

螢光X線分析装置による薬液注入効果の測定について

鈴木 健夫*, 島 重章**

Measurement of Chemical Grouting Effects by the X-ray Fluorescence Analysis Equipment

By Takeo SUZUKI and Shigenori SHIMA

1. ま え が き

我国のように軟弱地盤や土質条件の悪い箇所が多い国土では、土木工事の対象からそれらを避けるわけにはいかないのが現状である。このような困土の地理的条件のために、土質安定工法の開発、進歩はめざましく、その中でも特に、薬液注入工法は地盤改良や止水などの目的で近年の土木工事にさかんに利用されている。これは旧来の注入材料に加え、今まで注入不可能と思われていた地盤に対しても施工可能な注入材料が開発されるなど、適用範囲が広がるとともに、注入工法に対する信頼性が向上しているためである。しかし、これほど利用されている注入工法も、その対象である地盤の複雑性などにより、その設計、施工は多分に経験によるところが大である。すなわち、現場条件や地盤の複雑性により、計画位置へ計画量の薬液が注入固結していない場合がある。これは、現場の状況により薬液が浸透し易い方向に進行するためであり、このことが薬液注入工法の現状における最大欠点となっている次第である。このような場合に対処するためには、薬液の地盤中での浸透固結範囲の測定が必要になり、それにより、薬液注入工法の設計、施工、管理が十分なものになると思われる。

以上のような薬液注入効果の測定方法¹⁾には、次のようなものがある。

(1) 掘り返しによる方法

固結土塊の形状、寸法、試料採取などを直接測定することができるので、最も確実な方法であるが、

注入地盤の破壊を伴うので試験注入などの特殊な場合にしか適用できない。

(2) 貫入試験による方法

固結形状をあらかじめある程度推定して、その境界付近で、数多くの貫入試験を行なう。非改良部分と改良部分との貫入抵抗差を利用して範囲を求めるものである。

(3) ラジオアイソトープによる方法

懸濁液注入などの場合は、懸濁粒子が土粒子間ゲキを埋めるから、改良地盤の含水比は低下し密度は増加する。したがって、中性子水分計あるいはガンマ線密度計によって改良地盤と非改良地盤との差異を把握することができる。この方法は熱中性子吸収率の大きい原子(Cl, Mn)を含む薬液を用いると、比較的良好な結果が得られる。

(4) 電気抵抗による方法

大地比抵抗測定器を用いて地盤の比抵抗を測定し、その比抵抗によって注入範囲を推定する。

(5) 弾性波探査による方法

ハンマー、ダイナマイトを用いて地盤に人工的震動を発生させ、これによる弾性波の伝播速度を測定することにより、その伝播速度の相違から注入範囲を推定する。

以上と異なり、本研究は地盤に薬液を注入し、その効果を定量的に求める方法として、螢光X線分析装置による含有率の測定を試み、地盤注入効果を判定した。また比較のために、掘り返しによる方法で固結範囲を測定し、注入効果の確認を行なった。さらに固結強度

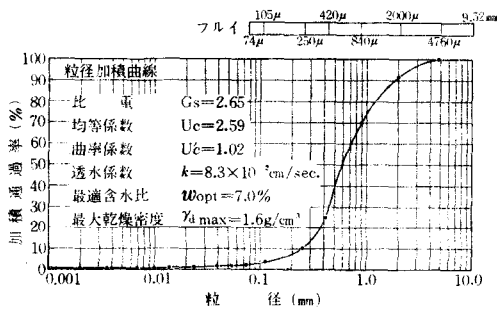
* 広島工業大学土木工学科教授

** 広島工業大学土木工学科講師

との関係を得るために一軸圧縮試験を行ない、薬液の分布状況と圧縮強さとの関係を考察した。

2. 試料

薬液注入の地盤としては、注入効果を得るために、薬液の浸透しやすい均一な材料を使用する方が、実験効果が上ると思われる。ここでは砂を使用した。この砂は広島市国泰寺付近の建設現場の地下8m付近より採取したもので、被圧地下水位の高い位置から、乱した試料として採取したものである。この付近の地下水位には硫化物の臭いが感じられ、含有物としてNa, Ca, Fe, Mgなどが含まれており、現場では薬液注入の効果が得にくい場所である。その砂の粒径加積曲線および物理的性質は図一に示した。



