間隙に浸透注入された薬液中のシリカ濃度を求めるため、供試体のシリカ含有量を用いて以下の算定を行った。

はじめに、配合試験により、空隙を100%薬液で飽和させたシリカ濃度3～8%の供試体を作製し、これらの供試体のシリカ含有量を求め、シリカ濃度との関係を求める。さらに、一次元注入実験より測定したシリカ含有量を求め、シリカ含有量とシリカ濃度の関係より、薬液のシリカ濃度を求める。

3.2.2 浸透注入によるシリカ濃度への影響

各ケースの浸透相対距離 L/L_0 とシリカ濃度の分布の関係を図-6(a)～(d)に示す。これらの図では、薬液の希釈の影響を相対的に比較するために、注入孔からの距離(L)を浸透到達距離 L_0 で割った浸透相対距離 L/L_0 を用いている。Fc=0%のケース(a)では、浸透到達距離 L_0 に依らず L/L_0 とシリカ濃度の関係はほぼ同じである。注入時のシリカ濃度は5%であったが、注入孔より $L/L_0=0.4$ の位置

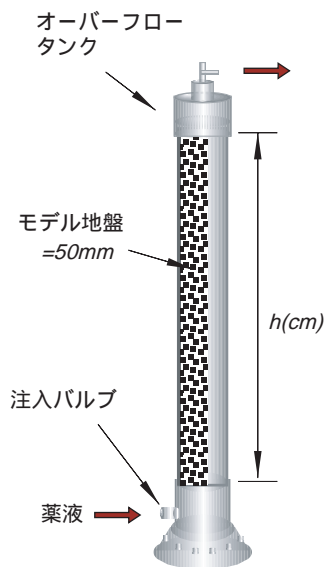
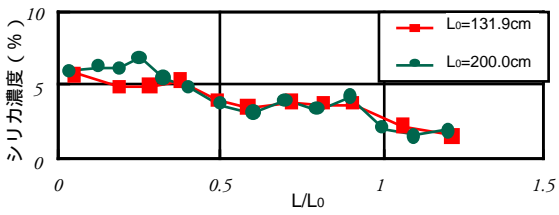
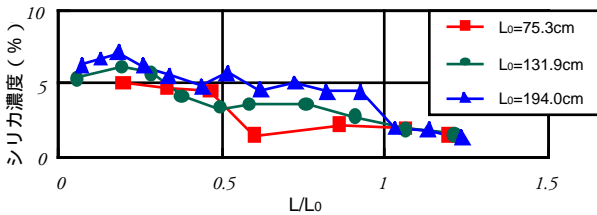


