

흙막이 구조물(XI)

천 병 식*

12. 차수공

12.1. 序 言

12.1.1. 遮水工의 必要性 및 現況

시가 밀집지에서의 흙막이 구조물 건설공사는 항상 팽대한 도로교통, 밀집한 고층건물 또는 지하 매설물에 인접하여 행해지고 있다. 특히 부산과 같은 항도는 매우 높은 지하수위에 포화점성토 또는 매립층으로 이루어진 악조건의 토층이 많아서 도심지에서의 지하굴착은 연약층이나 다량의 물을 함유하는 사층을 종종 만나게 되고 그 대책에 소홀하게 되면 뜻하지 않은 큰 사고와 이어지게 된다. 따라서 이와 같은 연약지층에서의 차수를 위한 주입공법은 흙막이 구조물 또는 건설공사 자체의 안전시공 뿐 아니라 주변지반침하 및 인접 구조물의 균열, 부등침하, 붕괴 등으로 부터의 안전을 위하여 또는 인접지역 주민의 민원방지를 위해 필요불가결하다.

근년 우리 나라는 건설붐을 타고 지가의 급상승, 주차장 문제등으로 지하의 유효이용의 기운이 고양되어 현재 지하 8층, 9층까지 시공 사례가 나타나고 이와 같은 건물의 지하공간 유효이용의 경향에 따른 연약지층에서의 대규모 지하 굴착이 이루어지고, 이러한 대심도 굴착으로 인해 토압이 급증하고 지하수위 저하와 진동·충격등으로 지반붕락, 인접 건물 붕괴의 안전사고가 빈발하여 사회 문제화 되고 각 국

에서는 여러 가지 새로운 주입공법(예, 우레탄 공법, CO₂ 개스공법등)이 연구, 개발되고 있어 우리 나라 건설 현장에도 수 많은 공법이 도입되어 큰 성과를 보고있다.

현재 국내 건설현장에서는 차수공으로 물유리계 약액(LW, SCR), 우레탄, 고압분사주입, Jet Grout 등이 단독으로 또는 2~3가지가 병행되어 쓰이고 있다. 그러나 선진국에서는 이보다 훨씬 개선, 발전된 공법, 즉 Carbo Rock, Uni-Pack, Clean Rock, DDS공법등이 많이 쓰이고 난공사구간에는 주입공법과 병행하여 人工凍結工法이 쓰여지고 있는 실정이다.

제한된 공간, 복잡한 지하매설물등 여러 가지 악조건하에서 성공리에 지하굴착 공사를 수행하기 위해서는 여러 가지 지반주입공법 중에서 공사규모나 중대성, 공사비용, 공사기간, 토질조건, 현장시공여건 등을 감안하여 적합한 공법을 채택하고 채택된 공법의 정확한 적용 방법을 알아야 한다.

약액주입이란 지반내에 주입관을 삽입, 이것을 통하여 화학약액(Chemical Grout 또는 주입재라고도 함)을 지중에 압송, 충전시켜 일정한 시간(Gel-time 또는 Setting-time이라고도 함)을 경과시키면 지반이 고결되는 것으로서, 지반의 불투수화(차수, 지수) 또는 지반강도증대를 그 목적으로 한다. 현행 일반화된 약액으로는 물유리 약액이 대부분으로서 차수 목적의 경우는 물유리만이, 지반강도증대 목적의 경우는 시멘트를 병행하여 사용된다. 한편 댐

*정회원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

그라우팅, 터널이입그라우팅등에 적용되어온 시멘트그라우팅이란 시멘트 현탁액을 펌프로 압송하여 지반내에 고결시키는 것을 말하며, 이때 시멘트와 물은 수화반응을 일으켜 Sol로부터 Gel로 되는 데 이 때 원하는 시간은 온도에 따라 다르나 대략 몇 시간의 단위이며, 연속적으로 압송할 경우는 주입가능한 공극이 막히지만 않는다면 시멘트 그라우트가 세트되는 장소도 무한히 멀어지게 된다.

이와같이 주입공법은 직접적인 차수공 또는 지반개량공으로서, 비교적 간편하게 소규모로도 실시할 수 있고 소음, 진동, 교통난 등의 공해가 적으며, 더욱 공기가 짧고 타공법으로는 달성 불가능한 것도 시공할 수 있는 특징을 갖고 있다.

일반적으로 약액주입에 의하여 흙은 그 공학적 성질이 매우 달라져서 투수계수 및 강도정수가 변하게 되는 데, 강도정수중 점착력은 주입전에 비해 수배 내지 십수배 까지 증가하는 반면 내부마찰각은 거의 변화가 없는 것으로 보고 있다.

12.1.2. 最近 研究動向 및 將來展望

본 공법의 필요성이 급증하고 있는 것은 세계적 추세이나 아직 미해결의 중대한 문제점을 안고 있는 바 지반개량의 확실성(약액의 정확한 주입범위, 주입고결토의 강도증대효과), 주입효과 판정법, 주입재의 내구성 및 환경공해 문제 등이 바로 그것이다.

자연지반토는 매우 불균질하기 때문에 설계시 주입범위를 정한다 하더라도 실제 목적한 범위에 충분히 주입되지 않은 경우가 허다하다. 방지 대책으로서 주입방법 또는 시공에 자체제어 System을 도입하는 등 많은 노력이 계속되어 실용화 되고는 있으나 아직도 많은 문제점을 내포하고 있다.

모래지반의 밀도가 매우 큰 경우 약액을 주입하게 되면 배수상태에서 비배수상태로 되므로 공극수압이 높아져 모래의 마찰저항이 감소하게 되고 전단강도는 Gel 강도가 주체로 되기 때문에 약액주입에 의해 오히려 그 강도가 원

래의 배수전단강도보다 작게 될 경우도 있다. 물유리계 약액은 Syneresis현상 등으로 주입 완료후 그 효과는 시간이 흐를수록 상당히 떨어지게 된다. 그러나 구조물 기초의 Underpinning이나 댐 기초의 Curtain Grout 등 내구성이 요망되는 경우가 대부분이다. 종래 Curtain Grout재로는 시멘트가 주로 쓰여왔으나 최근엔 주입재의 개선으로 약액의 사용에 대한 연구가 진행중이다. Bordon, 米倉, 檜垣 등은 특히 고결토의 장기내구성 내지는 Homogel의 용탈현상 등의 연구에 주력하고 있다. 중성약액은 종래의 물유리계에 비해 내구성면에서 월등하다. 수중주입시 水中汚濁을 방지하기 위해 시멘트 대부분을 Slag로 치환하고 더욱 중성영역에서 고결화하는 물유리에 실리카졸을 가한 저알카리성 몰탈이 연구되고 있다. 또한 주입범위, 주입효과를 확인할 목적으로 전기저항, 탄성파탐사, 중성자수분계, γ 선밀도계 등에 의한 주입효과판정에 대한 새로운 연구가 진행되고 있다.

더욱 최근에 국내외에서 도심지 지반굴착공사에 있어서는 진동 및 충격력의 차단대책의 일환으로 약액주입에 의한 지중벽의 진동저감 효과에 대한 연구도 진행중이다.

약액주입공법의 가장 큰 과제인 Hydraulic Fracturing에 관한 연구는 Teton댐의 파괴 이후 세계적 관심이 되어 각국에서 앞을 다투어 연구되고 있다. 早稲田大에서는 투수성지반과 불투수성지반의 수압파쇄에 대해 다년간 집중 연구를 하고 있다. 수직 Borehole의 경우 Crack발생에 필요한 압력은 B.Haimson의 응력해석과 M.K.Hubbert의 파쇄조건식을 조합하여 할렬발생시의 주입압과 지반조건을 적용함으로써 설명될 수 있다. 또한 Borehole 주변의 응력분포는 두꺼운 Pipe의 직경과 여기에 작용하는 응력, Pipe재의 탄성특성에 의한 탄성론을 적용하여 해석될 수 있다.

최근 국내 도심지 근접시공에서 많이 이용되고 있는 고압분사공법(예, JSP, SIG, Jet Grout공법 등)이 해성점성토(일명 펄층) 또는 매립지층에서는 그 효과가 크게 감소되는 예를

많이 볼 수 있다. 이는 해성점성토의 염분(NaCl), 유기물 또는 염소이온, 황산염이온 등의 작용때문인 것으로 추측되는 데 아직 이에 대한 확실한 원인규명 및 근본적인 대책은 나와 있지 않다.

순수 Chemical Grouting공법(예, SGR, LW 등)은 극히 일반화된 약액주입공법으로서 전국 어디서나 어느 건설현장에서든 쉽게 눈에 띄일 정도로 광범위하게 쓰이는 저렴한 공법이다. 본 공법의 주 목적은 차수이며 경우에 따라서는 강도증대목적으로 쓰이고 있다. 그러나 지하철 터널, 가설 토류벽등에서 건설기간이 길 경우는 내구성 문제가 야기되는 바 이들 약액의 내구성은 용액형은 6개월 내지 1년, 현탁액형은 1년 내지 1년 6개월 정도로 알려져 있는데 내구성을 고려하지 않을 경우 이것이 곧 안전사고의 원인이 될 수 있는 것이다. 또한 강도증대목적으로 쓰일 경우는 지반강도의 대폭적인 증대가 어렵다 하겠다. 따라서 지금 보다 약간의 강도만 더 높일 수 있다면 본 공법이 안고 있는 장점이 더욱 부각되어 고가의 주입공법을 적용하지 않아도 소기의 목적을 달성할 수가 있어서 지금 보다 훨씬 활용폭을 넓힐 수 있으리라 보며 또한 안전사고도 크게 줄일 수 있는 공법이 될 수 있어 지반개량공법의 혁신적인 역할을 할 수 있을 것이다.

12.2. 藥液의 特性 및 結核의 原理

12.2.1. 藥液의 種類 및 特性

약액은 광의의 약액과 협의의 약액으로 나누어 볼 수 있다. 즉, 표 1과 같이 전자는 현탁액형의 비약액계와 약액계를 말하며, 후자는 약액계를 뜻한다.

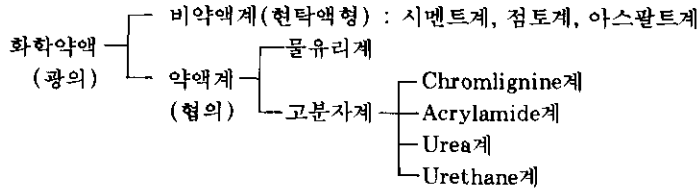
비약액계의 가장 대표적인 시멘트는 강도나 경제적인 면에서 보아 가장 일반적이긴 하지만 조립토 이외에는 주입되지 않으며 경화하기 까지엔 많은 시간이 요구되어 긴급을 요하는 용수, 누수 등의 지하수처리나 유수중에서의 주입효과는 기대할 수 없게 된다. 더욱 입자로 되어 있어서 암반의 균열이 협소하거나 연장거리

가 멀 경우는 그 주입효과는 기대 할수 없다. 벤토나이트, 아스팔트는 주입에 의한 강도는 기대할 수 없고 다만 차수목적으로 밖에 쓰이지 않는다. 일반적으로 물유리계, 고분자계의 약액은 점성이 낮고 입자가 없어서 시멘트로는 기대할 수 없는 협소한 균열 깊숙히까지 주입 충전 될 수 있으며 시멘트와의 병용으로 부족한 강도를 증대시킬 수도 있다. 그러나 현재 고분자계 약액은 주입으로 인한 공해문제로 특수한 목적외에는 거의 쓰이지 않고 있으며 대부분 물유리계만이 쓰이고 있다.

고분자계 약액중 현재 유일하게 쓰이고 있는 요소계 약액은 침투성이 좋은 편이며 약액중 강도효과가 가장 우수하고 다른 약액에 비해 비교적 경제적이다. 그러나 강산성 조건이 아니면 Gel화가 어렵다. 따라서 물유리계와 같은 강알칼리계 약액과 병용할 경우는 주입순서에 주의를 요한다. 우레탄계는 지반에 주입되어 물과 닿자마자 고결화가 이루어지기 때문에 유속이 빠른 지하수류에서 차수용으로 그 효과가 특히 인정되고 있다. 팽창성을 갖고 있어서 주입량 이상의 고결화가 가능하고 강도증대효과가 매우 높은 것이 특징이다. 그러나 물과 혼합되지 않는 부분에서는 고결이 어렵고 또 정도가 매우 높은 경우에 따라서는 용제에서 유독가스가 나올 수 있으므로 주의를 요한다. 이상과 같이 약액은 각각 다른 재료적으로 특이성을 갖고 있으므로 약액을 선택할 경우에는 지반조건 및 목적별로 약액의 입경, 점성, 안전성, 차수성, 강도, 내구성, 경제성 등을 다각적으로 고려하여 한다. 일반적으로 약액은 현탁액형, 물유리계, 고분자계 순으로 침투성이 좋아지고 가격은 비싸게 된다. 따라서 암괴를 함유한 토사나 굵은 모래에서와 같이 비교적 공극이 큰 흙에 대해서는 현탁액형의 약액이, 사질토와 같이 비교적 공극이 작은 흙에는 용액형 약액이 많이 쓰이게 된다.

물유리계 약액은 어느 약액보다도 많이 쓰이는 약액으로서 차수효과가 크고 공해의 우려가 적고 경제적이다. 점성은 2~3cps로서 다른 주입재에 비해 비교적 낮아 침투성은 양호하나

표1. 화학약액의 분류



약액주입으로 얻어진 고결토의 강도가 만족스럽지 못하다는 결점이 있다. 그러나 제한된 범위내에서는 시멘트 또는 Micro Cement와의 병용으로 강도증대효과를 얻고 있다. 이것은 크게 알칼리계와 비알칼리계, 현탁액형과 용액형으로 분류되며 경우에 따라서는 항구성약액인 특수 실리카계, 기·액반응계로 분류되기도 한다(표 2 참조).