図一 砂の粒径加積曲線および物理的性質

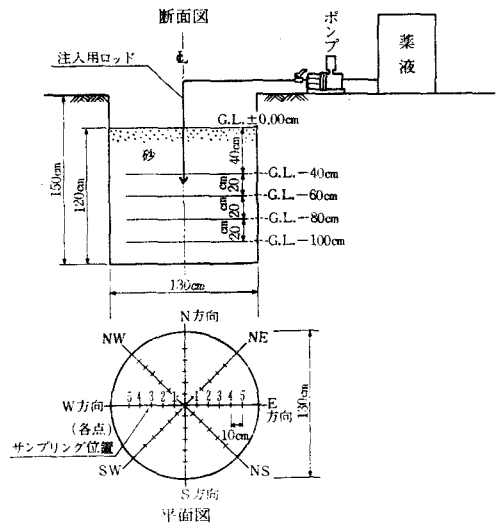
薬液注入材は、一般に現場で多量に使用されているものの中から尿素系薬液を選択した。この薬液は尿素系合成樹脂を主剤にしたもので、粘度1.4 cps (20°C)、比重1.05 (20°C)を示す。強度は土の粒度、間ゲキ率、含水比などによって異なるが、一般には10~40kg/cm²位であり、浸透性は大きく、注入液の粘性が非常に低いことから透水係数 10⁻⁴ cm/sec の土質にも浸透する。使用した薬液の標準配合は表一に示した。

表一 尿素系薬液標準配合表

		A 液		B 液			
主 剤	主 剤	20ℓ		硬化剤	2.5ℓ		
	助 剤	7.5kg					
20% (容量)	水	残		水	残		合計
	計	50ℓ		計	50ℓ		100ℓ

3. 試験方法

薬液注入の実験は、広島工業大学敷地内、3号館裏側の造成地にて実施した。実験装置の概説図は図二に示した。図中に示すようにφ130cm、深さ150cmの



図二 実験装置概略図

穴を設け、その中に国泰寺付近から採取した砂を投入し、深さ120cmになるように締固め、薬液注入地盤を形成した。

薬液注入方法は1ショット方式で、注入直前にA液(主剤液)とB液(硬化剤液)とを混合し、注入用ポンプで地盤内に注入した。注入用ロッドの先端は地表から50cm位置に入れた。

薬液注入固結後、図二中の平面図に示すように、注入点を中心として8方向に10cm間隔で、各々5点から分析試料のサンプリングを行なった。サンプリングした試料は炉乾燥後粉砕して鉄リングに加圧成形し、蛍光X線分析装置の供試体とした。得られた計数率からスタンダード試料カウント数との割合を求め、検算線法によって供試体中の薬液含有率を求めた。

固結効果の確認の比較は、地表から40cm, 60cm, 80cm, 100cmの4ヶ所で、掘り返し法による測定を行なった。また、強度の検討は薬液含有率10~50%で、φ5×10cm供試体を作成し、一軸圧縮試験により行なった。

4. 蛍光X線分析装置

(1) 概説²⁾ 3)

X線管球から発生する強力な一次X線を試料に照射すると、含有元素は励起され、元素特有の固有X線を発生する。この二次的に発生したX線を蛍光X線という。このX線を分光結晶を用いて分散させ、X線スペクトルを求め、その波長を解析して含有元素の定性分析を行なう。また、その強度を測定して定量分析を行なう。この分析で分析可能な元素は $\text{Na}_{11} \sim \text{U}_{92}$ までがあり、その中でも $\text{Na}_{11} \sim \text{Sc}_{21}$ の比較的長波長X線の場合にはX線通路の空気による吸収が大きいから、通路を真空にするか、空気をヘリウムで置換する必要がある。分光結晶は LiF が短波長用に、EDDT が長波長用に、X線検出器は短波長用にはシンチレーション計数管が、長波長用にはガスフロー型比例計数管が使用されている。試料内部で発生した蛍光X線が試料表面に出るまでに共存元素により吸収を受け、その含有量により吸収量が異なるので、この吸収効果による補正は特に重要である。この補正が適切に行なわれれば、分析値の正確度はかなり高くなり、かつ精度も高く、分析所要時間も短いので、管理分析など、同一系統の試料を数多く分析する場合には特に有効である。