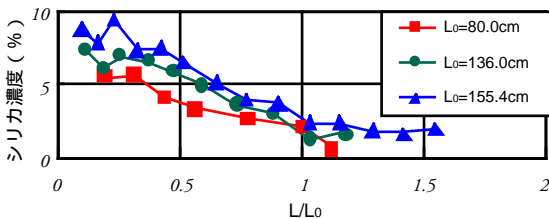
図-5 注入実験装置概要図



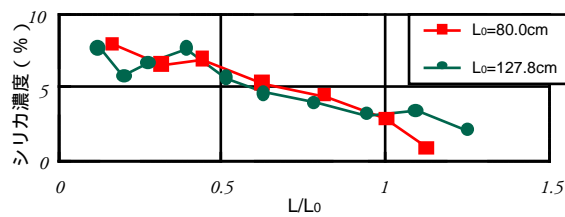
(a) Fc=0%



(b) Fc=10%



(c) Fc=25%

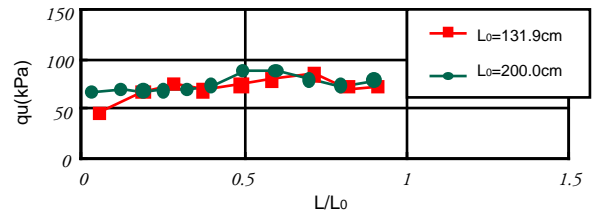


(d) Fc=40%

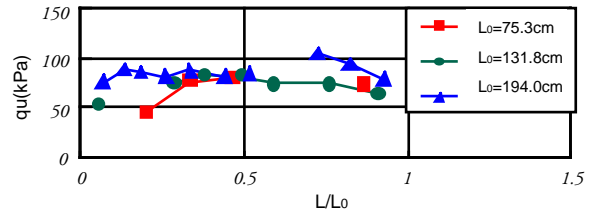
図-6 浸透距離とシリカ濃度の関係

までは6%程度まで濃縮され、0.4～1.0の間では3～4%程度まで希釈されている。ここで言う薬液の濃縮とは、後に詳述するが、注入孔付近で、細粒分が移動し間隙量が増加することによって起こると考えられる。また薬液は浸透到達距離を越えたところへも浸透しており、この濃度は1～2%となっていた。このことから、薬液の注入を行うと、浸透注入域の先端部において薬液濃度の希釈が起こり、注入孔付近では薬液が多少濃縮することがわかった。

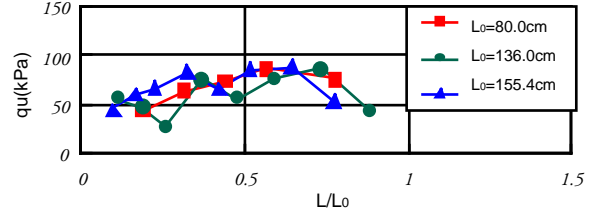
また、Fc = 10、25、40%の場合も Fc = 0%と同様な傾向が認められ、注入孔付近のシリカ濃度は6～9%と高く、先端部では濃度が低下している。その傾向は、Fcが大きいほど顕著になっており、Fc = 25%以上では、注入孔付近の濃縮が大きく、以後の濃度の低下勾配が大きく



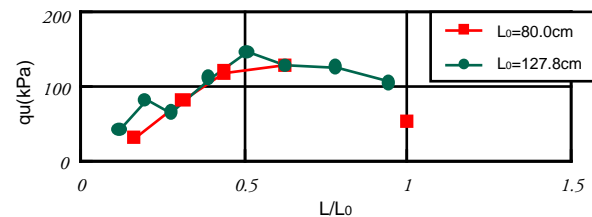
(a) Fc=0%



(b) Fc=10%



(c) Fc=25%



(d) Fc=40%

図-7 浸透距離とquの関係

なっている。このことから、地盤内のFcが小さいほど均一な充填が可能であり、Fcが多いほど注入された薬液の濃縮および希釈が大きくなることわかる。したがって、細粒分含有率が多い地盤に浸透注入する際はこれらの影響を考慮する必要がある。

3.2.3 浸透注入によるquへの影響

浸透相対距離L/L₀と浸透固化処理土の一軸圧縮強さquの分布を図-7(a)～(d)に示す。すべてのケースにおいて、注入孔付近の薬液のシリカ濃度の濃縮が大きい位置で、浸透固化処理土の強度が低下していることが確認された。この原因として、今回の実験では一次元モデル地盤であり、薬液自体のpHを低くしているため注入孔付近の地盤の強度発現が遅れていることが考えられる。pHが強度発現の速さに与える影響について今後、実験を