물유리계 약액은 오래 전 부터 알칼리 상태에서의 물유리의 반응(겔화)을 이용하여 왔으

나, 최근 여기에 속하지 않은 비알칼리 상태의 반응형식도 실용화 되고 있다. 물유리계 주입재는 반응제로서 현탁형 주입재와 용액형 주입재로 대별할 수 있으며 주입재의 pH치에 따라 알칼리계 주입재와 비알칼리계 주입재로 분류되며 많은 종류가 있다. 물유리계 주입재의 성질은 사용하는 반응제의 종류에 따라 매우 달라지며 주입공법, 토질 등과의 적합성 등을 고려하여야 선택한다.

표2. 물유리계 약액의 분류

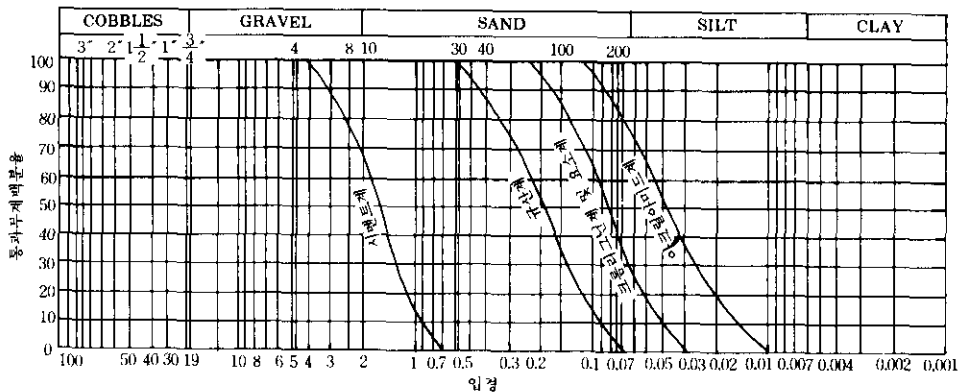
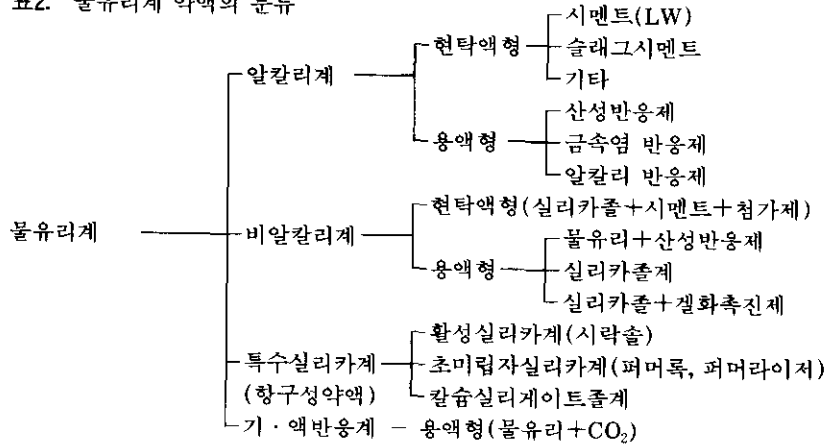


그림 1. 각종 약액의 침투가능 입도분포

표3. 물유리계 약액의 종류와 특징

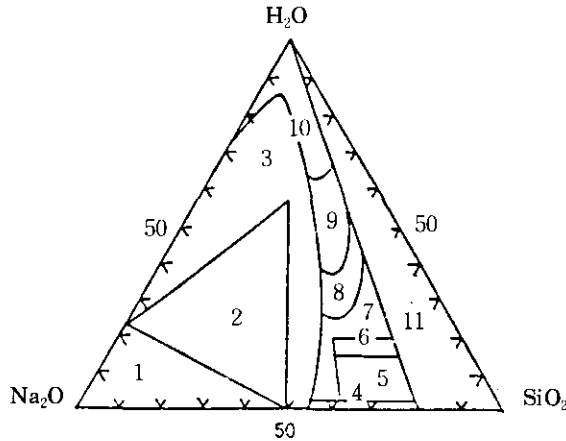
종 류	主 濟	반 응 제	반응제의 종류	특 성	
알 카 리 성	현 탁 액 형	물유리	시멘트	시멘트	· 젤화시간과 강도는 시멘트량에 의해 결정된다. · 젤화시간은 일반적으로 1~2분이 적합하다. 단, 몇초와 같은 순결성은 안된다.
		물유리	시멘트·슬래그	시멘트·슬래그	· 시멘트량을 증가시키지 않고 젤화시간을 적절히 유지하면서 높은 강도를 얻을 수 있다.
		물유리	슬래그·석회	슬래그·석회	· 순결에서 10분 정도의 젤화시간의 선정이 가능하고, 강도는 입의 것이 얻어진다.
		물유리	석 고	석 고	· 순결에의 젤화시간이 얻어지고, 몇시간에 최종강도가 된다.
	용 액 형	물유리	산성반응제	인산(H_2PO_4), 탄산수소나트륨($NaHCO_3$), 황산수소나트륨($NaHSO_4$), 인산제1나트륨(NaH_2PO_4), 이황산수소나트륨($NaHSO_3$) 등	· 이 반응제는 물유리와 급격히 반응한다. 따라서, 반응물이 낮고, 내구성이나 강도등의 성질이 떨어진다. 또한 젤화시간의 조정이 어렵다. 이 때문에 이 반응제와 다른 유기반응제, 금속염류와 병용할 경우가 많다. · 순결그라우트로서 사용될 경우에는 현탁형 그라우트와의 병용이 바람직하다.
		물유리	금속염반응제	염화칼슘($CaCl_2$), 염화나트륨($NaCl$), 황산마그네슘($MgSO_4$), 황산알루미늄($Al_2(SO_4)_3$), 염화마그네슘($MgCl_2$) 등	· 이 반응제는 물유리와 반응해서 순결반응을 일으킬 성질이 있으며, 순결용으로 사용한다. · 순결그라우트로서 사용될 경우에는 현탁형 그라우트와 병용이 바람직하다.
	물유리	유기반응제	글리옥살(CHO) ₂ , 에치렌글리콜 디아세테이트($C_2H_4(OCOCH_3)_2$), γ (감마)-부틸락톤($C_4H_8O_2$) 등 트리아세틴($C_6H_{14}O_6$)	· 이 반응제는 물유리의 알칼리하에서 가수분해를 일으켜, 서서히 산을 형성하여 물유리중의 알칼리를 소비하여 젤화한다. 이 반응은 서서히 행해지므로 젤화시간의 조정이 용이하다. 그러나, 이반응제는 단독으로 사용되면 그 양이 많아져서, 단시간의 젤화시간이 얻어지지 않기 때문에 통상 산성반응제등과 조합해서 사용한다.	
	물유리	알칼리계	알루미늄산 나트륨($NaAlO_2$)	· 용액형으로 유일한 알칼리계로 농도의 짙고묽음에 따라 젤화특성이 달라진다. 특히, 고농도인 경우에는 물에 희석되면 젤화시간이 빨라진다.	
특 수 실 리 카 형	활성실리카			강도·내구성에 우수하며, 항구그라우트로서 사용될 수 있다.	
	캡슐실리카이트졸			강도·내구성에 우수하며, 항구그라우트로서 사용될 수 있다. 호모젤강도가 극히 높다.	
	초미립자실리카			침투성과 내구성이 우수하며, 장기강도의 증가가 현저하고 또한 거의 중성이므로 수질보존성이 뛰어나다. 항구성 그라우트로서 사용가능하다.	
알 카 리 성	현 탁 액 형	실리카졸	시멘트	시멘트	· 물유리에 산을 더해서 알칼리산을 제외한 실리카졸을 사용한다. 실리카졸 농도나 반응제에 의해 순결에서 몇분까지 얻어진다. 또한, 용탈이 적고 안전성이 좋다.
	용 액 형	물유리	산성용액	인 산(H_3PO_4), 황 산 나 트 른($N_2H_5SO_4$), 황산(H_2SO_4)	· 물유리에 직접 산성액체를 더한 중성영역에서 젤화시키는 것으로, 순결로 사용될 때가 많다.
		실리카졸	촉진제(염)	염기성염, 산성염, 물유리($mNa_2O \cdot nSiO_2$) 등	· 물유리에 산을 더해서 알칼리를 제외한 실리카졸 농도나 반응제에 의해 순결에서 완료까지 조정이 가능하며, 실리카의 용탈이 적고 안전성이 좋다.
기 액 반 응 제	용 액 형	탄산가스		· 물유리의 알칼리로 탄산가스를 중화시킨다. · 순결·완결도 가능 · 수질보존성이 우수하다.	

물유리계 약액은 1974년 고분자계 약액이 사용될 수 없게 된 이후 그 필요성에 의해 많은 개량이 이루어져서 고분자계 주입재와 같은 성

능을 지닌 우수한 주입재가 개발되고 있다. 물유리계 약액의 종류와 특징을 세분화 하면 표 3과 같다.

표4. 규산소다의 종류

종 류	화 학 명	분 자 식	물 비	
결 정 성 규 산 소 다	올소규산소다	Tetra Sodium(mono) Silicate	$2\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	0.5
	세키스규산소다	Hexa Sodium Di Sillicate	$3\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	0.67
	메타규산소다	Di Sodium(Mono) Silicate	$\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{SiO}_2 \cdot x\text{H}_2\text{O}$	1
규 산 소 다 용 액	규산소다 1호	Di Sodium Di Silicate	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot \text{aq}$	2
	규산소다 2호	Tetra Sodium Penta Silicate	$2\text{Na}_2\text{O} \cdot 5\text{SiO}_2 \cdot \text{aq}$	2.5
	규산소다 3호	Di Sodium Tri Silicate	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot \text{aq}$	3
	규산소다 4호	Di Sodium Tetra Silicate	$\text{Na}_2\text{O} \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot \text{aq}$	4



- | | |
|---------------------------|------------|
| 1 無水올소 규산소다 및 가성 소다와의 혼합물 | 2 결정성 규산소다 |
| 3 일부 결정성 규산소다를 함유한 혼합물 | 4 규산 소다유리 |
| 5 수화유리 | 6 탈수한 불유리 |
| 7 반고체 | 8 粘糊液 |
| 9 규산소다용액 | 10 稀薄溶液 |
| 11 통상 불안정한 액 및 겔 | |

그림2. $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$

12.2.2. 겔화의 原理

1) 불유리의 종류와 조성에 따른 물리화학적 특성

물유리는 규산소다라고도 하며 규사와 소다회 또는 규사와 가성소다를 원료로 해서 만들어지는 규산(SiO_2)과 알칼리(Na_2O)로 되는 유리로 $\text{Na}_2\text{O} \cdot n\text{SiO}_2$ 로 나타낸다.

n 은 몰비(比)로 $n=0.5\sim 4$ 의 범위의 것이 공업적으로 생산되고 있다.

n 이 1이하의 것은 결정성 규산소다라고 부르며 n 이 1이상인 것은 비정질(非晶質)의 구조가 되어 액상으로 통상 규산소다라고 부른다.

규산소다는 몰비에 의해 1호, 2호, 3호, 4호

가 있으며 일반적으로 약액주입에 사용되는 것은 3호 물유리로 특수한 경우에 2호, 4호가 사용될 때가 있다.

그림 2에 $\text{Na}_2\text{O}-\text{SiO}_2-\text{H}_2\text{O}$ 의 관계를 나타내고 표 4에 규산소다의 종류를 표 5에서 규산소다 1호, 2호, 3호, 4호의 내용을 나타낸다.

표5. 규산나트륨

항목	종류	1호	2호	3호	메타규산나트륨	
					1종	2종
외관		물엿형의 무색 내지 다소 착색된 액체			백색분말 또는 과립형	백색결정
비 중(15℃, Bé)		-	54이상	40이상	-	-
이산화규소(SiO_2) (%)		35~38	34~36	28~38	27.5~9	19~22
산화나트륨(Na_2O) (%)		17~19	14~15	9~10	28.5~30	20~22
철 (Fe) (%)		0.03이하	0.03이하	0.02이하	-	-
물不溶分 (%)		0.2이하	0.2이하	0.2이하	-	-

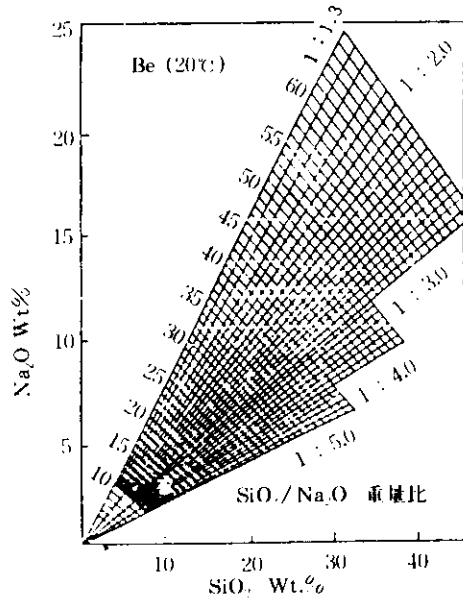


그림3. 규산소다용액의 성분-비중-중량비의 관계 (James G. Vail)

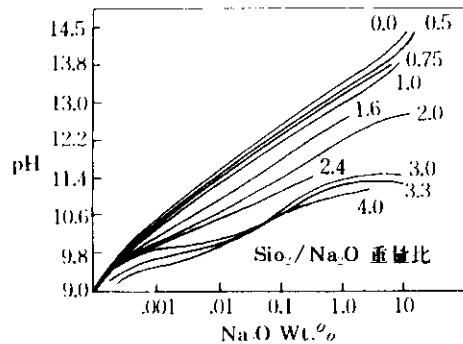


그림4. 규산소다수용액의 pH (James G. Vail)

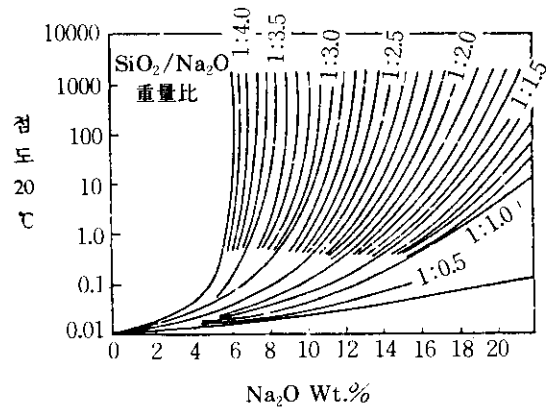


그림5. 규산소다수용액에 점도 (James G. Vail)

이 그림에 의해, 비중에서 간단히 성분의 개략적인 퍼센트를 알 수가 있다.