(2) 装置

本研究に使用した蛍光X線分析装置はAFV-104E型で、管球にはAFX-60A型の陽極接地水冷式を用い、分光結晶には LiF (Lithium fluoride) $2d=4.028 \text{ \AA}$ とEDDT (Ethylene diamine dextro tartrate) $2d=8.808 \text{ \AA}$ を用いた。X線検出器にはシンチレーション計数管(S.C.)とガスフロー型比例計数管(F.P.C.)を使用し、波高分析装置はノイズ防止に使用した。装置は写真-1に示した。

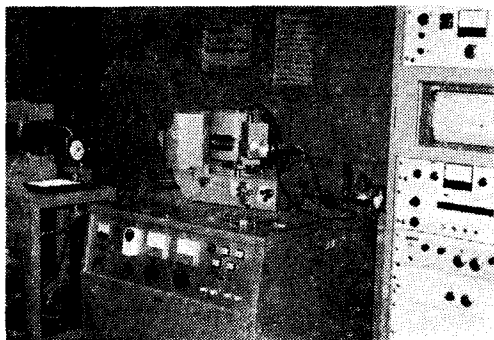


写真1 蛍光X線分析装置

(3) 分析試料の調整

蛍光X線分析値は構成元素や試料の粒度、充填度、試料表面の平面度および試料の内部偏析などの影響を受ける。蛍光X線分析に供する試料の粒度については-300メッシュ程度が最適といわれているが、-300メッシュに粉碎するには長時間と複雑な手数を要する欠点があり、分析報告の即時性および経済性により、スベックス製粉碎機を用いて粉碎した。試料の充填度、平面度によるバラツキを少なくするために一定量を鉄製リング($\phi 314 \text{ mm}$)に詰め、試料加圧成型機(PCS-700)を用いて150~355kg/cm²の圧力で成型した。

(3) 検量線³⁾

定性分析を行ない構成元素の種類を測定し、また回折線の強度、重なり程度の合いを測定した。分析の結果、川砂には多量のFeが検出され、他にZn, Cu, Ca, Si, Ni, Wが少量検出された。尿素系薬液には多量のFeが検出され、W, Cu, Ni, Alが少量検出された。検出すべき元素に他の元素の回折線が重なって表われる場合と、回折線のバックグラウンドを消すために分析元素から出る特性曲線のエネルギーレベルのうち、LOWER LEVELを越えWINDOWの間に入るエネルギーのパルスを取り出す波高分析を行なった。その結果を表-2に示した。

川砂に尿素系薬液を注入した場合の定量分析は、指標となる元素が尿素系薬液中に多量に含まれているのが適切であるが、定性分析の結果から、尿素系に含まれるNiおよび砂中に含まれるSiを用いて検量線を作製した。検量線は含有元素の含有率の重量比に比例して蛍光X線強度が増加するため、理論的には直線となるが、試料の粒度、充填度、平面度、配合の影響および器械誤差などの種々の要因により曲線や折れ線を描く。これらの誤差による凹凸を表現上小さくするために、含有率100%の試料のカウント数を標準試料カウント数として、他の試料のカウント数との割合をとり、スタンダード試料に対する割合として表わし、これと含有率との関係を描いて検量線とした。結果は図-3~図-5に示した。