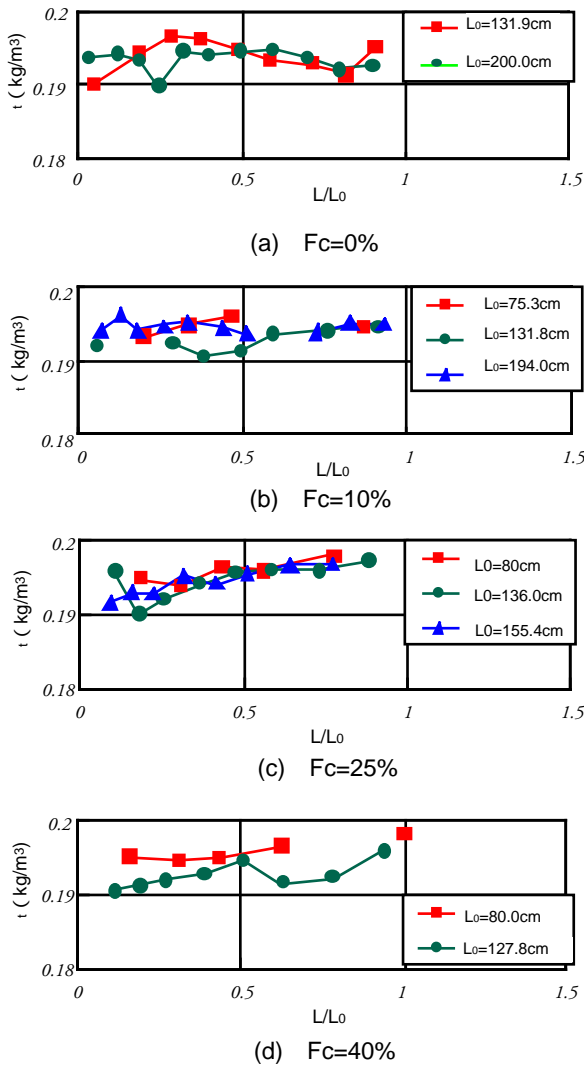


図-8 浸透距離と単位体積重量の関係

行い、検証する予定である。

Fc = 0、10%では、 L/L_0 が0.5を越えるところで、改良土の強度は、70 ~ 100kPa程度とほぼ同様の値となった。また、 L/L_0 が1.0となったところでは固化していないため供試体を採取することができず、急激に強度が低下していることがわかった。これに対してFc = 25、40%のケースでは q_u は注入孔付近では強度が低下しており、相対距離が0.4 ~ 0.7の範囲で強度が高くなっている。さらに、相対距離0.7 ~ 0.9の範囲では薬液の希釈の影響により強度は低下している。

3.2.4 浸透注入による単位体積重量への影響

単位体積重量と注入相対距離 L/L_0 の関係を図-8(a)~(d)に示す。Fc=0、10%のケースでは単位体積重量は L/L_0 によらず、およそ一定値を示している。一方、

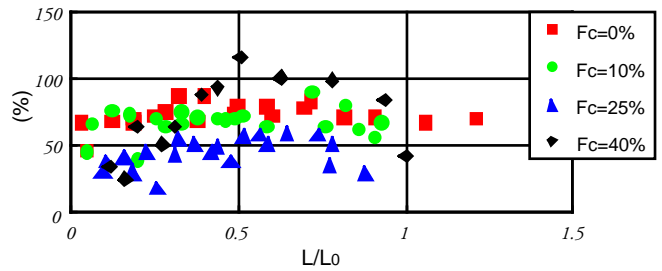


図-9 浸透距離と強度発現率の関係

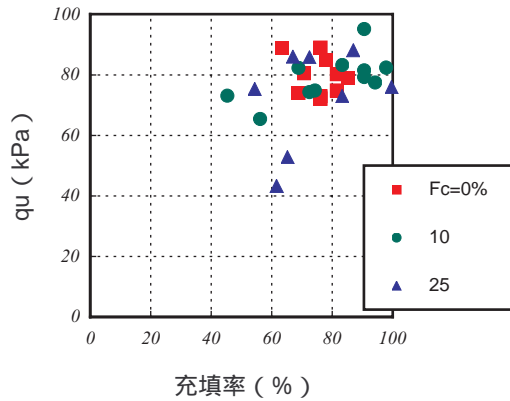


図-10 充填率と q_u の関係

Fc=25、40%のケースでは注入孔付近の単位体積重量が最も低く、浸透距離の増加に伴って単位体積重量も増加している。今回の一次元浸透注入実験では、すべてのケースにおいて薬液を同じ配合で作製しているため、所定の時間で薬液を注入する流量管理により注入を行っている。そのため、細粒分含有率が高くなるにつれて注入圧もやや高くなっていることから、注入孔付近では試料の細粒分が上方向に移動し、単位体積重量が若干低くなったものと考えられる。