[몰비(n)와 중량비의 관계]

$$n = \text{중량비} \left(\frac{\text{SiO}_2}{\text{Na}_2\text{O}} \right) \times 1.032 \dots\dots\dots (1)$$

$t^\circ\text{C}$ 에서의 비중의 측정치(Bé $t^\circ\text{C}$)에서 20°C 에서의 비중(Bé 20°C)을 구하는 식 :

$$\text{Bé } 20^\circ\text{C} \doteq \text{Bé } t^\circ\text{C} + 0.041(t^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) \dots\dots\dots (2)$$

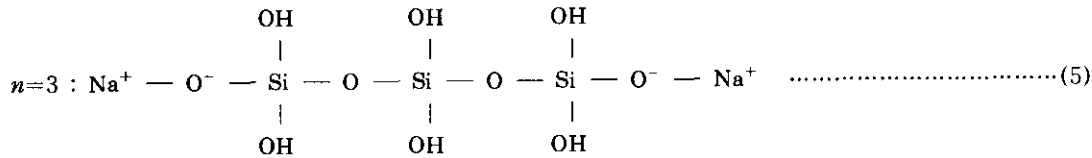
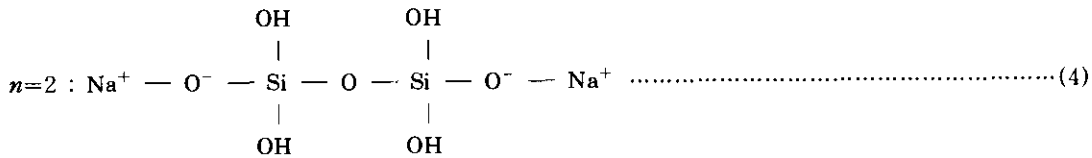
[비중(보메, Bé)과 비중(SG)와의 관계]

$$\text{비중(SG)} = \frac{144.3}{144.3 - \text{Bé}} \dots\dots\dots (3)$$

그림 4에 규산소다수용액의 pH를, 그림 5에 규산소다수용액점도를 나타낸다.

2) 물유리의 용액구조

물유리의 원액 그 자체는 대단히 고점성이므로 큰 중합도가 예상되었으나 Debye 등에 의해 물유리의 분자량은 수백정도임을 알게 되었다. Harman은 물비가 낮은 물유리는 Na^+ , SiO_3^{2-} 와 Na^+ , HSiO_3^- 의 일정한 형태의 염분으로 보다 높은 물비에 있어서는 이들의 염분과 실리카의 미셀이 공존한다고 하였다.



이 분자들 중의 OH기는 상호 수소결합이나 팬·델·윌스력으로 2차적 결합을 하도록 하지만 수화된 Na이온의 존재 때문에 분자의 접근은 방해되고 희석액으로는 용해해서 분리된 규산이온으로서 존재한다.

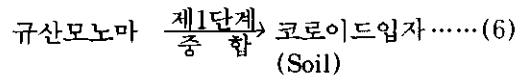
그런데 농후한 액체로는 분자의 자유도가 거의 없고 분자가 극도로 접근하고 있다. 이 때문에 Na이온에 의한 차폐효과가 없어지고 접근한 OH기 사이에 비교적 견고한 결합이 행해진다.

이때 고농도에서는 높은 점성을 나타낸다.

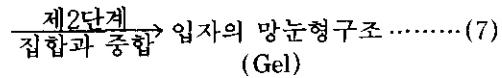
물유리 수용액은 일부 가수분해를 일으켜 그때 생기는 OH이온은 알칼리성을 나타낸다.

3) 물유리의 겔화원리

물유리의 겔화에 관해서는 오래전 부터 많은 연구를 해왔지만 결정적인 이론은 아직까지 불분명하며 Iler나 UKIHASHI의 연구에 의하면 물유리의 겔화는 다음과 같은 단계를 거쳐서 행하여진다.



이에 대해 UKIHASHI는 물유리중에 콜로이드실리카라는 Na와 관계없는 큰 입자를 고려하는 것이 타당하지 않다고 생각하여 물유리 분자는 본질적으로 작고 Si-O 결합의 사슬을 바탕으로 측면에 ONa기 또는 OH기가 있는 형태를 취하고 있다는 것을 나타내고 물유리 분자를 아래와 같이 나타내었다.



제1단계에서 규산모노마가 중합되어 고분자화 해서 코로이드 입자를 형성하고 제2단계에서는 이 입자들이 서로 集合·重疊하여 연속적인 구조를 조성하여 용매를 통해 확장해서 겔화에 이르게 된다.

즉, 제1단계에서 규산은 시라노르기(Si-OH)끼리 탈수해서 중합하고 시로키산결합(-Si-O-Si-)을 만들어 입자형의 1차 입자로 된다. 다음에 이 1차 입자끼리 집합해서 결합하고 코로이드 집합체를 형성한다. 이 집합체는 코로이드 2차 입자라고 부를 수 있지만 이것이 용액 전체로 확장해서 겔을 형성한다.

이러한 1차 입자의 결합 조치단계에는 입자는 아마도 수소결합에 의해 약하게 연결되었지만 규산콜로이드 표면이 시라노르기로 된다는 것을 고려한다면 시라노르기 사이에 축합이 일어나서 입자간에 시로키산 결합이 형성되는 결과, 입자끼리 견고하게 연결되어 3차원적 망상형의 겔을 만든다고 본다.(그림 6참조).

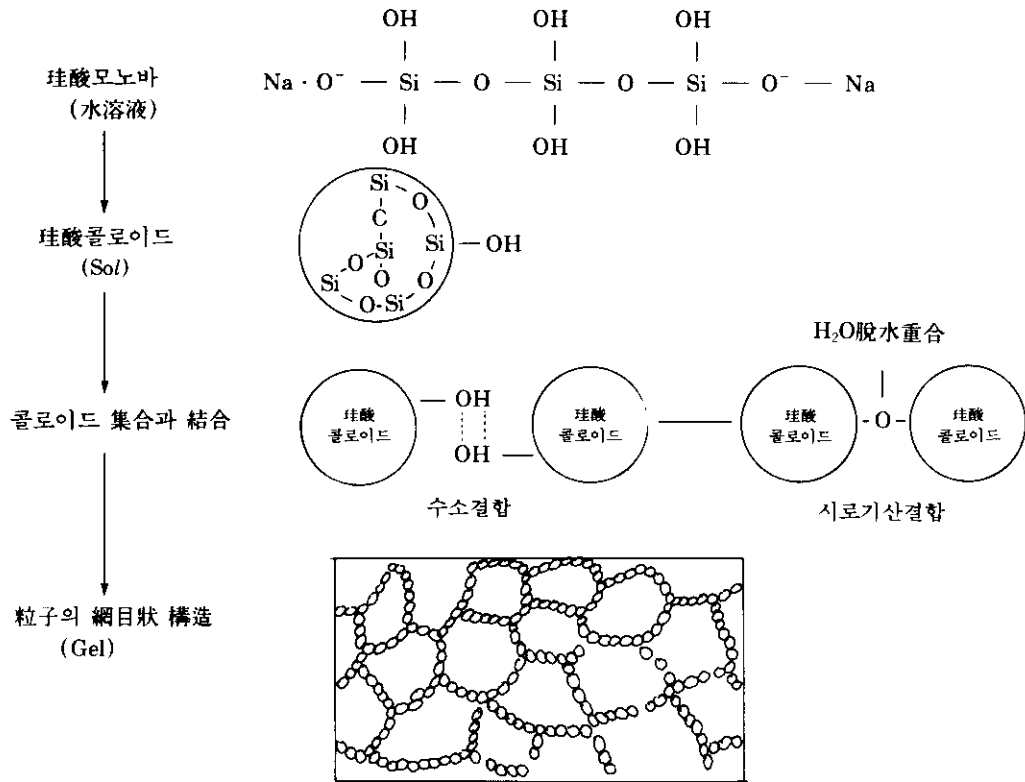


그림6. 물유리의 겔화과정(IIér)

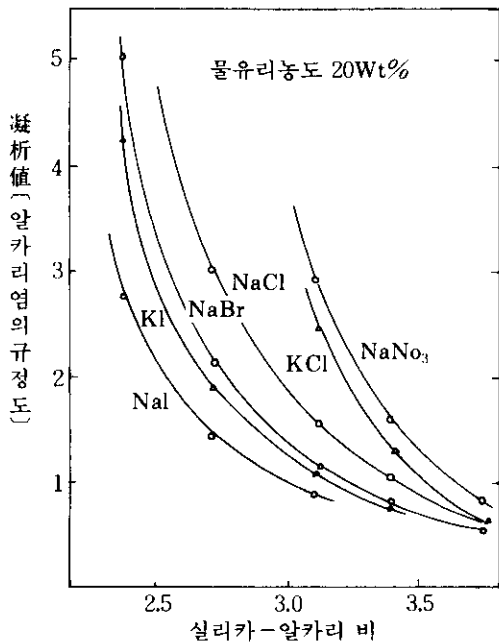


그림7. 물유리에 대한 알칼리염의 凝析値의 규소비에 의한 변화(UKIHASHI)

Carman에 의하면 규산입자의 等電點은 약 알칼리성 부근에 있으며 알칼리 용액에 있어서는 OH⁻이온을 흡착해서 음전하를 띠고 있다. 따라서 pH가 높을수록 전기적 반발력이 크고 응집되기 어려우며 반대로 산을 더하여 pH가 저하됨에 따라 전기적으로 중화되고 반발력이 적게 되어 응집되기가 쉽다. 이것이 물유리에 산을 더한 경우의 겔화의 원리이다. 또한, 물유리에 각종 염류를 더해도 응집된다. 이 경우에도 원리적으로는 산의 경우와 같다.

UKIHASHI에 의하면 물유리에 대한 전해질 작용은 다음과 같다.(그림 7)

물유리분자는 위에서 말한 바와 같이 표면에 OH기, ONa기를 갖고 이들은 화수되어 표면전위를 지니고 있으므로 전해질이 더해지면

- ① 전해질이 물과 친화함으로써 물유리 분자의 운동범위를 좁혀져서 물유리 농도가

증대되는 효과가 있다. 또한 OH기와 물이 친화되는 것은 물의 분자를 압축 또는 탈취하는 작용등으로 OH기 사이의 견인력이 강해지고 점도가 증대되어 OH기 사이의 탈수결합이 일어나기 쉽게 된다.

- ② 전해질의 첨가가 물유리의 표면전위를 저하시켜 분자간의 인력을 증대시켜서 탈수결합을 일으킨다.

12.2.3. 注入方式

약액의 주입방식에는 고결시간을 기준으로 Gel-time이 20분이상일때 쓰이게 되는 1 Shot System(1액1계통식, 1액1공정), 각각 다른 두 주입관을 나와 혼합되는 순간 고결화 할

경우의 2 Shot System(2액2계통식, 2액2공정) 그리고 Gel-time이 2~10분일 경우 사용하는 1.5 Shot System(2액1계통식, 2액1공정) 등 일반적으로 세가지 주입방식이 있으며, 경우에 따라서는 Semi 1 Shot System을 포함하여 네가지로 구분하기도 한다. 지하수의 유속이 크지 않을 때는 1 Shot System, 유속이 클 때나 용수·누수가 많을 경우는 2 Shot System이 사용되며 두 System의 중간 System인 1.5 Shot System은 간편하고 가장 보편적인 System으로서 이 방법이 많이 쓰이고 있다.

현재 국내외에서 실시되고 있는 약액의 주입 시공방법은 다음 표와 같다.