5. 実験結果および考察

第1回注入実験は含水比9.6%の砂地盤に薬液量10 μl 、ゲルタイム40secで行なった。分析用試料のサンプリングは地表面下40cm, 60cm, 80cm, 100cmの位置で各々水平8方向に行ない、その分析結果を縦断面図として図-6(a), (b), (c), (d)に示した。固結土部分

表-2 波高分析結果表

試料	元素	計数管	分光結晶	回折角	LOWER LEVEL	WINDOW
鉄粉	Fe K α	S C	LiF	57.51°	0.85V	2.25V
川砂	Fe K α	S C	LiF	57.51°	0.80V	2.70V
川砂	Ca K α	P C	LiF	113.07°	0.20V	1.50V
尿素系薬液	Ni K α	P C	LiF	48.41°	0.40V	2.25V
尿素系薬液	Ni K α	S C	LiF	48.41°	0.75V	2.50V
川砂	Si K α	P C	EDDT	108.01°	0.15V	0.67V

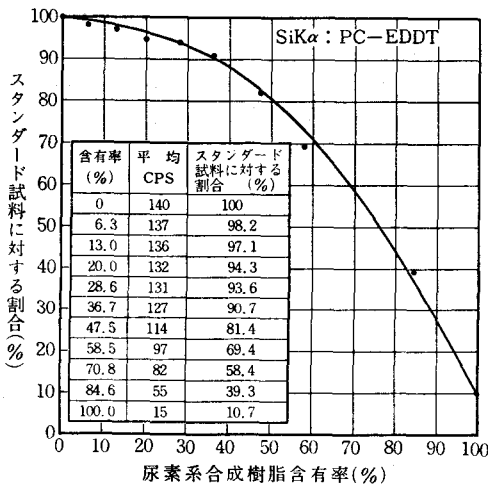


図-3 Si K α 検量線

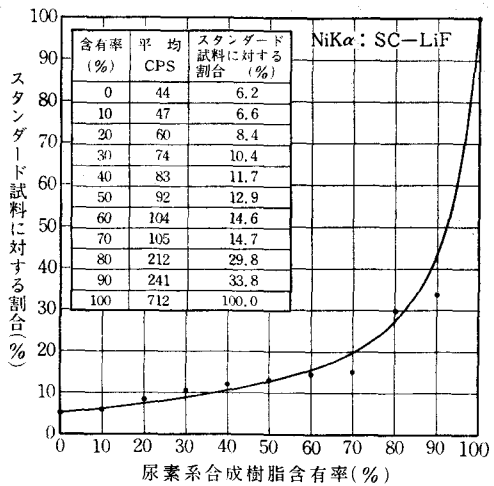


図-5 Ni K α 検量線

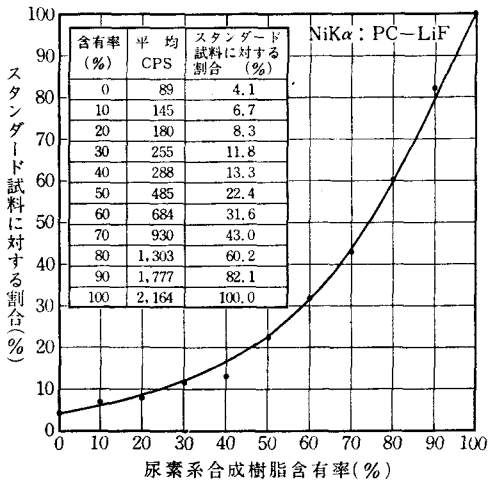


図-4 Ni K α 検量線

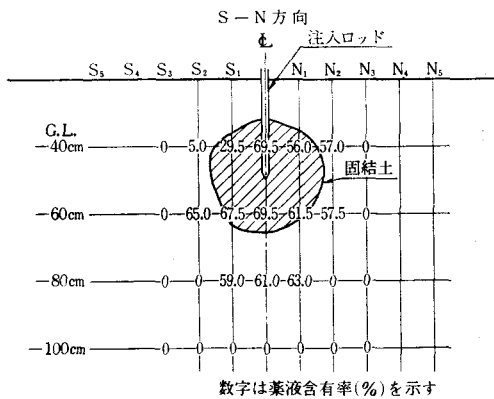


図-6(a)