3.2.5 浸透注入による薬液の希釈の影響

注入相対距離 L/L_0 と強度発現率の関係を図-9に示す。ここで、浸透注入実験による改良土の強度と配合試験で得られたシリカ濃度5%の改良土の強度比を強度発現率とする。Fc=0、10%では L/L_0 に関わらず $q_u=70 \sim 80$ kPaとなっている。一方、Fc=25%では薬液の希釈または濃縮の影響を受けているため、 q_u は50 ~ 60kPaとなっている。このため、設計に際しては対象地盤の細粒分含有率Fcと強度発現率を考慮する必要がある。

$L/L_0=0.4$ 以上の位置での薬液の充填率と q_u との関係を図-10に示す。充填率は、シリカ含有量から推定された間隙中のシリカ濃度と注入薬液の初期シリカ濃度5%の比で求めている。同図より、充填率と q_u の間に比例関係が認められることから、注入による供試体の強度低下の原因は、薬液の希釈に伴う充填率の低下であることがわ

かる。

今回実施した浸透注入実験は一次元であり、実地盤への注入は三次元的に薬液が浸透していくため、浸透流解析等を実施し、さらに検討していく予定である。

4. 浸透固化処理土の配合強度設計

2,3章にて浸透固化処理土の強度特性および浸透特性について検討してきた。ここでは、浸透固化処理土の配合設計手法について検討する。図-1.1に配合設計のフローチャートを示す。このフローでは、対象地盤の細粒分含有率 F_c を求めることで、必要な改良地盤の目標強度 q_{uf} が得られるようになっている。

強度発現率は、図-9に示すように細粒分含有率によって若干異なるが全体的に60~80%程度の値となっている。この値を用いて配合試験の強度 q_{uL} を設定する。次に、対象地盤の F_c および図-2に示した配合強度とシリカ濃度の関係により、必要な薬液のシリカ濃度を決