표6. 주입시공 방법

공법구분	공법명	Gel-time	주입방식
단관주입방식	· 룯드공법 · 스트레이나공법	-	길다.(15~60분)
2중관 주입방식	더블 픽커법	· 슬리브 공법 · 슬래탄수공법 · 더블스트레이나 공법 · LW공법	보통(3~10분)
	2중관 룯드법	· DDS 공법 · LAG 공법 · MT 공법 · SGR 공법	순결(3~10초) 완결(60~90초)
	특수 2중관공법	· 土研式 공법	30~60초
고압분사	그라우트 분사법	· CCP 공법 · JSP 공법 · Mini Max 공법	-
주입공법	그라우트·공기병용 분사기	· JSG공법 (JSP+JGP)	-
	물·공기·그라우트병용 분사법	· Jet Grout공법	-

12.3. 藥液의 土中에서의 暴動

12.3.1. 藥液의 暴動

약액의 주입의 가장 이상적인 형태는 침투주입이다. 그러나 실제 주입에서는 토중의 弱線이나 토층경계를 따라서 약액이 흠을 割裂하면서 들어 가게 되는 소위 脈狀注入으로 되기 쉽

다. 細砂보다 작은 입경을 갖는 세립토층에서는 맥상주입이 일반적 패턴이며 이러한 주입은 어떤 경우는 오히려 부작용이 생길 수도 있다. 할렬한다는 것은 주입압이 지반의 할렬저항압 이상으로 되기 때문이다. 즉 할렬주입은 지반을 주입압으로 할렬하여 소위 水壓破碎現象이

생기며 이때 할렬부분에 주입재가 들어감으로 인해 흙이 흐트러지는 것은 자명한 사실이다. 따라서 할렬주입에 의한 맥상부의 들어 가는 방향, 분포상태, Homogel 강도 등이 중요하다. 즉 주입재가 설계범위를 훨씬 넘어 주입되고 목적 범위에 그다지 주입되지 않은 경우는 개량 효과는 없고, 오히려 역 효과를 초래하게 된다. 그러나 최근에 瞬結性 주입재의 二重管 單相注込 등에 의해 상당히 효과를 높이는 예가 증가하고 있으며 할렬주입에 의한 지반개량 이론도 점차 확립되어가고 있다.

수압파쇄현상이란 과잉공극수압에 의하여 지반중에 생기는 파쇄현상으로서, 할렬현상이라고도 하는데 이러한 현상은 약액주입시 뿐만 아니라 항타 또는 Sand drain의 Casing타 실시 또는 현장투수시험시에 높은 주입압에 의하여도 발생한다. 필자는 최근 우리나라 지하철 공사현장에서 지중 약 12m지점에서 上向式 약액주입시공시에 수압파쇄현상에 의해 약 50여 cm의 地盤隆起 또는 국부지반파쇄현상을 목격한 바 있다. 이와 같은 수압파쇄현상은 특히 1976년 Teton Dam의 파괴 이후 세인의 많은 관심을 모으고 있으며 각국에서 현재 많은 연구가 진행중이다.

Maag의 이론에 의하면 실용적 주입속도로 할렬하지 않고 침투가 되기 위해서는 지반의 투수계수(대략 10^{-3} cm/sec이상일것), 주입압(할렬파괴가 생기지 않을 정도), 사용 주입재의 Gel-time(완결성일 것)등의 요건이 필요하다. 따라서 Gel-time이 길 경우는 침투주입이 될 요건이 된다. 또 주입재의 점성을 될 수 있는 한 작게 하는 것도 주입압 저항효과가 있기 때문에 이것 역시 한 요건이 될 수 있다. 그러나 용액형 물유리계 주입재는 점성이 최소 2-4cps이므로 물과 같은 1cps로 저하시키는 어렵다.

만일 주입압을 될 수 있는 한 작게하는 방법을 택한다 하더라도 그 주입압으로 할렬파괴가 생긴다면 흙의 할렬저항도 주 요인이 된다. 일반적으로 강도가 큰 洪積砂層쪽이 강도가 작은 沖積砂層보다 침투주입이 잘되는 경향이 있다.

할렬주입에 의해 발생하는 맥상의 Homogel 분포상태는 주입압, 주입방식 및 Gel-time에 따라 큰 차가 있다. 과대주입압으로서 Gel-time이 긴 경우는 일반적으로 주입재가 지반을 할렬하여 진행되는 거리가 길게 되고 멀리까지 散逸하여 맥상 Homogel의 분포밀도가 저하한다. 그리고 설계범위내의 잔류율은 매우 작다. 여기에 대하여 2중관 단상주입방식 등으로 Gel-time이 짧은 순결성주입재를 사용할 경우는 대개는 맥상 Homogel 분포밀도가 높고 설계범위내 잔류율도 크다. 이 경우도 주입압이 과대하면 할렬발생거리가 크게 되어 분포밀도를 저하시키는 결과가 된다.

할렬발생에 대해서는 대략 탄성해에 의해 수평할렬시와 연직할렬시 흙의 인장저항을 0으로 보아 $\sigma = 2\sigma_H + \sigma_V$ 일 때 할렬이 일어난다고 생각하고, 현장토질조건을 감안한 삼축압축시험에 의하여 초기 공극수압 u_0 와 주입압에 의한 새로운 공극수압 u_1 를 고려한 수정된 식 $\sigma = 2\sigma_H - (u_0 + u_1) + \sigma_V$ 이 바람직하다. 또한 주입압력이 γh 이상으로 행해질 경우에 할렬발생 가능성은 크다. Morgenstern등은 많은 실험을 바탕으로 수압파쇄개념을 도입하여 한계주입압력의 산출식을 제시한 바 있다.

모래지반과 점성토 지반의 할렬 발생 범위의 차이에 대해 Waseda 대학 森 麟교수는 모래지반은 투수성이 커서 할렬시 그 면이 주입재의 새로운 침투통로가 되며, 실용적 주입속도로서 침투주입이 될 수 있는 한계투수계수로서 $k = 10^{-9}$ cm/sce이다. 또 주입구 부근의 주입재의 침투면적을 A라 하면, k가 10^{-4} cm/sec인 경우 동일 주입속도로 주입하면 할렬면은 10A로 되며 할렬은 정지한다고 보았다. 즉 할렬면의 발생량은 k가 작을수록 Gel-time이 짧을수록 크게 되며 또 한개의 할렬선의 길이는 Gel-time이 짧을수록 작게 된다. 따라서 순결성주입재를 주입하면 짧은 할렬이 많게 되고 Gel-time이 길 경우는 할렬수가 작으나 그 길이는 길게 된다.

12.3.2. 浸透와 固結의 메카니즘

주입된 약액은 물유리의 예를 들면, 최초에는 저분자 용액이지만 시간이 경과함에 따라서 규산의 중합이 행해져서 고분자화 되고 콜로이드가 커지게 된다. 그리고 그 콜로이드 또는 겔화가 진행되고 있는 규산은 그림 8에서와 같이 최초 토립자의 여과작용에 의해 토립자와 토립자의 점점 부근에 침하하여 쌓이고 다시 토립자 표면을 규산층이 덮게된다.

최초에는 약액이 공극을 통과해서 침투되어 가지만 어떤 시점에서는 공극이 막히고 주입액이 지반에 침투하지 못하게되면 주입이 완료된다.

이와 같이 토립자의 접점을 중심으로 해서 토립자 표면을 덮은 규산겔은 1차 결합 또는 2차결합으로 견고한 규산층으로 되어 토립자 접점을 견고하게 고정하고 또한 연속된 막에 의해 토립자 끼리를 연결한다.

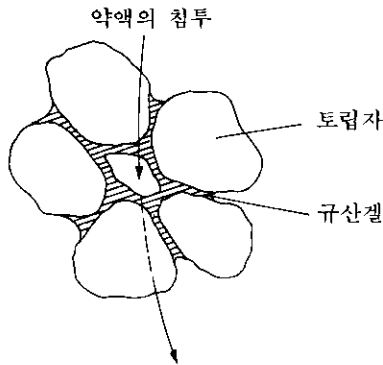


그림8. 토립자 공극에서의 약액의 침투와 규산겔에 의한 토립자 고결의 모형도

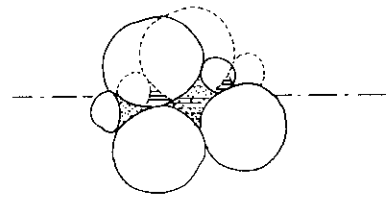
토립자 상호간의 규산에 의한 접착은 규산층에서 분자간의 응집력과 규산층 및 토립자 표면의 부착력으로 이루어진다. 이 가운데 규산층과 토립자 표면의 부착력은 사질토의 경우 반데르 바알스력(Van der Waal's force)이 수소결합등에 의한 2차결합이 주체가 된다.

토립자가 세립화 되고 점토분이 많아짐에 따라 토립자 표면의 界面活性가 증대하고 점토광물의 분극성, 철의 遊離, 알루미늄의 중대 등으로 규산겔에 의한 고결효과가 증대되지만, 점토분이 많아짐에 따라 약액의 입자간의 침투는

불충분해지므로 전체의 균질한 고결효과는 감소한다. 이와 같은 토립자와 약액의 상호작용에 의해 약액 주입전 모래의 전단강도가 입자 상호간의 접촉이나 맞물림에 의한 마찰로 생긴 요소가 주된 것이었으나, 약액주입후의 모래의 전단강도는 이 마찰로 인한 요소 외에 규산층 토립자간의 고결로 인한 점착력의 요소가 추가되었다고 생각할 수 있다.

약액주입에 의한 지반의 개량은 지반의 상황이나 사용하는 약액에 의해 주입상황이나 다르게 되며, 脈狀이나 침투 또는 여러 가지가 복합된 상황을 나타내고, 그렇게 해서 얻어진 결과는 단순하지가 않다. 그러나 복합주입이 이상적으로 행해진 경우등을 생각한다면 맥상부분에는 현탁액 또는 瞬結性的의 비교적 강도 높은 약액이 주입되고 침투부분은 그렇지 않은 약액이 사용될 때가 많으므로 일반적으로 개량후 지반의 성질은 침투부분의 성질에 의해 좌우될 때가 많다고 본다.

침투주입된 물유리계 약액의 겔은 공극을 충전함으로써 사질토를 고결하며 그것은 그림 9의 상태와 같다. 따라서 공극이 모두 안정된 겔로 충전되면 차수성이 되고 강도도 상당히 개선되며 변형에 대한 저항도 커지게 된다.



(실선에서 파선으로 입자가 이동했을 때의 간극의 변형)

그림9. 공극에 충전된 겔

Graf등의 조사에 의하면 겔과 모래입자 사이의 점착력 자체는 그다지 큰 것이 아니란 것을 알 수 있으며, 따라서 물유리계 약액의 침투주입에 의한 지반의 개량은 공극을 겔로 충전하는 것으로서 여기에 전단변형을 가하면 간극부분의 변형이 현저하다. 결과적으로 모래에 물유리계 약액을 주입해서 고결한 샘플 및 주

입에 의한 강도증가의 특성은 내부마찰각에 대해서는 거의 변화되지 않고 점착력만이 증가한다는 것은 많은 연구 실험에 의해 밝혀졌다.

Krizek는 불유리에 반응제로서 에틸아세테이트와 홀무아미드를 이용한 약액을 모래에 주입해서 얻어진 고결토의 강도시험을 하였다. 그리고 전단강도에 영향을 미치는 점착력 성분과 내부마찰력 성분을 변위에 따라 어떻게 작용하는가를 조사했으며 그 결과의 예를 나타낸 것이 그림 10이다.

어떠한 경우라도 전단변위 초기단계에서 점착력이 작용하고 그것이 작은 변위에서 피크에 이른 후 급속히 감소되며 내부마찰각은 변위에 따라 서서히 증대하는 것을 나타내고 있다.

결국 고결사의 강도는 젤의 강도와 비표면적에 좌우된다고 생각되며 Caron은 젤의 강도와 고결사의 강도에 대하여 아래와 같이 보고하였다.

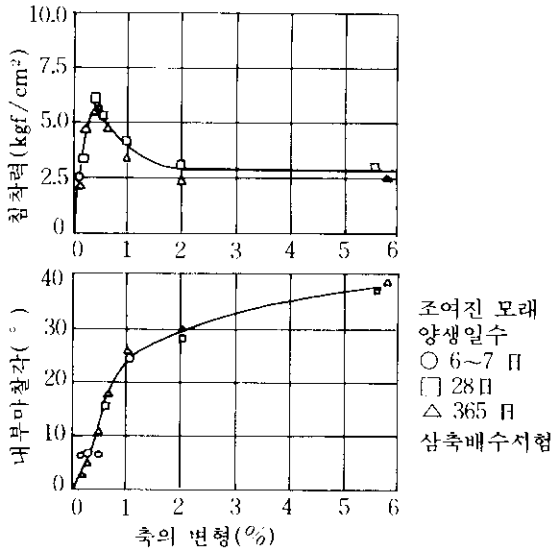


그림 10. 고결토의 축변형과 점착력·내부마찰각의 관계(Krizek 등에 의한)

$$R = k \cdot \frac{c - 10}{1 + bt} \dots\dots\dots (8)$$

여기서,

R : 젤의 전단강도(g/cm²)

c : 혼합물 1당의 SiO₂의 그램수로 나타낸 농도

t : 응고시간(분)

k 및 b : 반응제의 성질에 따른 정수

완전히 젤로 포화된 모래의 강도는 다음 식에서 모래 입도에 비례하는 것을 알 수 있다.

$$RS = RG(1 + k\sqrt{S}) \dots\dots\dots (9)$$

여기서,

RS : 주입모래의 일축압축강도(kg/cm²)

RG : 호모젤의 일축압축강도(kg/cm²)

S : 모래의 비표면적(cm⁻¹)

k : 젤강도에 좌우되며 거의 젤강도의 평방근에 역비례하는 계수이며 다음과 같이 된다.

$$RS = RG(1 + 0.33\sqrt{S/RG})$$

$$\text{또는 } RS = RG + 0.33\sqrt{SRG}$$

12.4. 遮水工의 設計·施工

12.4.1. 適用順序

차수목적의 약액주입의 흐름도 및 순서는 그림 11 및 표 7과 같다.