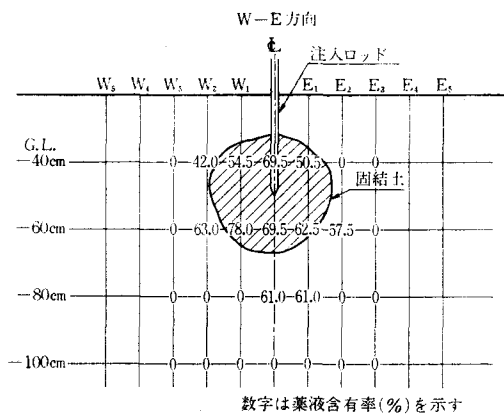


図-6 (b)

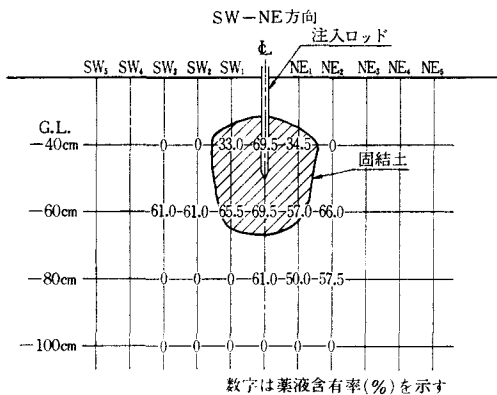


図-6 (c)

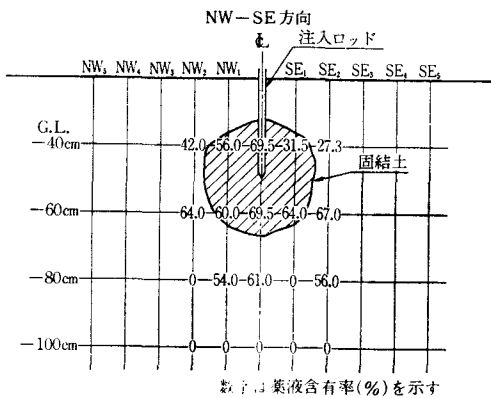


図-6 (d)

は図中に実線で示すように、直径約30cm、高さ約35cmの球状に近いもので、ロッド先端の出口を中心に固結した。蛍光X線分析にはPC計数管およびEDDT分光結晶を用い、SiK_α検量線にてSiの減少量から薬液の含有率を求め、図中の数字(%)で示した。分析値を見ると薬液の砂地盤への浸透分布は固結土以上に広がっている。これは浅層のゆるい地盤での少量注入であったことおよびゲルタイムの早かったことから、浸透はするが目的の固結を得にくい注入であったと思われる。

第2回注入実績は注入量39ℓ、ゲルタイム270secで行ない、結果を図-7(a)、(b)、(c)、(d)に示した。実線で示した固結土部分は直径約50cm、高さ約50cmの球状である。図中の数字は薬液含有率(%)で、PC計数管およびLiF分光結晶を用いてNiK_α検量線により求めたものである。縦断方向に含有率を見ると、

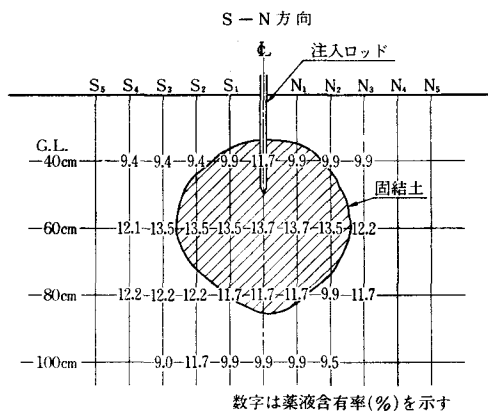


図-7 (a)

