

薬液注入により地盤を強化する

澤田 亮

構造物技術研究部(基礎・土構造 主任研究員)



さわだ りょう

はじめに

地震時に、ゆるい砂地盤が液体状になる現象を液状化と呼んでいます。地盤が液状化すると構造物は支えを失い、沈下あるいは転倒したりと大きな被害を受けます。また、液状化した地盤が水平に大きく動き、構造物に大きな影響を及ぼすことがあります。

近年では想定される地震規模が大きくなり、これまでに建設された構造物では地震時に地盤の液状化が発生した場合、安全性が確保できなくなることが想定されています。

地盤中に建設され、橋梁などを支える基礎構造物、トンネルなどの地中構造物や盛土構造物は、地震時における地盤の液状化の問題をさけて通ることはできません。こうした場合、構造物を支える地盤の強度を増加させるなど、地盤の液状化に対する安定性を増加させる対策が講じられることが一般的です。しかし、広い範囲で発生する液状化に対して、対策可能範囲は自分の用地(線路のある場所)に限られているのが現状です。また、列車の走行性を確保し

ながらの対策工事となることなどから、大規模な対策工法では施工性、経済性ともに問題となるケースが少なくありません。鉄道構造物のように対策工の施工範囲が制約される場合には、施工が比較的小規模で効果が期待される薬液注入工法の適用が考えられますが、対策範囲や注入材の面から経済的な課題が残されています。

そこで、液状化対策として薬液注入工法を適用した場合の注入材の強度および効率的な注入範囲について検討しましたので、その結果について紹介します。

地盤の液状化とは

地盤の液状化とは「土中の水(間隙水)の圧力が上昇して砂粒子同士の接触点力(有効応力)が減少する結果、砂質土が強度を失うこと」と一般的に言われています。間隙水の圧力が上昇する原因には、地震による水平方向の力が繰り返し作用することのほか、地下水位の変動や波浪によることがあります。一般に、鉄道構造物で考慮する液状化は、地震によるものを指します。

このように、地震による液状化が、構造物に大きな被害をもたらすことが広く認識され、液状化に対する調査・研究が行われるようになったのは、1964年に発生した新潟地震とアラスカ地震以降です。もっともそれ以前の地震においても地中から砂や泥が水と一緒に噴き出す現象は確認されていましたが、多くの人々に知られた現象ではなく、科学的な視点でとらえることはほとんどされていませんでした。

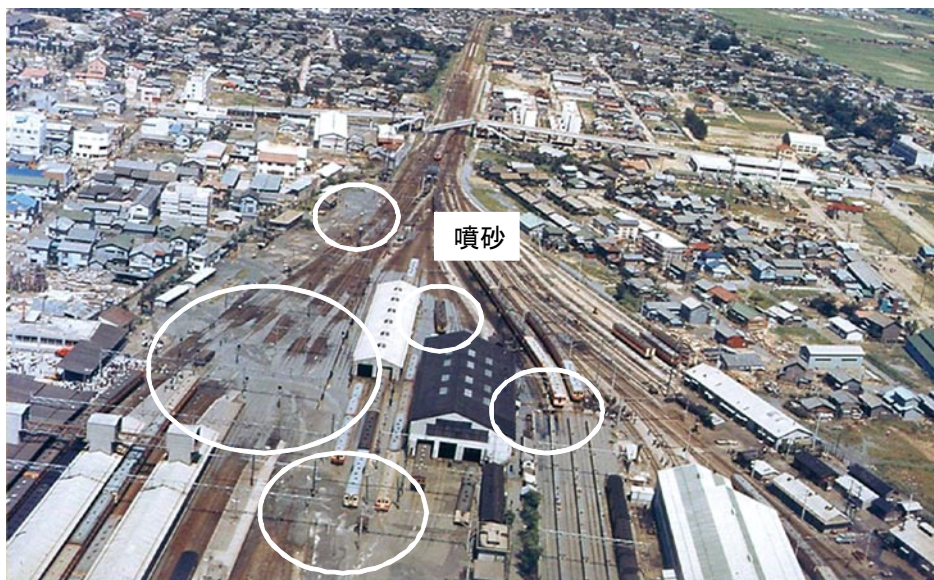


図1 1964年の新潟地震における液状化の様子(文献1)に加筆

図1に1964年の新潟地震に

において新潟駅構内で発生した液状化の様子を示します。至る所で噴砂（液状化により地中の砂が地表面に噴き出す現象）が確認できます。日本においてもこの1964年の新潟地震を契機に調査・研究が実施され、1983年の日本海中部地震以降、様々な機関で活発な調査・研究が開始されました。