12.4.2. 設計를 위한 事前調査

약액주입공법 채용에 있어서 사전에 조사해야 할 내용은 다음과 같다.

- 지반조사
- 지하매설물 조사
- 지하수위조사

이 중, 주입설계를 위해서는 충분한 지반조사가 필요하지만, 상당한 비용을 들여서라도 주입지반 전체에 대해 상세한 토층의 변화나 간극수의 상황등을 확실하게 파악하기는 어렵다. 따라서, 지반주입에서는 주입작업의 과정에서 상대지반의 반응을 주의깊게 읽고, 그에 따라 주입 계획을 수정해 가는 것이 중요하다.

계획설계에 필요하다고 생각되는 조사와 시험항목을 종합하면 표 8과 같다.

12.4.3. 注入材의 選定과 調査

약액주입의 적용이 필요하다고 판단될 경우, 주입공법과 그에 적합한 주입재를 선정한다.

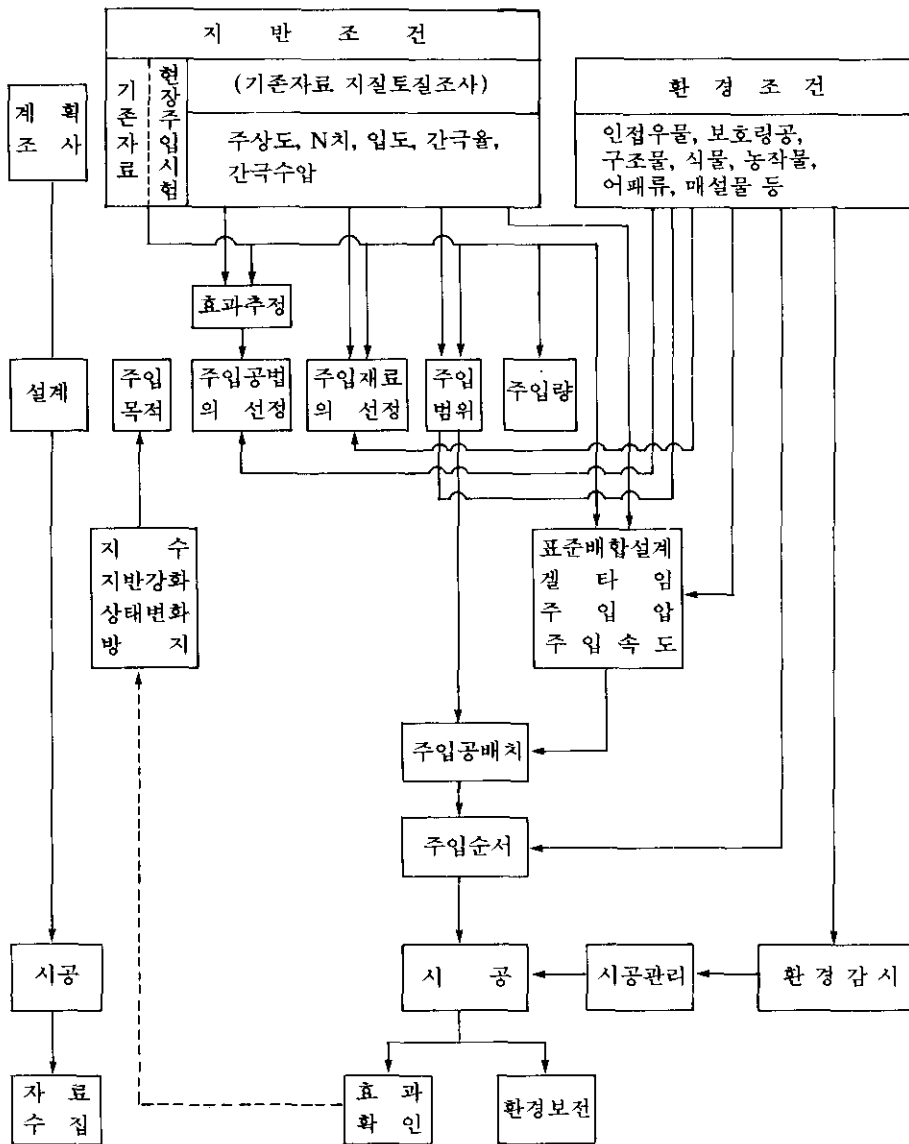


그림 11. 약액주입의 흐름도

표 7. 약액주입의 순서

(1) 주 입 목 적 파 악	A 본체공사 시공에서의 안전성, 용이성을 위한 보조적 수단인지? 개착식굴착에서의 파이핑이나 히빙의 방지와 차수, 인접기초의 보강과 침하방지 널말뚝 배면토사의 안정과 차수, 지하매설물의 보호.
	설드공사, 터널공사에서의 막장의 안정과 차수, 지표면의 침하방지 등 토목구조물의 일부로서 강도적·수리적 개량으로 사용하는지? (댐이나 제방의 차수벽, 구조물 기초의 지지력 증가, 토압경감, 수리구조물의 차수)
	B 차수인지, 지반강화인지 아니면 둘 다인지? C 공동충전인지, 암반균열충전인지, 토립자간의 간극충전인지, 연약층의 백상주입인지?

D 주입이 본체공사에 어느 정도의 중요성을 지니고 있는지, 주입효과로서 어느 정도의 완전성을 요구하고 있는지?		
(2) 주 입 전 의 조 사 및 시 험	토질조사	사운드링 ¹⁾ 토질조건에 따라 표준관입시험, 동적원추시험, 네덜란드식 관입시험, 스웨덴식 사운드링, 포터블콘관입시험, 벤시험, 익스미터 시험등을 이용해서 토질 및 지반강도의 개요를 파악하고 주상도를 작성한다.
	물리탐사 ²⁾	주입목적, 지반조건에 따라 전기탐사법, 지반탐사법, 방사능 탐사법
	지내력시험 ³⁾	지반재하시험, 공내재하시험
	샘플링 ⁴⁾	「호트러트리진 시료」 또는 「호트러트리진지 않은 시료」의 채취, 지반조건 및 시험목적에 따라 핸드오거, 코어튜브, 신원샘플러, 데니스형 샘플러, 콤포제트샘플러, 포일샘플러 등을 적절히 사용한다.
	투수시험	주입목적, 지반조건에 따라 투수시험, 수위회복시험, 양수시험 등을 한다. 또한, 동시에 각 토층 및 경계층에 있어서 주수압, 주수량의 관계를 조사하고, 주입시의 참고로 하며, 공극 상황을 파악한다.
	지하수의 조사	수위, 수온, 유속, pH, 수질 등을 조사하고, 주입재의 고결에 대한 화학적 영향 및 침투방향에의 영향, 주위의 수리에 대한 영향을 조사한다.
	흙의 물리 및 역학시험 ⁵⁾	물리시험 : 토립자 비율, 함수비, 밀도, 간극비, 포함도, 콘시스턴스, 투수시험, 입도시험 역학시험 : 일축압축시험, 삼축압축시험, 일면전단시험, 압축시험
	흙과 물의 화학시험	pH시험, 유기물함량시험, 염류함량시험, 이미 주입되어 있는 주입재의 종류와 성질이 약액의 고결효과에 미치는 영향을 조사한다.
	그라우트 재료의 시험	약액의 시험 실내기본시험 ⁶⁾ : 점성, pH, 농도, 비중, 액은과 겔화시간의 관계 및 겔화시간의 콘트롤 시험 현장조건에 맞춘 응용시험 : 온도(수온, 기온), 지하수, 사용수, 적용농도에 대응한 겔화시간과 고결시험, 현장의 채취토에 의한 고결시험
	겔의 시험 ⁶⁾	팽창수축시험, 내구시험, 압축강도시험, 전단시험, 겔의 압축저항시험
실내시험	표준사고결시험	물드중에 표준사의 밀도를 바꾸어 고결한다. 강도시험과 투수시험을 한다.
	현장시료에의 주입시험 ⁷⁾	현장의 흙을 이용해서, N치에서 추정된 밀도가 되도록 물드에 매꾸어 위에서와 같은 시험을 한다.
현장주입 시험 ⁸⁾	본공사에 앞서, 주입관의 종류, 매설공법, 주입공의 간격, 약액의 종류, 농도, 겔화시간, 주입압, 주입량, 침투범위, 고결효과, 투수성 개량도를 관련 토층마다 확인해서 본시공의 최종적 주입계획을 결정하고 본시공 때에 참고한다. 조사방법은 주입 전후의 사운드링, 투수시험, 굴착에 의한 침투고결조사, 굴착채취시료의 투수시험, 강도시험 등이지만 굴착조사가 불가능할 경우에는 물리탐사, 지내력시험, 샘플링 등도 병용한다.	
주입재의 선정	지반상황, 주입목적, 주입공법에 따라 정한다.	
주입 공법의 선정	주입목적, 현장조건, 토질조사, 환경조건에 따라 결정한다.	

(3)	고결범위의 결정	고결체의 강도 특성에 의해, 설계수치를 정하고 토질역학적 방법에 의해 안정계산을 하고 고결범위를 정한다.		
	설계	주입설계	주입공의 배치	단열배치, 복열배치 등 주위범위나 주입의 중요도에 따라 결정한다. 주입공의 간격은 토질조건, 겔화시간, 침투성 등으로 결정하고 체크보링이나 투수시험 등으로 확인한다.
		주입량의 결정	고결범위, 간극률, 간극전충률로 정하지만 응급 지수나 맥상주입의 경우 그의 추정은 대단히 곤란하다.	
		겔화시간의 결정	시험 및 현장주입시험을 참고로 한다. 사용수, 지하수 및 흙의 화학성, 병용하는 주입재, 사용기계의 재질, 주입방식 등도 고려한다.	
		허용최대주입 압력의 결정 ⁹⁾	일반적으로는 토피압에 상부구조물의 무게를 가한 것을 고려하고 있다.	
		주입순서의 결정	평면적으로 혹은 단면적으로 충분히 조밀하게 되도록 주입공의 순서와 스텝의 순서를 정한다.	
	주입장치의 선정	주입관 설치방법	지반상황, 주입관의 종류에 따라 보링법, 타입법, 제팅법중 하나를 결정한다.	
		보링기계	지반상황, 천공깊이에 따라 사용기계를 선정한다.	
		그라우트 펌프	지반상황, 주입목적, 사용약액, 사용배합에 적합한 형식, 토출량, 토출압이 있고 유량조정이 용이한 펌프를 선정한다.	
		그라우트 믹서	믹서의 용량은 토출속도, 배합소요시간에 따라 결정된다. 교반장치의 유무는 주입재의 종류와 배합으로 정한다.	
계측기		사용하는 주입재, 압력, 유량에 적합한 것을 이용, 압력-유량콘트를 하기 쉬운 것이 좋고, 가능하면 자기기록계가 있는 것이 바람직하다.		
(4)	주입설계에 준해서 하지만 시공진행과 함께 효과적인 체크를 병행하고, 현장의 실상에 따라 계획변경사공을 하여 효과의 만전을 기한다. 더욱이 수질검사 기타 환경관리에 관해 건설부의 기준에 따라서 한다.			
(5)	주입범위와 주입상태의 조사	굴착에 의해 육안으로 확인하는 것이 가장 좋지만 보통 그것은 불가능하기 때문에 샘플링, 사운딩, 투수시험, 탄성파탐사법, 방사능탐사법, 전기탐사법 등을 사용한다. 주입재의 성질, 지반조건, 주입목적, 주입의 중요성에 따라 최적의 방법을 사용한다.		
	주입효과의 조사	지반의 강도증가 상황조사	시험굴착 또는 샘플링으로 채취시료에 의한 강도시험, 사운딩, 공내재하시험, 지반재하시험 등에 의한다.	
		지수효과의 조사	투수시험 : 투수시험 수위회복시험, 양수시험등 시공목적에 따라 선정한다. 누수시험 : 주입 전후의 누수 경로, 누수계의 변화를 조사한다.	
검토	지반 및 구조물의 변형조사	지반변형	지반의 상하방향, 수평방향변화, 균열의 발생 등을 조사한다. 레벨측량, 트랜시트 측량, 크리노미터 등을 이용한다.	
		지하수의 변화, 구조물의 변형	우물의 수위변화, 간극수압 등을 측정한다. 균열의 발생, 상하방향, 수평방향의 변위에 대한 주입 전후의 레벨측량, 트랜시트측량, 크리노미터측량 등에 의해 확인한다.	

- (주) 1) 일반적으로 표준관입시험이 대부분이지만 주입 전후의 효과를 비교할 목적으로 과연 이와 같은 동적시험이 최적인지의 여부에 관해서는 검토의 여지가 있다.
- 2) 어디까지나 주입 전후의 비교검토로서, 보이지 않는 지중의 상태를 지표면에서 정확히 파악할 수 있는 방법은 현상대로는 곤란하다.
- 3) 특히 맥상주입에서는 국부적인 시험에서 그 효과를 파악하기 어려우므로 전체적인 효과를 파악하기 쉬운 조사법의 채용이 필요하다.
- 4) 주입지반은 일반적으로 사질토이므로 불교란 시료의 채취는 곤란하다.
- 5) 일반적으로 사질지반으로 인해 시험이 가능한 항목은 당연히 한정된다.
- 6) 가설공사용의 경우, 겔의 수축, 시네리시스가 주입재의 성능을 좌우하는 결정적인 요소는 될 수 없다. 왜냐하면 주입된 실제 지반에서는 겔은 대단히 넓은 표면에 흡착되어 겔의 운동은 비이커

속의 거동과는 전혀 다르기 때문이다.