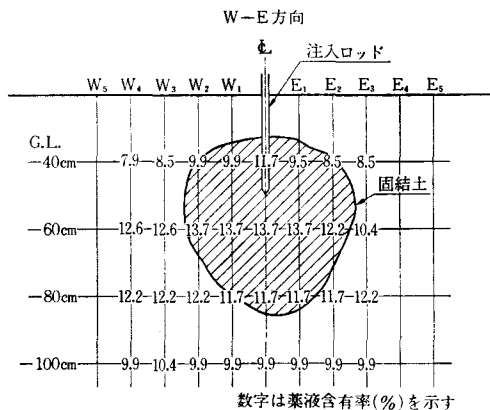


図-7 (b)

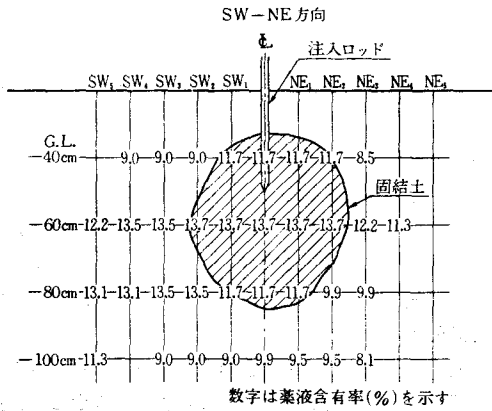


図-7(c)

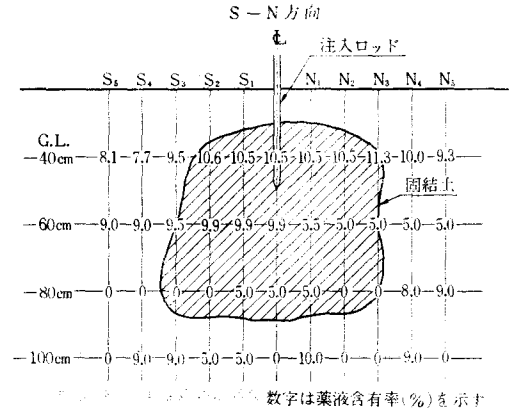


図-8(a)

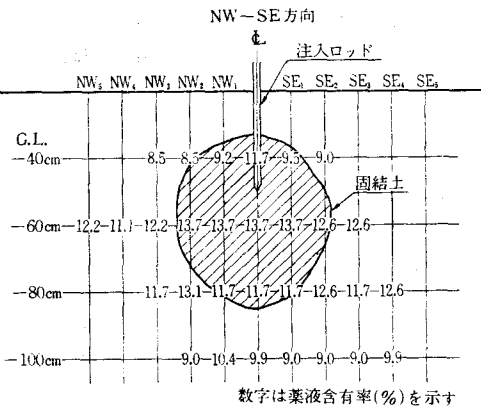


図-7(d)

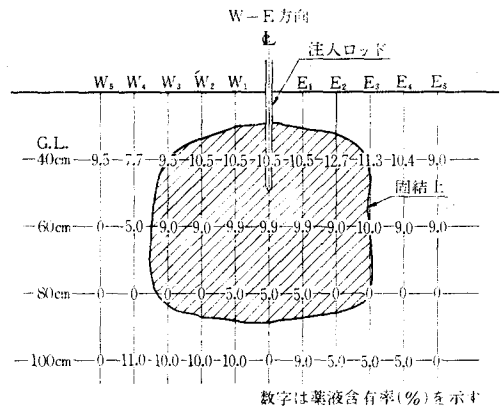


図-8(b)

固結部分と未固結部分との境界はほぼ判定できる。注入ロッドの直下、すなわちG.L.-60cm付近が最も含有率の多い分布を示し、その上下、すなわちG.L.-40cmや-80cm位置では低い含有率でも固結した。G.L.-100cm付近にはG.L.-40cm付近とほぼ同様の含有率を示したが固結土はなく、透水係数 $k=8.30 \times 10^{-2}$ cm/sec、含水比 $w=11.9\%$ の砂を使用しているので、ゲルタイムを過ぎて溶脱を生じ、薬液の浸透、拡散のみを示したものと思われる。