薬液注入による対策

前述したように、鉄道構造物のように対策工の施工範囲が制約される場合には、施工が比較的小規模な薬液注入工法が適しています。薬液注入工法は、薬液を地盤に注入して地盤を固結、地下湧水を遮断する方法で、一般的には図2に示すように、主剤（A液）と硬化剤（B液またはC液）の2液を注入します。また、注入方法としては、比較的小さな注入圧で注入材を地盤に均質に浸透させる浸透注入と、ある程度の圧力で注入し、注入材が地盤内で脈状に固結する割裂注入があります。

鉄道構造物の液状化対策に薬液注入工法を用いる場合には、図3に示すように営業線に近接した施工になるため、前者の比較的小さな注入圧で注入材を地盤に均質に浸透させる浸透注入が適切と考えられます。また、構造物の耐用期間中は対策効果が持続することが必要であり、恒久的な対策効果が望まれます。

注入材の一般的な特徴

薬液注入工法に用いる注入材は、懸濁液型と溶液型の2種類に分けられます。懸濁液型は、非常に小さい粒径のセメント粒子を地盤内に浸透させ、セメント粒子が土粒子間の隙間に留まることで強度増加を期待するものです。しかし、注入時間の経過によって浸透性が低下し、地盤内へ十分な浸透ができない場合もあることが指摘されています。また、加圧力が過大になると割裂注入になることもあるため、適用可能な地盤は透水性が比較的良好な地盤で、土中における水の浸透のしやすさを表わす指標である透水係数で $10 \sim 10^2 \text{ cm/sec}$ 程度とされています。