- 7) 물드에 의한 모형주입에서 침투불능한 토질이라도 현장에서는 주입효과가 있을 수 있으므로 주의가 필요하다. 왜냐하면 현장의 자연상태에서는 땅 속에 있는 무수한 약점을 통해 주입재가 침투되어 전체적으로 고결한 가능성이 있기 때문이다.
- 8) 종래, 경험과 공학적 설계법의 병용에 의한다.
- 9) 토사와 암반의 경우가 다르며, 또한 주입이 진행되고 지반이 강화되어감에 따라 주입상압도 높아진다.

표8. 약액주입의 계획·설계에 필요한 항목

항 목	내 역	주입목적 토질구분	지반강화주입		
			차수주입 사질토	사질토	점성토
조사보링	토질주상도 표준관입시험 간극수압측정		○	○	○
			○	○	○
			○	○	○
사운딩	네덜란드식 이중관콘	○	○	○	
샘플링	관입시험에 의한 샘플링 신월샘플링		○	○	○
			○	○	○
현장투수시험	보링공 내에서의 투수시험		○		
불리시험	토립자비중 자연함수비 밀도 간극비 입도분석 콘시스템시		○	○	○
			○	○	○
			○	○	○
			○	○	○
			○	○	○
					○
역학시험	일축압축 삼축압축			○	○
				○	○
화학시험	pH		○	○	

즉 표 9에서와 같이 주입목적, 지반조건, 환경조건을 고려해서 어떤 종류의 공법이 적절한가 그리고 어떤 주입재를 조합한 것인지를 검토한다.

1) 주입공법의 침투·고결에 관한 기본적인 파악

주입공법의 선정에 있어서 가장 중요한 것은 주입공법의 기본원리, 침투와 고결의 거동에 대한 인식이다. 이것이 없으면 적절한 공법선정을 할 수 없다.

2) 주입개량지반의 품질검토

약액주입공법의 적용은 모래층의 일체 고결화를 목표로 한 개량에서 부터 점성토를 대상으로 하는 맥상경화물의 형성까지 광범위하게

걸쳐 있다.

3) 각종 주입공법의 특성과약

단관 뒫트주입공법, 스트레이너 공법, 이중관 뒫트 복합주입공법, 이중관 더블팩커공법등 각 공법의 사용약액, 주입방법, 주입설비, 토층적성, 개량효과 등의 특성을 파악하여야 한다 (표 10참조)

4) 주입재의 선정과 공법의 조합

주입재 선정에 있어서 고려해야 할 요건으로서 주입목적, 지반조건, 주입공법 등을 검토한 후에, 이들의 조건에 적합한 특성을 지니고 있는 주입재를 선정한다. 주입재 선정에 있어서는 주입재 종류에 따라 농도, 배합, 반응재,

표 9. 주입공법과 주입재 선정에 있어서 고려해야 할 항목

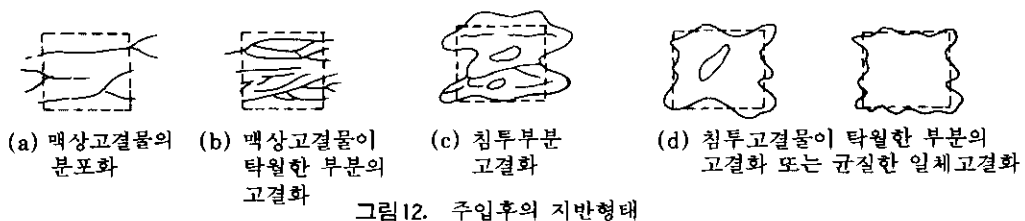
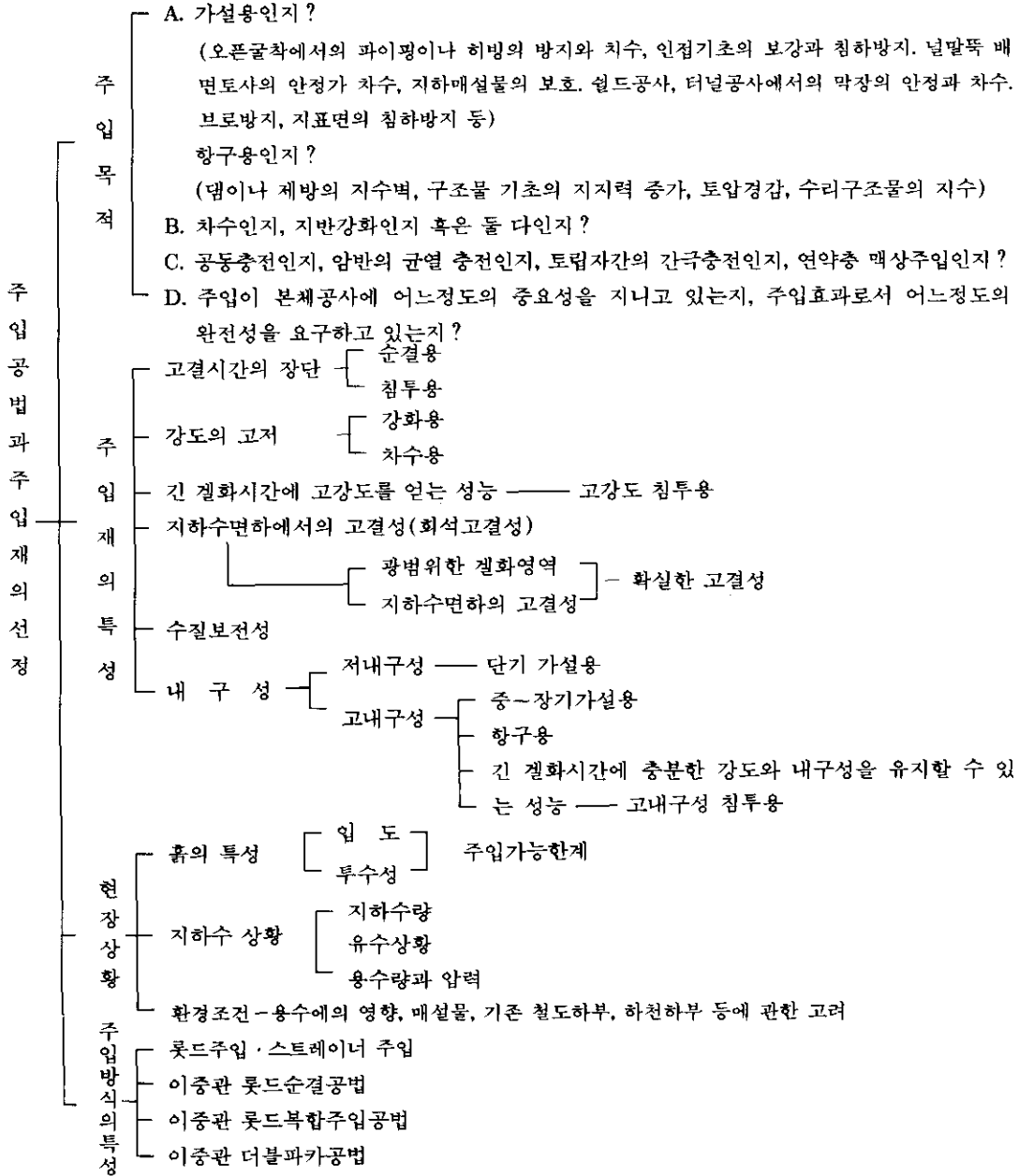


표 10. 각종 주입공법의 특성과 주입재 조합의 구체적인 예

표준적인 공법분류	단관로트주입공법	이중관로트주입공법	이중관로트 복합주입공법				이중관 더블패커 주입공법
			유니패공법	멀티라이저공법			
사 용 약 액	원탁·용액 2액등량혼합 1~3분	원탁·용액 2액등량혼합 30초 이상	1차주입 용액 또는 원탁 2액등량혼합 20초 이하	2차주입 용액 2액등량혼합 1~30분	1차주입 용액 또는 원탁 2액 혼합 10초이하	2차주입 용액 1액 혼합 30분이하	1차주입 원탁(CB) 1액 혼합 - 5~60분
패 키 수 단	주입액의 겹화 (1~3분)	주입액의 겹화 (순결)	주입액의 겹화(순결)				더블패커
주 입 방 식	15샷트	20샷트	20샷트	15샷트 또는 20샷트	20샷트	10샷트	10샷트
주 입 스 텝	50~100mm	10~50cm 또는 회전인상	10~50cm	25~30cm	스텝	스텝 또는 50cm	스텝 또는 50cm
주 입 순 서	스텝 또는 스텝다운	스텝	스텝 또는 스텝다운	스텝	스텝	스텝 또는 스텝다운	스텝 또는 스텝다운
주 입 속 도	20~30l/min	8~20l/min	8~16l/min	8~16l/min	다소 낮다	10~20l/min	5~15l/min
주 입 압 력	통상	다소 높다	다소 낮다	다소 낮다	다소 낮다	다소 높다	다소 낮다
로 트 지 름 보 통 보 링 로 트	보 통 보 링 로 트 드	특수 이중관 로트 40.5mm	특수 이중관 로트 40.5mm	특수 이중관 로트 40.5mm	특수 이중관 로트 40.5mm	외경 73~110mm 내경 33.5mm	외관(염화비닐)내경 40mm 내관(로트) 외경 33.5mm
주 입 기 구	로트선단주입	특수모니터(가로방향 주입)	유니패모니터(선단또는가로방향주입)	멀티라이저모니터(가로방향주입)	멀티라이저모니터(가로방향주입)	외경 73~110mm 내경 33.5mm	더블패커부 내관의 삽입
주 입 관 치 법	관 치 법	소형 보링기 ~중형 보링기 천공	소형 보링기 ~중형 보링기 천공	소형 보링기 ~중형 보링기 천공	소형 보링기 ~중형 보링기 천공	중형 보링기천공 (TFS크라스)	내관조작 적
도 중 적 성	침 투 주 입 조사, 시력층에 비교적효과 단일 주입재 때문에 어렵다	일반적으로 균일한 사질토	일반적으로 균일한 사질토	세사~조사가 최적	세사~조사가 최적	미세사~시질	~사력층과 적용범위는 넓다.
점 성 도	점 성 도 백상주입(암일효과)	순결주입을 이용하기 때문에 특히 암일효과가 크다.	순결주입을 이용하기 때문에 특히 암일효과가 크다.	부합주입을 위해 최적	부합주입을 위해 최적	부합주입을 위해 최적	부합주입을 위해 최적
개 량 효 과	주입효과를 얻기 위해서는 고도 기술이 필요하다.	약한 실트, 점토질이나 느 순한 사질토에서는 효과적 이다.	약한 실트, 점토질이나 느 순한 사질토에서는 효과적 이다.	부합주입이 가능하므로 로트를 이용하는 주입공법중 신뢰성이 가장 높다.	부합주입이 가능하므로 로트를 이용하는 주입공법중 신뢰성이 가장 높다.	입밀효과에 값싼 CB를 이용할 수 있다. 입의 위치에서 복합주입과 반복주입이 가능하며 신뢰성이 주입공법중 가장 높다.	입의 위치에서 복합주입과 반복주입이 가능하며 신뢰성이 주입공법중 가장 높다.

강도, 내구성 등이 다르므로 적용성의 일반적 경향을 알아 둘 필요가 있다. 또한 차수·지반강화 등 주입목적에 의한 검토, 지반에의 침투성에 의한 검토, 내구성 면에서의 검토, 지하수면 하부의 고결성 및 환경보존 면에서의 검토 등을 거쳐 현지여건에 적합한 주입재 선정을 물론 적절한 주입공법을 적용하여야 한다.

12.4.4. 注入範圍

1) 개착식에서 차수벽의 소요두께(약액주입폭, 주입열수)

약액주입폭은 개착구간에서는 토류공 배면에 연직으로 형성되는 어느 소요의 두께 t로서 차수벽을, 그리고 터널에서는 Terzaghi의 이완토압에 의한 범위로서 정하거나, 시험주입 또는 투수시험등 실험적방법에 의한 차수효과 판정으로 주입폭을 정하는 것이 일반적이다. 여기에서는 전자의 경우 즉, 토류벽 배면 약액주입폭을 결정하기 위해서는 먼저 약액주입의 목적이 지반강화인지 차수인지를 알아야 한다. 또한 토류벽의 종류(투수성인지 또는 차수성인지), 토류공의 형식(순수 토류벽인가 옹벽인가에 따라 적용 토압공식이 다름)에 따라서도 그 해석방법이 달라진다.

(1) 주입목적이 지반강화인 경우

주입목적이 지반강화인 경우는 일반적으로 가) 토류벽 배면토의 활동력(활동면상부의 흙중량)에 대하여 개량지반의 전단강도를 그저항력으로 보아 결정하는 방법과 나) 토류벽에 작용하는 수평토압(수압 및 토압)에 의한 전단력과 이에 저항하는 고결토의 전단강도를 비교하는 개념으로 정하는 것이 일반적이다.