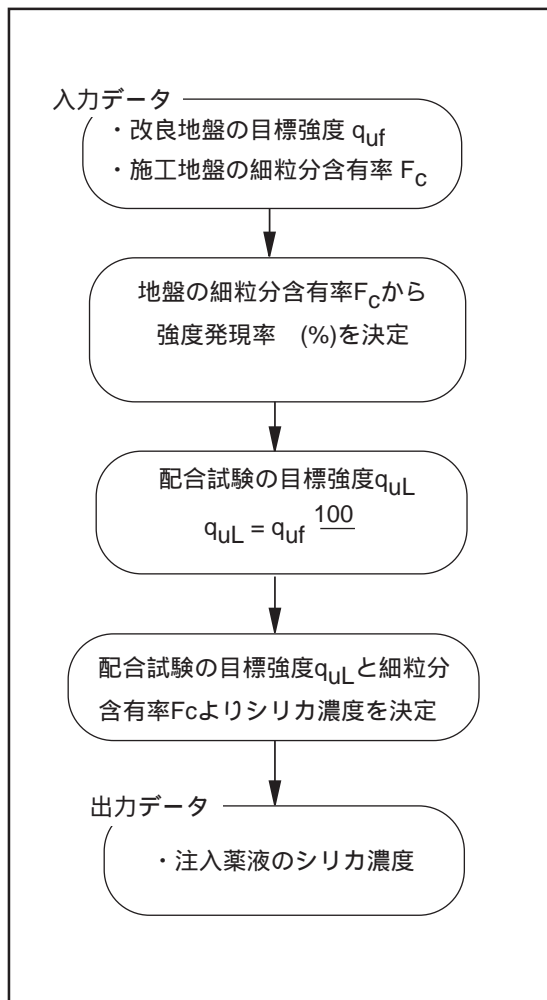


図-1.1 配合設計のフローチャート

定することができる。

以上の流れにより、配合設計を行うが、より経済的な設計を行うためには、事前に原位置で試料を採取し配合試験を行うことが望ましい。

5. 浸透固化処理土の液状化特性

5.1 実験概要

浸透性の高い薬液を地盤に浸透注入することにより、改良された地盤は強度や耐震性が増加する³⁾。しかしながら、浸透固化処理土の液状化特性については地盤の細粒分含有率 F_c と液状化強度 R_L の関係など、未だ明らかになっていない部分もある。したがって、設計において地盤の細粒分含有率をどのように評価するべきかを検討する必要があり、本章では地盤の F_c に着目し、改良土の液状化特性との関係について検討した。

F_c が液状化特性に与える影響を調べるため、非排水繰返し三軸圧縮試験および一軸圧縮試験を実施した。試料には東京空港内の埋立地盤において薬液注入された改良地盤より採取した不攪乱試料(表-4に示すA~D)を用いており、試料の細粒分含有率は図-1.2に示すように、およそ10~40%であった。さらに、比較のために細粒分をほとんど含まないものとして相馬砂による供試体(未改良)を用いた。なお、改良土の繰返し三軸圧縮試験では供試体を完全飽和させるために、供試体の上端に負圧をかけ、下端より脱気水を通水する手法を採用した。

表-4 試料の物理特性

試料	細粒分含有率 $F_c(\%)$	土粒子の密度 $d(g/cm^3)$	間隙比 e	均等係数 U_c	備考
No.A	40.7	2.722	0.753	10.67	改良土
No.B	18.7	2.728	0.755	4.49	"
No.C	12.7	2.763	0.787	2.46	"
No.D	9.7	2.788	0.775	2.33	"
相馬砂	0	2.644	0.834	1.73	未改良(D _r =60%)

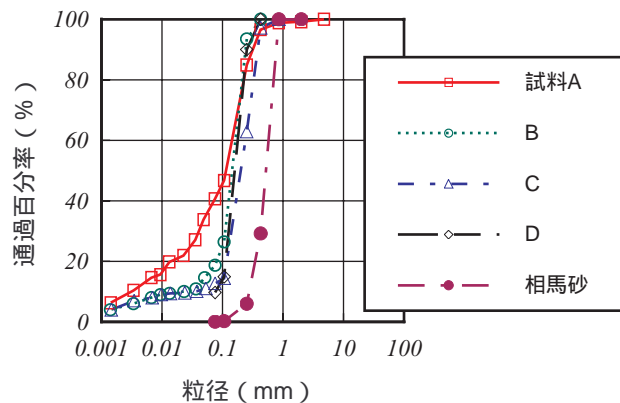


図-1.2 試料の粒径加積曲線

5.2 細粒分含有率が及ぼす薬液改良土への影響

5.2.1 一軸圧縮強さ

試料A～Dを用いて一軸圧縮試験を実施した。試験結果を図-13に示す。図に示すように、Fcが約20%まではquが上昇する傾向が見られるが、Fcが20%を越えるとquは低下している。これは、3章でも記したように、Fcが30%を越える地盤へ注入した場合、充填率が低くなるためquが低下していると考えられる。これらのことから、浸透固化処理土の一軸圧縮強さは薬液の種類はもちろんのこと、地盤のFcや間隙充填率に依存することがわかる。