一方、溶液型は水ガラス（アルカリケイ酸塩の濃厚水溶液）に代表され、主材と硬化材の2液を地盤内に浸透させ

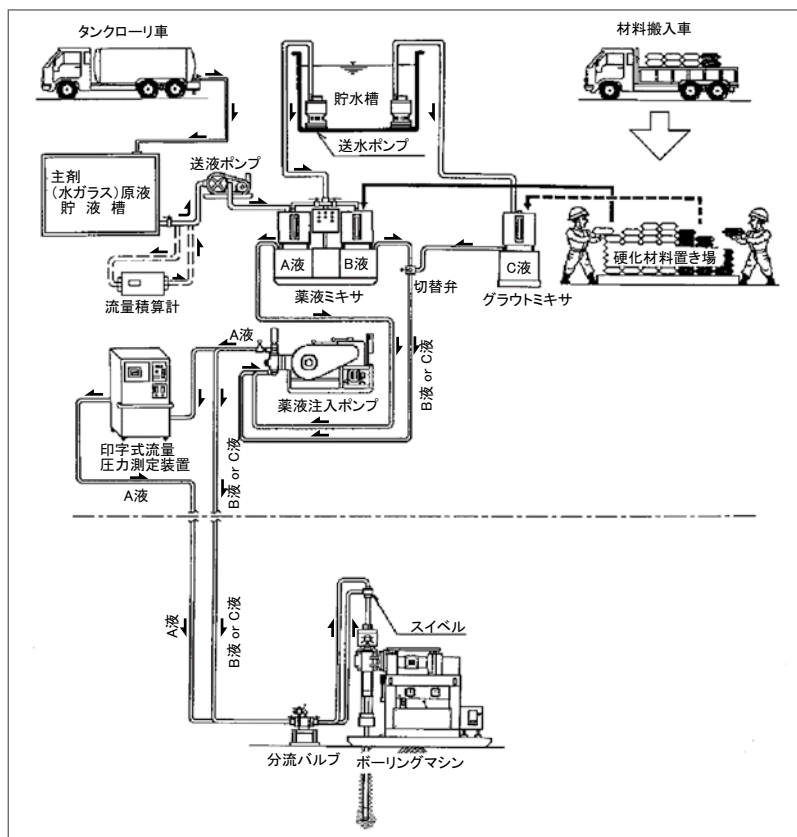


図2 薬液注入工法の概略

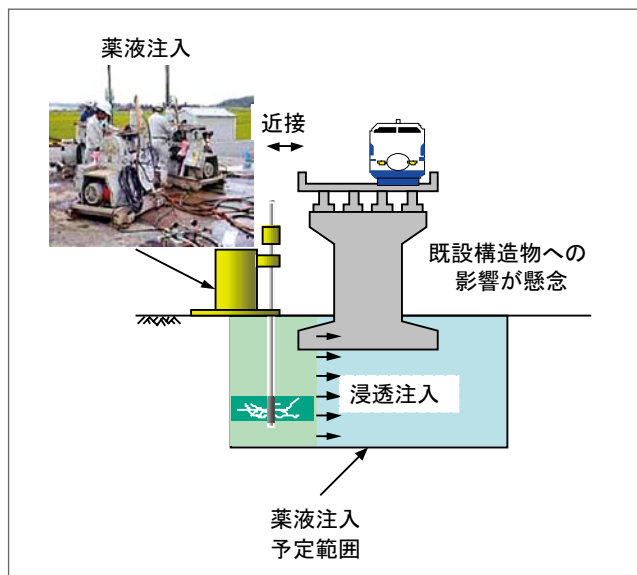


図3 液状化対策のイメージ

て化学反応により固化することで、土粒子間の隙間水がゼリー状の固結体に置換され、粘着力が付加されることで強度増加を期待するものです。溶液型は粒子を含まないため浸透性が高く、適用可能な地盤は透水係数にして $10^2 \sim 10^4 \text{ cm/sec}$ の範囲とされています。

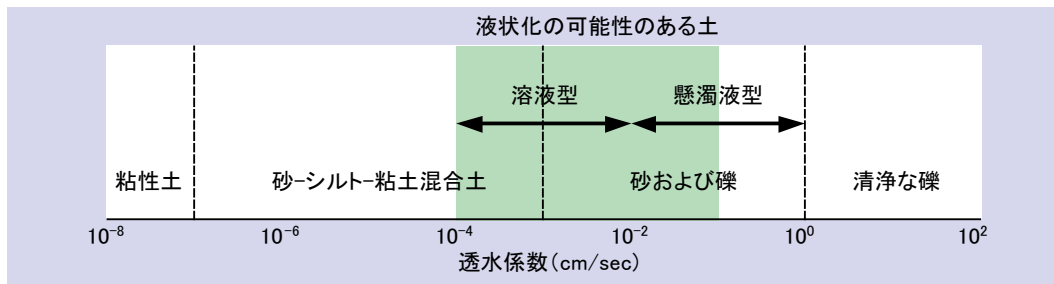


図4 注入材種類と液状化の可能性ある土の関係

鉄道構造物における耐震設計基準では、液状化の可能性の高い地盤の透水係数は、約 $10^{-1} \sim 10^{-4}$ cm/secの範囲と考えられますので、図4に示すように溶液型の注入材の適用性が高いと考えられます。

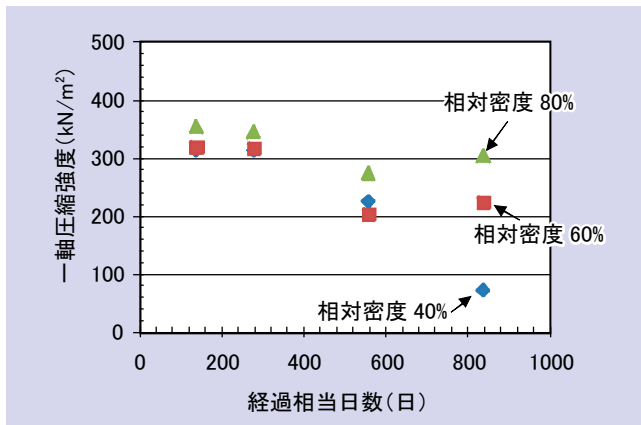


図5 劣化促進試験の結果

注入材の耐久性について

液状化の可能性が指摘される地盤では、溶液型の注入材の適用性が高いと考えられます。しかし、溶液型の代表である水ガラス系の注入材では、懸濁液型に比べて耐久性に劣ることが懸念されています。これは、主材に用いられる水ガラスのうち、硬化材と未反応の水ガラス中のナトリウムイオンがゲル構造を破壊することでシリカの溶脱が発生し、強度が低下するというものです。