(2) 주입목적이 차수인 경우

한편 약액주입의 목적이 차수인 경우는 토류벽의 종류, 배면지반의 토성 및 주입공법 등에 따라서 달라진다. 즉, 기 설계된 토류벽 자체의 차수정도(토류판인가, 지하연속벽인가, 강시판인가등), 배면지반의 투수계수, 그리고 인접구조물의 노후정도, 중요도등에 따라서도 달라진다. 또한 토류공 본래의 목적, 시공상태 및 차

수의 요구정도 주입공법 및 사용주입재의 특성 등에 따라 다르다. 아직까지 차수벽두께 결정을 위한 공식화된 계산식은 없고 이상과 같은 요소를 고려하여 경험적으로 정하고 있다.

토류벽 배면토의 수평압(토압 및 수압)은 실제적으로 토류판이 받게 되는 바 차수벽의 역할은 마치 토류판 뒤에 끼워놓은 비닐시이트와 같은 것이다. 따라서 기존토류벽은 차수벽과 일체로 보아야 하며 토류벽의 역할은 차수벽이 붕괴되지 않도록 현상유지시켜 주기 위한 지지구조체로 보아야 할 것이다. 토류공의 시공성을 감안하면 토류판을 끼울 때까지의 단시간 동안의 토압은 차수벽이 받게 되며 또한 토사, 물등의 유출을 막는 역할을 하는 것이다. 차수벽의 설치목적은 결국 원 지반의 투수계수 k를 최소화 시켜 주기 위한 것이므로 주입폭을 크게 한다는 것은(주입열수를 늘릴수록) 마치 종이 sheet 매수를 증가시켜주는 것과 같아서 차수효과는 그만큼 커지게 되는 것이다. 지하수 깊이가 깊어질수록 즉, 수평압(지하수압)이 커질수록 지반의 투수계수는 커지므로 이에 저항하기 위해서는 sheet 1장만으로는 어려우므로 sheet를 여러 장으로 해 줄 필요가 있는 것이다.

약액주입이란 불균질한 복합토층을 대상으로 하기 때문에 아무리 우수한 주입시공을 한다 하여도 주입고결상태 역시 불규칙하여 토층 전체가 1장의 고무판을 설치하는 것과 같이 완벽한 차수효과를 기대할 수는 없는 것이므로 따라서 주입폭 t의 결정시에는 이러한 주입시공상의 여건(문제점)을 고려하여 안전율을 충분히 해주지 않으면 소기의 차수효과를 기대할 수 없는 것이다.

2) 터널에서 주입범위

터널을 굴착하는 경우 천단부의 이완부위를 Terzaghi의 이완토압식으로 구할 수 있다.

그림 13에서

$$h = \frac{D}{2} \{1 + \sin(45^\circ - \varphi/2)\} \dots\dots\dots (10)$$

$$B_0 = D \cos(45^\circ - \varphi/2) \dots\dots\dots (11)$$

$$B = B_0 + 2h \cdot \tan(45^\circ - \varphi/2) \dots\dots\dots (12)$$

표 11. 차수벽의 두께

배면지반의 성질 토류공 종류	투수성이 매우 크다 ($k > 10^{-1}$ cm/sec)	투수성 보통 ($k = 10^{-1} \sim 10^{-2}$ cm/sec)	투수성은 작으며 연약하다 ($k < 10^{-3}$ cm/sec)	비 고
H-Pile + 토류판	2.0~3.0m	1.5~2.0m	1.5m	목적하는 차수정도와 약액종류에 따라 증감
주열식말뚝	1.0~1.5m	1.0m	1.0m	말뚝의 시공정도에 따라 차가 있다.
강 시 판	1.0m	0.8~1.0m	0.8~1.0m	침하방지의 목적이 주이다.

$$h_0 = \frac{B}{2K \cdot \tan\phi} \{1 - \exp(-2K \cdot \tan\phi \cdot H/B)\} \dots\dots\dots (13)$$

여기서,

- B : 이완폭(m)
- ϕ : 내부마찰각(°)
- h_0 : 이완높이(m)
- H : 토 피(m)
- h : 활동면의 높이(m)
- K : 토압계수(≈ 1)
- γ : 흙의 단위중량(t/m^3)

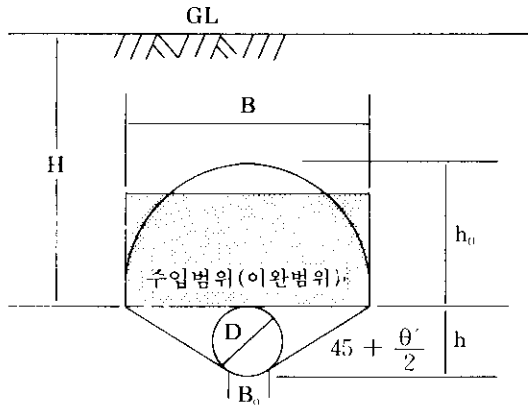


그림 13.

천단부에 작용하는 이완토압(P₀)은 흙의 중량에서 점착력(C)의 영향을 고려하여 다음과 같이 계산한다.

$$P_0 = h_0(\gamma - 2C/B) = \frac{B(\gamma - 2C/B)}{2K \cdot \tan\phi} \{1 - \exp(-2K \cdot \tan\phi \cdot H/B)\} \dots\dots\dots (14)$$

12.4.5. 藥液의 耐久性 問題

약액주입공법의 문제점 중의 하나는 내구성으로서 공사기간동안 약액의 안정성이 유지되

지 않으면 공사의 안정에 직접적인 문제가 발생 될 수 있다. 그러나 일반적으로 약액의 내구성에 관한 개념이나 평가는 불분명한 실정이다.

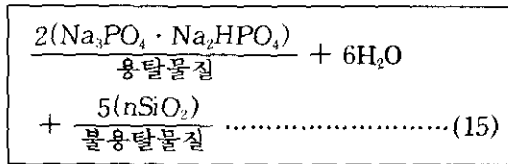
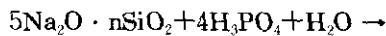
所 武産 등에 의하면 예를 들어, 알카리계 용액형, 무기·유기 물유리계 약액의 일축강도가 재령 2~3년 내에 50% 전후가 감소하며, 투수계수가 주입율에 따라 1개월 전후에 10²~10³ 배로 증가하는가 하면, 중성실리카졸은 10⁻¹배 전후로 감소하는 등 오히려 정반대의 효과를 나타내고 있는 경우도 있다. 檜壇 등에 의하면 약액주입 고결토의 1년후 일축압축강도는 초기 강도의 약 50~70% 정도로 저하되며 흙의 종류, 주입재, 재령 등에 따라 달라짐을 밝힌 바 있다.

이와 같이 압축강도가 저하하고 투수계수가 커지는 것은 지하수에 의한 약액의 희석과 용탈에 주된 원인이 있는 것으로서 희석은 토립자 주위의 자유수 및 흡착수와 혼합되어 주입재의 농도가 떨어지고 Gel-time이 늦어져 약액의 고결을 저해하기 때문이다. 약액의 용탈은 용액중의 용질이 점차로 용매로 이동하여 가는 등 농도가 진한 곳에서 옅은 곳으로 이동하기 때문이다.

溶脫現象이란? 일반적으로 비전해질용액에 있어서는 溶媒와 溶液(녹는것을 溶質이라 하고, 여기에서는 고결한 겔화물을 뜻한다.) 이 相接하고 있으면, 溶液中(겔화물 또는 고결물)의 溶質은 점차 溶媒쪽으로 이동하여 가서 마지막으로는 같은 농도로 된다. 이와 같이 농도가 다른 경우에 용질이 진한 쪽으로부터 옅은 쪽으로 이동하여가는 현상을 擴散이라 하며 이 擴散現象을 겔화물로부터의 溶脫現象이라 한다.

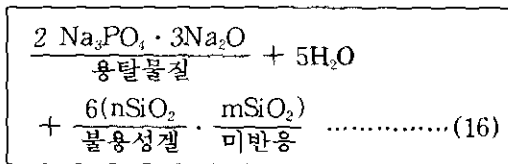
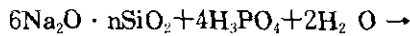
물유리계약액의 용탈물질은 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, NaOH , Na_3PO_4 가 대부분이다. 물유리계 약액은 경화제의 종류에 따라 반응형태가 달라지기 때문에 경화물은 양생조건에 따라 내구성이 크게 달라진다. 또한 약액의 표준양생방법이 정해져 있지 않아 시험결과와 비교평가에도 문제가 있다.

용액형비알카리계 물유리의 경우 경화제로서 인산을 사용하면 겔화물은 다음과 같이 생성된다.



고결물

여기서 $5(n\text{SiO}_2)$ 가 불용탈 Gel이 되고, $2(\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{HPO}_4)$ 가 용탈물질이다. 용액형 알카리계 물유리의 경우 용탈반응은 아래의 반응식과 같다.



고결물

여기서도 $n\text{SiO}_2$ 가 불용성 Gel이 되고, 소량의 미반응 $m\text{SiO}_2$ 와 반응생성물인 $2\text{Na}_3\text{PO}_4 \cdot 3\text{Na}_2\text{O}$ 가 용탈물질이다.

시멘트계 주입재의 알카리 용탈은 용액중의 시멘트량이 원인이 아니라 오히려 W/C의 영향이 크며 용탈의 경시변화는 시멘트의 경화발현에 의해 결정된다. 다시 말하면 W/C가 크고 시멘트량이 적은 CB(시멘트 벤토나이트) 보다 W/C가 작고 시멘트량이 많은 몰타

르가 시멘트의 경화발현이 빠르기 때문에 알카리의 용탈량이 적다. 이상과 같은 내구성을 향상시킬 수 있는 대책으로는 첫째, 물유리 농도를 될 수 있는 한 높이고 반응물이 큰 경화제를 써서 고결강도를 높일 것, 둘째 고결물로부터 알카리의 용탈이 작은 주입재를 선정할 것, 셋째 약액 중의 수분을 될 수 있는 한 작게 배합설계를 할 것, 넷째 현장주입시 어느 정도 이상의 가압상태로 밀하게 충전할 것 등이다.

일반적으로 물유리계약액은 내구성이 나쁘지만 시멘트계약액은 내구성이 영구적이라 할 수 있으므로 물유리에 시멘트를 혼합하여 쓰게 되면 차수, 강도 뿐 아니라 내구성의 증대효과도 기대할 수 있다. 특히 해수 중에는 마그네슘이온이 약액의 미세한 균열에 침입하여 약액중의 알칼리분(Na_2O)과 반응하여 $\text{Mg}(\text{OH})_2$ 를 생성하여 균열을 확대한다. 황산이온 역시 시멘트성분중의 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 와 반응하여 Etringite를 생성하여 팽창함으로 균열붕괴를 확대시킨다고 하는 문제가 제기된다. 따라서 담수보다는 해수에서 열화 현상이 크며 따라서 시멘트의 일부를 Slag로 치환한 Slag계 시멘트가 우수하다 할 것이다.

이와 같이 약액주입재가 지반에 침투되면 그 성질이 시간이 흐를수록 변하게 되는 데 그 주된 원인은 지하수(또는 흐름)에 희석, 유실과 용탈에 의해서이며 따라서 강도 및 차수효과가 크게 저하되는데 최근엔 약액을 영구적인 목적으로 쓰기 위해 주입재의 내구성 증대를 위한 연구가 각국에서 진행 중이다. 예를 들면, 강도나 차수효과가 시간이 갈수록 오히려 증가하는 유기계 물유리약액(GSG)이나 중성실리카졸계 약액이 효과적이며, 유기질토에서는 시멘트와 마찬가지로 수경성이 풍부한 무기질 신재료(고화제 M)가 높은 개량효과를 나타내고 있다. 또한 암반이나 토사층에서 차수나 강도증대면에서 매우 큰 효과를 볼 수 있는 유레탄계 약액이 국내외에서 호평리에 쓰이고 있다. 최근엔 탄산가스를 경화제로 사용하고 가보록크 용 규산소다를 주재료로 한 기·액 반응액이 최

근 일본에서 개발되어 안정된 물성을 얻을 수 있게 되었으며 특히 실리카졸계 약액(실리카 라이저, 하드라이저) 및 GS계 물유리약액(GSG)에 관한 많은 시공실적으로부터 이들의 약액이 장기 가설용으로서 내구성이 우수하다는 것이 입증되었다.

국내 흙막이 공사현장을 중심으로 한 약액주입고결토에 대한 내구성(지반강도 및 투수계수변화)실험조사 결과를 요약정리하면 다음과 같다.

- (1) 시간경과에 따른 약액주입고결토의 내구성 변화는 정압주입으로 시공하여 주입재 충전상태가 양호($k=10^{-5} \sim 10^{-6} \text{cm/sec}$ 이상)할 경우 6개월이 경과된 시점에서 내구성이 저하되기 시작하여 적게는 12개월 크게는 18개월이 경과된 시점에서 내구성이 거의 상실되어 약액주입 효과가 급강하함을 알 수 있었다.
- (2) 이와 같이 압축강도가 저하하고 투수계수가 커지는 것은 지하수에 의한 약액의 희석·유실과 용탈에 주된 원인이 있는 것으로서 희석은 토립자 주위의 자유수 및 흡착수와 혼합되어 농도가 떨어지고 Gel-time이 늦어져 약액의 고결을 저해한다. 약액의 용탈은 용액중의 용질이 점차로 용매로 이동하여 가고 결국은 같은 농도로 되는 데 이러한 이동은 농도차에 의해 용질이 농도가 진한 곳에서 열린 곳으로 이동하기 때문이다.
- (3) 약액주입에 의한 내구성증대는 흙과 약액의 점착력에 의한 것으로 볼 수 있는데 지하수 유속이 커질수록 약액의 희석, 유실이 점착력이 심해져서 감소하고 약액의 용탈이 커져서 내구성이 떨어진다.