5.2.2 液状化特性

試料A～Dおよび相馬砂に対し、非排水繰返し三軸圧縮試験を実施した。载荷回数20回における繰返し応力振幅比 R_{L20} と細粒分含有率の関係を図-14に示す。

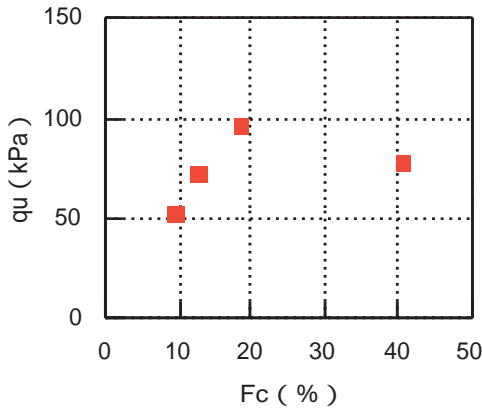


図-13 Fcが及ぼす一軸圧縮強さへの影響

図より分かるように細粒分含有率の増加に伴って、 R_{L20} も増加しており、液状化しにくい材料へと変化していることが分かる。また、図-13の傾向と異なり、細粒分含有率が約40%の R_{L20} がもっとも高い値となっている。

図-15(a)～(e)に浸透固化処理土A～Dおよび相馬砂の非排水繰返し三軸圧縮試験時における軸ひずみの経時変化を示す。未改良の相馬砂では間隙水圧比が初期有効拘束圧の1/2に近づいた時点から急激に大きな軸ひずみが生じており、圧縮側よりも伸張側の軸ひずみが発達している。一方、浸透固化処理土では軸ひずみの増加は未改良砂に比べてその程度が小さくなっており、その傾向は細粒分含有率が増加するにつれて顕著になっていることがわかる。また、どのケースにおいても軸ひずみが引張り側へ発達する引っ張り破壊(ネッキング破壊)を示している。

ここで、軸ひずみにおける両振幅DAが2および5%に達した载荷回数の比($N_{DA5\%}/N_{DA2\%}$)をそれぞれのケースについて求め、Fcとの関係を求めた。結果を図-16に