しかし、近年では非アルカリ系の注入材が開発され、このような課題に対する検討が進んでいます。非アルカリシリカゾルは、水ガラスに多量の硫酸を混入し中和したものが主材で、問題となるナトリウムイオンが除去されています。図5には、劣化促進試験より非アルカリシリカゾルの耐久性について検討した結果を示します。これによれば、砂の締めり方を端的に表わす指数である相対密度が60%の緩い地盤に対して注入した供試体の場合、経過日数800日後における一軸圧縮強度の低下程度は70%に抑制されていることが確認されました。

この試験結果は、溶液型についても、耐久性が期待できることを示唆しており、液状化対策として有効であると考えられます。

注入材による地盤強度増加について

次に、薬液を浸透注入させた改良土にどの程度の強度が必要であるかを把握することが課題となります。図6に示すように鉄道構造物における液状化の評価は、土質調査結果に基づき推定される地盤の液状化に対する強度を用いて液状化に対する安全率である液状化抵抗率 F_L を

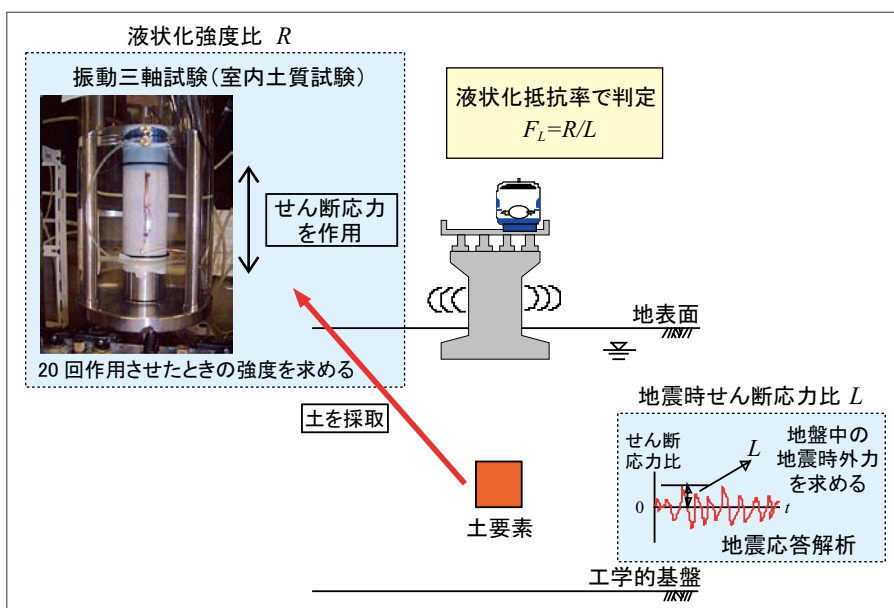


図6 液状化の評価方法の概要

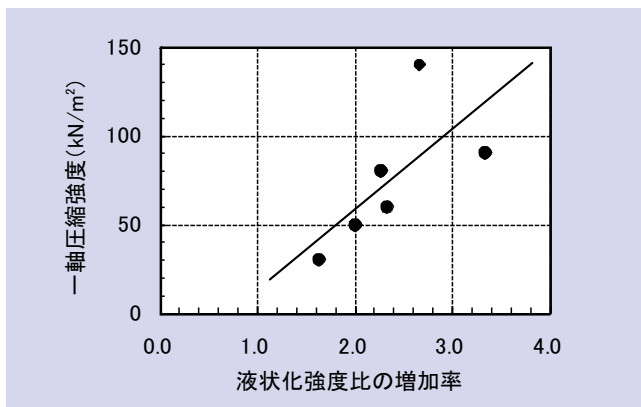


図7 一軸圧縮強度と液状化強度比の増加率の関係

算定することで行います。液状化抵抗率による液状化の評価は、室内土質試験あるいは現地において行われる原位置試験(N値)から求められる地盤の液状化に対する強度(液状化強度比)と、地震応答解析結果または地表面最大加速度から求められる地震時に地盤に作用する外力(地震時せん断応力比)を比較して、液状化の危険度を判断するものです。すなわち、地盤の液状化に対する強度が増加すれば、液状化に対する安全性が高くなるわけです。