또한 토사지반 및 암반균열면에서의 원만한 침투주입 및 지반보강효과증대 또는 내구성 향상을 위해 약액자체 및 시공측면에서의 우리의 처지를 고려한 개선방안을 요약하면 다음과 같다.

- ① 대수층 또는 동수지반에서는 지하수류에

약액이 희석, 유실되지 않도록 약액주입 설계시 주입모델시험을 거쳐서 지하수의 유속의 정도에 따라 Gel-time, 주입량, 주입속도, 농도, 주입률 등이 콘트롤 되어야 한다.

- ② 할렬주입으로 인해 수압파쇄(Hydrofracturing), 지반용기 현상등이 일어나지 않도록 주입압, 약액농도, 주입률 등이 검토되어야 하며 반드시 현장에서 시험주입을 거쳐 본 주입시공을 시행하여야 한다. 주입 대상지반의 토질·지하수 특성에 따라 정량주입 보다는 정압주입 개념의 주입패턴이 바람직하다.
- ③ 물유리 농도를 될 수 있는 한 높이고 밀도나 투수성을 고려한 최소량의 물유리를 사용하고 시멘트 배합량을 늘린다. 반응율이 큰 경화제를 써서 고결강도를 높이고 고결물로 부터 알카리의 용탈이 작은 주입재를 선정한다. 약액중의 수분을 될 수 있는 한 작게 되도록 배합설계를 한다.
- ④ 현장주입시 기존의 관행인 정량주입보다는 어느 정도 가압상태로 밀하게 충전되도록 정압주입을 한다. 투수계수가 커서 주입폭이 두꺼울 때는 주입공의 간격을 줄이고 주입열을 증대시킨다. 투수성이 낮은 지역에서는 주입재의 침투효과 및 강도증대를 위해 일반시멘트 보다는 Micro Cement(비표면적 $8,600 \text{cm}^2/\text{g}$)를 사용하는 것이 효과적이다.
- ⑤ 주입설계시 약액의 양은 일반적으로 대상지반의 토질물성치를 근거로 산출하여 공당 양으로 등분배하고 다시 심도별 스텝별로 등분배하여 정량개념으로 시공되고 있는 현상이다. 그러나 실제로 대부분의 지반은 복합지층으로 구성되어 있으므로 각 심도 별 스텝별로 주입압 및 주입량이 다르게 주입시공 되어야 함에도 시공편의만 고려하는 결과가 되어 결국 일정량이 주입되어서 주입효과가 불량한 경우가 많이 발생된다. 반드시 본 주입시공에 앞서서 시험주입을 행하고 이때 해당 공법

에 적합한 주입압을 설정하여 여기에 도달할 때 까지 충분히 충전시켜 정압주입이 이루어지도록 하는 것이 내구성 증대에 효과적이다.

12.4.6. 注入量의 設計

주입량을 설계하기 위해서는 앞서의 주입개량범위에 대해 주입률 혹은 간극충전율의 도입이 필요하다.

일반적으로 전 주입량은 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$Q = V\lambda = V \cdot n \cdot \alpha(1 + \beta) \dots \dots \dots (17)$$

여기서,

Q : 전 주입량(m³)

V : 주입개량범위의 토량(m³)

λ (주입률, %) = $n \alpha(1 + \beta)$

n : 토질조사에 의한 흙의 간극률(%)

α : 지반의 간극에 대한 주입재의 충전율(%)

β : 손실계수=0.05~1.0 ≒ 0.1(현장시험주입으로 정하는 것이 좋다)

그림 14과 같은 모델을 고려한 경우, 충전율 α 는 이론적으로는 다음 식으로 표현된다.

$$\alpha = \frac{Q_i}{V \times n} \text{ 혹은 } \alpha = \frac{Q}{V_1 \times n} \dots \dots \dots (18)$$

그러나, 실제로는 Q, V₁을 구하기가 곤란하므로, $\alpha = Q/Vn$ 으로 나타내도록 한다. 이 때문에 균등한 침투주입이 가능한 경우에는 유효한 계수가 되지만, 균열된 틈등을 목적으로 한 맥상주입에 있어서는 설계에서 가정한 주입개량범위와 실제 시공으로 얻어지는 주입범위간에는 큰 차이가 생기기 쉬우므로, 실제적인 계수라고는 말하기 어려운 점이 있다.

앞서와 같이 현재 여러 가지 주입방식이 사용되고 있으며, 주입방식 마다 각각 주입률이 제안되고 있다. 그러나 일반적으로 주입목적, 토질, 공법별로 된 주입률은 표 12를 참고로 하여 정한다. 이 수치들도 어디까지나 설계상의 기준으로, 실제 시공시에 검토해야 하며, 시공방법에 따라서는 변경 될 수 있다는 점에도 주의해야 한다.

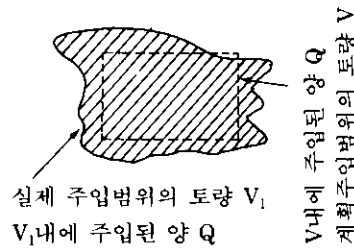


그림 14. 충전율을 설명하는 모델

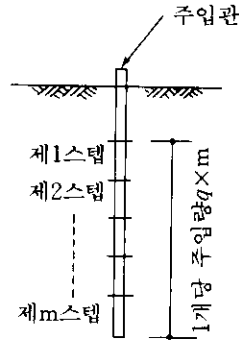


그림 15. 스텝의 설명

실시설계단계에서는, 전주입량 Q를, 각 주입관과 스텝이라고 부르는 주입단위로 균등하게 배분해서 스텝당의 주입량을 산출하고, 이를 설계도에 표시한다. 스텝주입량은 시공시 중요한 기준이 된다.

전주입량과 스텝주입량의 관계는 다음과 같다(그림 15).

$$q = \frac{Q}{\sum T_n \cdot m_n} \dots \dots \dots (19)$$

여기서,

q : 스텝주입량(l)

Q : 전주입량(l)

T_n : 같은 스텝수를 지닌 주입관의 갯수(개)

m_n : 주입관 1개당의 스텝수

12.4.7. 試驗注入

현장시험주입은 중요 공사 또는 특별히 어려움이 예상되는 공사에서 본공사에 앞서 행하여 주입계획의 타당성과 효과를 확인한다. 또한 당초설계의 수정, 보완 및 시공관리자료를 얻기 위해서 실시되기도 하는 것으로서 일본의

표12. 토질에 따른 주입재의 충전율 및 주입율의 참고치

토 질	N 치	투수계수 (k) (cm/sec)	간극률 (n) (%)	충전율 $\alpha(1+\beta)(\%)$					
				주입재종별	주입목적별		주입목적별		
					강화	차수	강화	차수	
자갈 · 모래	느슨함	4~10	10^1	45~50	현탁액계	95	100	43~48	45~50
					용액계	-	100	-	45~50
	중간	10~30	10^0	35~40	현탁액계	95	-	33.3~30.8	-
					용액계	90	100	31.5~36.0	35~40
조밀	30~50	10^{-1}	30~35	현탁액계	90	-	27.0~31.5	-	
				용액계	90	95	27.0~31.5	28.5~33.3	
사질토	느슨함	4~10	10^{-2}	45~50	용액계	90~95		40.5~47.5	
	중간	10~30	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	40~45	용액계	90~92		36.0~41.4	
	조밀	30~50	$10^{-3} \sim 10^{-4}$	35~40	용액계	80~85		28.0~34.0	
점성토	느슨함	0~4	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	60~75	현탁액계	40	-	24~30	-
					용액계	45	-	27~34	-
	중간	4~8	$10^{-4} \sim 10^{-5}$	50~60	현탁액계	30	-	15~18	-
					용액계	30	-	15~18	-
부식토	0~5	$10^{-2} \sim 10^{-3}$	70~90	현탁액계	60		42~54		
				용액계	-	100	-	70~90	

주) 손실계수는 B는 현장주입시험에 의해 정하는 것이 좋으나 여기서는 편의상 0.1로 한다.

경우는 시험주입을 의무화 하고 있다. 즉, 약액 주입 범위, 주입량 등이 설계대로 주입되는 것을 확인, 검토하기 위하여 주입계획지반 또는 이와 유사한 지반에서 행하여 지는 것으로서 특히 대규모 주입공사(약액량이 500m³이상)의 경우, 부근 상수원이 있는 경우, 지반의 토질이 복잡한 경우, 또는 투수성이 커서 지하수가 풍부한 경우는 필히 행하지 않으면 안되며 현장의 지층 차이, 토질점수의 차이등에 의하여 설계변경하여 실시하는 것이 통례이다.

그러나 국내에서는 아직도 약액주입공법에 대한 지식부족으로 그 중요성을 인식하지 못하거나 공사비용과 공사기간등을 핑계로 실시하지 못하고 있는 듯한 인상인데 이러한 생각은 큰 잘못이다. 즉, 시험주입을 거치지 않고 곧바로 본 주입을 실시하고 본 굴착공사에 들어가면 시간도 절약되고 경제적인 것으로 착각하기 쉬운 데 사실은 그와 정반대이다 아무리 급하다고 바늘허리에 실을 메어 꿰맬 수 없지 않는가? 본 공사(굴착)후 뒤늦게 차수공의 문제점을 발견한들 이미 때는 늦은 것이다. 즉, 굴착

을 해버림으로서 유속이 커짐은 물론 토사가 함께 유출되어 공극이 매우 커지게 되고, 한쪽을 굴착함으로써 지반은 힘의 평형을 잃게 되는 등 당초와는 크게 달라져서 결국 불리한 조건으로 되어버린다. 따라서 이에 대한 대응책으로서 좀더 확실하고 강력한 공법으로 처방하지 않으면 안되고 그렇게 하다보면 결과적으로 공비 및 공기는 훨씬 더 소요되게 되는 게 일반적이다. 현장의 토질조건이 상이함에도 불구하고 주입설계의 변경이 용이하지 않아 당초 설계대로 강행하여 실패한 사례도 적지 않다. 주입공 자체의 불확실성을 보완하고, 보다 효과적인 공법적용을 위해서는 시험주입과 함께 주입효과를 확인하여 현장토질특성을 반영하는 기본자료를 축적해 나아가야 하며 그렇게 되면 머지않아 우리도 우리 설정에 맞는 설계 기준을 설정할 수 있게 될 것으로 기대한다.

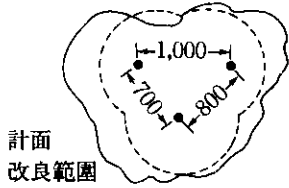
다음에 현장시험 주입공사의 예를 나타낸다.

- (1) 시험목적과 공법의 선정
- (2) 시험범위
- (3) 사용주입재

- (4) 주입제원
- (5) 주요효과 확인공

시험주입 완료후, 하기 항목 및 방법에 의해 그 효과를 측정한다.

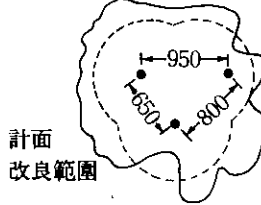
a) 굴착에 의한 개량고결도의 관찰



$$\begin{aligned} \text{改良率} &= \frac{\text{固結土量}}{\text{計面土量}} \\ &= \frac{3.20\text{m}^3}{2.35\text{m}^3} = 136\% \end{aligned}$$

複合比率 1 : 7

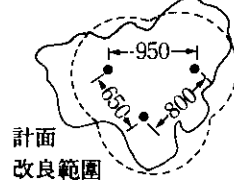
(a) GL-12.2m
(C타입)



$$\begin{aligned} \text{改良率} &= \frac{\text{固結土量}}{\text{計面土量}} \\ &= \frac{3.15\text{m}^3}{2.35\text{m}^3} = 134\% \end{aligned}$$

複合比率 1 : 7

(b) GL-13.7m
(B타입)



$$\begin{aligned} \text{改良率} &= \frac{\text{固結土量}}{\text{計面土量}} \\ &= \frac{2.20\text{m}^3}{2.35\text{m}^3} = 93\% \end{aligned}$$

複合比率 1 : 3

(c) GL-15.2m
(A타입)

그림 16. 굴착조사

- ① 각 타입을 2단으로 절단, 평면적인 넓이 및 공간격 등을 관찰하였다.
- ② 각 타입에서 30cm×30cm의 개량샘플을 실내시험용으로 몇 개 채취하였다.

b) 실내시험

- ① 실내투수시험(k)
- ② 삼축압축시험(c, φ)

(6) 고찰

a) 확인

b) 삼축압축시험

- ① 점착력 C (kgf/cm²)
- ② 내부마찰각φ(°)

c) 투수시험

參 考 文 獻

1. G. A. Kravetz, Feb., 1958., "Cement and Clay Grouting of Foundations: The Use of Clay in Pressure of Grouting", Proc. of ASCE, J. of SMFE, SM1, pp.1546-1~30
2. H. Cambefort, 1964., "地盤注入", 鹿島出版會
3. M. P. Moseley, 1993, "Ground Improvement", CRC Press, INC.
4. S. Thorburn · GS. Littlejohn, 1993, "Underpinning and Retention", CRC Press, INC.
5. 島田 外, 1988, "最先端技術の薬液注入工法", 理工圖書
6. 森 麟 · 千柄植, 1987. 12, "砂質地盤における割裂發生機構", 日本土木學會論文集(Ⅲ) No. 388 III -7, pp.61~70
7. 日本材料學會 土質安定材料委員會, 1974, "薬液注入工法", 鹿島出版會, pp.138~139