第3回注入実験は注入量39ℓ、ゲルタイム270secで、第2回実験と同条件であるが、砂の含水比を6.9%で行なった。結果は図-8(a), (b), (c), (d)に示すように、直径約60cm、高さ約60cmの円筒状の固結を示した。固結土の体積は第2回実験の約2.6倍であり、また第1回実験の約12倍にもなったが、地盤中の含水量による薬液の拡散希釈が少なかったためと思われる。

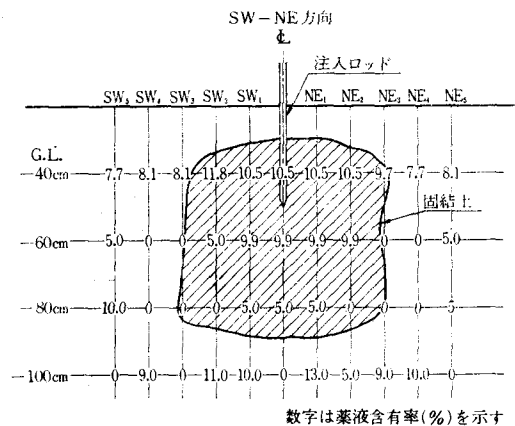


図-8(c)

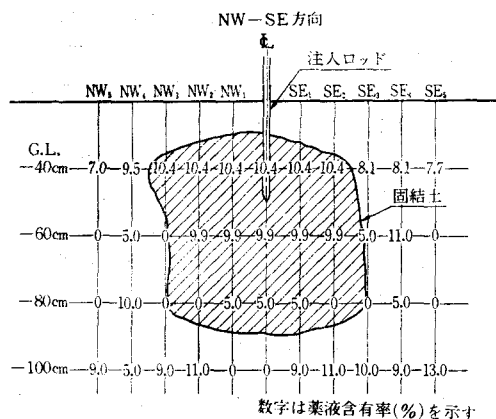


図-8(d)

砂の含水比は最適含水比7%に近いため、良く締った地盤であったことから、薬液の垂直方向への浸透もあるが、それ以上に地表方向への浸透が大きくなっている。また蛍光X線分析値はSC計数管およびLiF分光結晶を用い、Ni K_α検量線により求めたもので、固結土部分と未固結土部分との境界はかなり明確に表われた。

以上各3回の注入実験結果を比較検討してみると、注入量は1回目が10ℓ、2回目と3回目が各々39ℓである。固結量は1回目が0.014m³、2回目が0.066m³、3回目が0.170m³であり、1.0:4.7:12.1の割合となった。これは砂の含水比、締固め密度、薬液の注入量および注入圧の影響によるものと思われる。砂の含水比は1回目が9.6%、2回目が11.9%、3回目が6.9%であった。すなわち、最適含水比が7%であったことから、1回目および2回目は高含水比の状態であったため、締固め密度の低下を示したものと思われる。地盤に薬液を注入すれば、締固め密度の高い地盤程、注入量の多い程薬液への被圧状態も大きくなり、固結強度も増加するので薬液は地盤中で有効に働き、第3回目実験におけるような大きな固結量が得られたものと考えられる。

また、分析結果を比較検討すると、1回目は砂に含まれるSi K_αの減少量をPC計数管を用いて検出し、薬液の含有率に換算したもので、2回目は薬液中のNi K_αの増加量をPC計数管にて検出したものであり、3回目はNi K_αの増加量をSC計数管にて検出したものである。定性分析結果からSiは砂のみに含まれ、尿素系薬液中には存在しないので薬液の浸透量をかなり明確に分析できるが、第1回目実験は注入

条件の適格性を欠いたことなどにより、固結範囲と薬液分布率との関係を見出すことが困難となった。2回目および3回目の実験は同一注入量であるが、SCおよびPC検出器による分析結果の相違は判別できなかった。PCによる検出方法は入力雑音を消去し、直線性を高める特性があるが、検量線を求めて分析を終了するまで同一状態に装置を保つ事が操作上必要であり、Ni K_αの検出には一般にSCのみで分析するのが精度を上げるためにも良いようである。