図7には、薬液を浸透させた改良土の液状化強度と一軸圧縮強度との関係を示しています。これから、原地盤の液状化強度を2~3倍程度増加させるのに改良土に要求される一軸圧縮強度は、50~100kN/m²程度と比較的低強度でよいことがわかります。

したがって、必要な液状化抵抗率が得られるような一軸圧縮強度になるように、長期の強度の低下率を見込んだ上

で薬液の配合を決めればよいことになります。

効率的な注入範囲について

最後に、薬液を注入する範囲を決めます。この時に重要なのが、液状化した地盤での構造物の安定性の確保です。すなわち、必要な注入範囲は、構造物の安定性に影響する範囲となります。

例として、鉄道の高架橋基礎として多く用いられる杭基礎を考えます。杭基礎は、液状化した地盤では水平抵抗の減少により深い位置から過大な変形が生じることになります。この場合、変形を軽減するには水平方向の地盤の強度を確保することが必要となります。

そのため、従来では図8(a)に示すように広範囲にわたり薬液注入を実施することが提案されていました。しかし、鉄道の場合は対策可能な範囲が基本的に自分の用地内(線路のある場所)に限られるのが一般的です。鉄道の場合は線路方向には用地が連続していますが、線路直角方向は狭く限定された範囲しか対策用地が確保できないのが実状です。

そこで、図8(b)に示すように杭の周囲のみを注入した場合の効果について、模型実験より検証しました。その結果、通常考えられる中規模程度の液状化では、杭周囲の1D(D:杭径)の範囲の注入でも無対策に比べて2割程度の断面力の低下が期待できることを確認しました。

よって、図8(b)に示すような比較的少ない範囲の注入でも相応の効果が発揮され、対策コストの縮減と施工性の向上が期待できます。

おわりに

地震時に液状化の発生が予測される地盤の強化方法として薬液注入工法の適用性を見出しました。今後はさらに整理を進め、液状化の程度を指標とした合理的な注入範囲の設定方法などを検討し、経済性及び施工性を考慮した地盤の強化方法について提案したいと考えています。RRR

文献

- 1) 地盤工学会：1964年新潟地震液状化災害ビデオ・写真集，2004

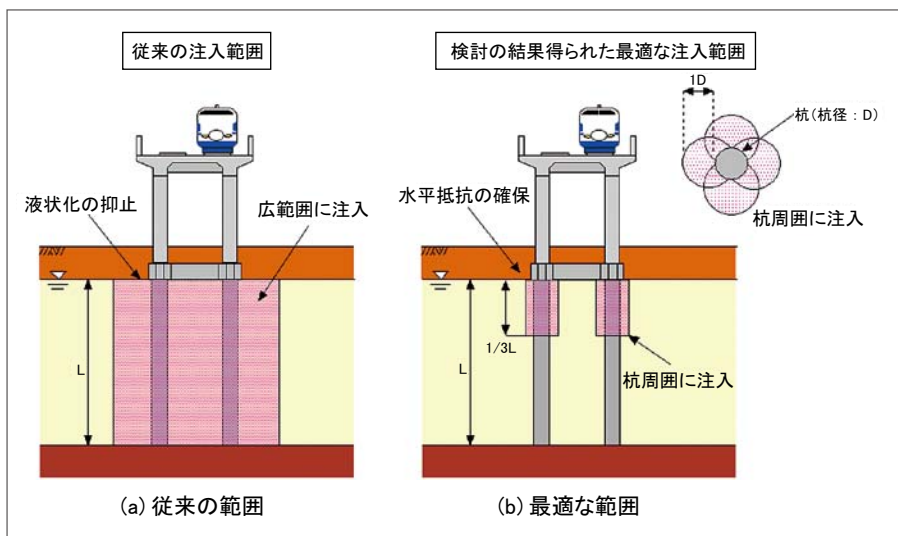


図8 杭基礎の注入範囲