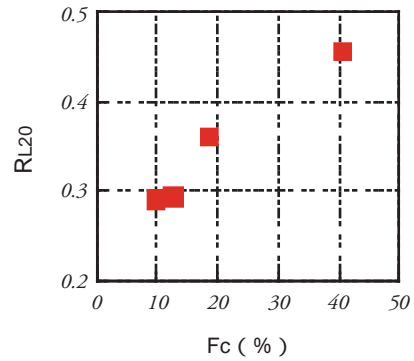


図-14 Fcが及ぼす R_{L20} への影響

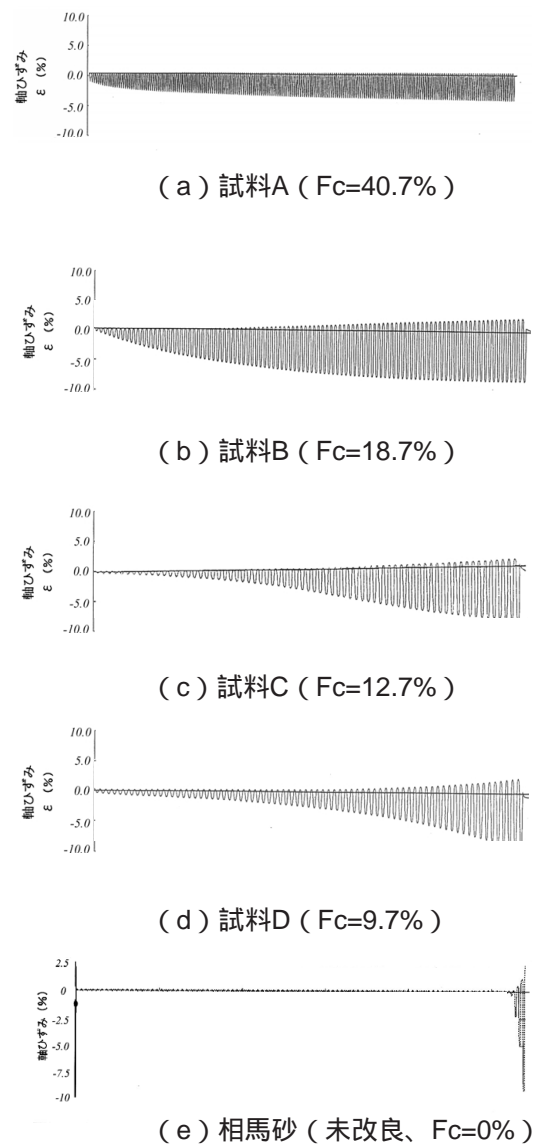


図-15 細粒分含有率による軸ひずみ増加に及ぼす影響

示す。Fcが増加すると $N_{DA5\%}/N_{DA2\%}$ も増加している。これらのことから、細粒分含有率Fcが高い地盤の改良土の方が、より粘り強い材料へと変化することが分かる。すなわち、薬液改良土ではDA=5%以降の状態でも、ある程度の液状化に対する耐久力を保持していると考えられ、細粒分をより多く含むほどその傾向はさらに強くなる。よって、薬液改良土の液状化強度を正確に評価するためには、(改良土の粘り)を表す指標、例えば $N_{DA5\%}/N_{DA2\%}$ 等を考慮する必要があると考えられる。

本章では地盤のFcに着目し、軸ひずみの増加について考察を行った。Fcが増加すると、繰り返し応力を加えたときの軸ひずみの増加傾向が異なるために、改良土の粘り強さも増加すると考えられる。そのため、薬液改良土の液状化強度を評価するためには従来の R_{L20} の概念に加えて軸ひずみの増加傾向を定量的に表す指標を取り入れる必要がある。

6. まとめ

今回、浸透固化処理工法において、薬液の浸透特性および浸透固化処理土の強度特性を実験により明らかにし、配合設計手法について検討を行った。その結果をまとめると以下ようになる。

間隙が薬液で100%置き換えられた浸透固化処理土では細粒分含有率が増加すると一軸圧縮強さも増加する。

薬液のシリカ濃度と一軸圧縮強さおよびシリカ含有量には線形関係がある。そのため、浸透固化処理土のシリカ含有量を測定すれば、一軸圧縮強さが推測できる。

細粒分含有率が高い地盤に薬液注入した浸透固化処理土の一軸圧縮強さは、配合試験で求めた強度と比べると小さくなる。

注入圧力を適切な値より大きい値で注入すると、注入孔付近では粒子間が広がり薬液の濃縮が発生し、先端部では薬液の希釈が発生する。

細粒分含有率が高い浸透固化処理土では繰り返し三軸試験時の軸ひずみ増加が緩やかであり、通常の $RL20$ の概念では過小評価する恐れがあり、軸ひずみ増加傾向を新たに取り入れる必要がある。

謝辞

今回、浸透固化処理土に関する各種土質試験を行うにあたり、九州大学工学部の善教授をはじめ、運輸省港湾技術研究所の動土質研究室の山崎室長には、多大なご指導を賜りました。紙面を借りて謝意を表します。

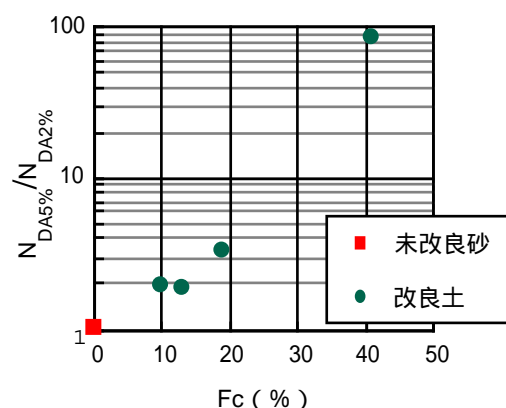


図-16 Fcによる粘性の増加

参考文献

- 1) 林他：薬液注入工法による既設構造物の液状化防止工法の開発、五洋建設技術年報、pp.11 ~ 18、1997
- 2) 関口他：注入固結土の化学分析に影響を及ぼす諸因子について、第26回土質工学研究発表会講演集、pp.1947 ~ 1948、1991
- 3) 米倉他：薬液注入における長期耐久性の研究、土と基礎 Vol. 419、pp.17 ~ 22、1992. 12