蛍光X線分析装置により薬液注入試料を分析測定するには、事前に検量線さえ求めておけば、1つの試料中の1元素の測定が1~2分程度で可能である。また薬液注入地盤を掘り返し法などのように破壊することなく、1ヶ所当りのサンプリングを40gr程度で分析に供することができる。さらに変化の無い含有元素の測定であるから、同じ試料を長時間そのままの状態に保存も可能である。すなわち、試料の物理状態や結合状態によらない元素分析が可能である。薬液注入効果は固結土の大きさ、位置、形状を、注入地盤を乱すことなく的確に把握することを目的としているが⁴⁾、蛍光X線分析装置を用いて薬液中の1元素を追跡していくので、固結土中にはもちろん、未固結土にも浸透した元素を発見することができる。そこで強度との関連性を考察し、固結土の固結状態を検討するために一軸圧縮強さと薬液含有率との関係を図-9に示し

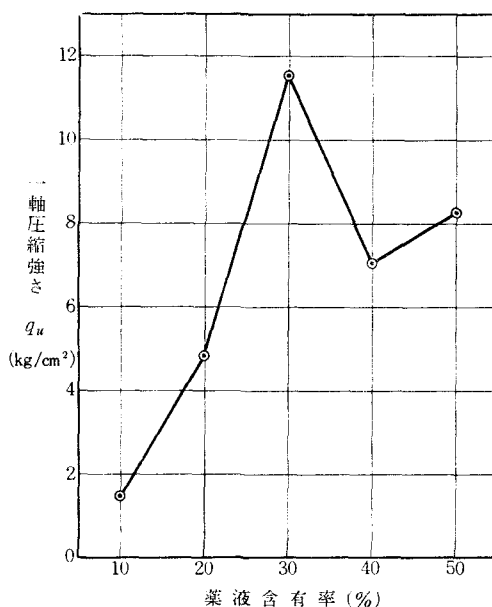


図-9 一軸圧縮強さと含有率の関係

た。薬液は多い程固結するが、一軸圧縮強さは30%の場合に最大となる。10%で1.45kg/cm²であり、それ以下の含有率では強度も低く固結しにくいようである。今回使用した薬液は、被圧状態が高ければ高い程固結強度も増加するという性質を持っているが、一軸圧縮用供試体作製には被圧状態での作製をしていないので、10%含有率以下での固結供試体が得られなかった。また、地盤注入の場合には、GL-100cmで静水圧が0.1kg/cm²の被圧状態にあることから、GL-80cm以下になれば、10%未満の少ない含有率でも固結している状態がみられた。

6. む す び

本研究は、従来の薬液注入工法において余り考慮されていない、地盤内の薬液の固結浸透範囲の推定について検討したものである。その推定方法の中でも、蛍光X線分析装置を用いてサンプリング試料を分析することにより、固結浸透量を定量的に求め、圧縮強さとの比較検討により固結浸透範囲を推定できることが確認できた。

この研究では6.9~11.9%の含水比を持つ砂地盤に注入実験を行なったもので、今後現場注入で問題になる地下水位下での注入実験に対する検討も加えれば、さらに興味ある結果が得られると思う。

終りに、本研究の実験を行なうにあたりご協力いただいた本学の卒業生、沼田次郎君（川鉄鋼管工事）と岸本信周君（岸本建設）に感謝いたします。また、注入実験に使用した注入材は、積水化学工業㈱の提供をいただいたので、ここに謝意を表します。

＜参 考 文 献＞

- 1) 日本材料学会土質安定材料委員会編（1970）；薬液注入工法——指針と解説——
- 2) 平凡社編（1968）；世界大百科事典（7）
- 3) 日本分析化学会，X線工業分析法研究懇談会編（1969）；X線工業分析第1集
- 4) 鈴木・島（1973）；蛍光X線による薬液注入効果の測定 土木学会第28回年次学術講演会講演概要集第3部