1

지반보강용 마이크로시멘트의 기초적 특성

김진춘* · 오희갑 · 최광일

〈쌍용양회(주) 중앙연구소〉

1.서 론

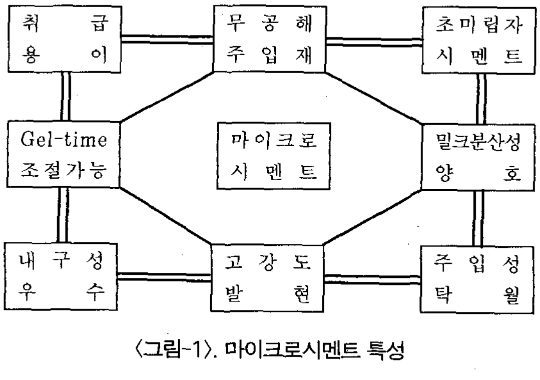
최근 성수대교 및 삼풍백화점 붕괴사고 등으로부터 건설안전 문제가 사회적으로 물의를 일으키고 있다. 이러한 대형 사고의 원인을 분석할 때마다 어김없이 거론되는 문제가 바로 구조물의 지반이 안정되게 설계 시공되었는지, 또는 구조물 주변의 지반안정성 확보를 위해서 충분히 대책이 세워졌는지를 검토하게 된다.

따라서, 대형 토목공사에서는 지반의 안정성 확보를 위해서 각종 그라우팅 공법이 많이 사용되고 있다. 즉, 지하철 연약지반의 차수 및 보강공사, 댐 기초암반의 변형방지 · 침투유량 억제 및 강화등을 위해서 보통포틀랜드시멘트를 이용한 시멘트계 주입재에 의한 기초처리가 일반적으로 적용되고 있다.

그러나, 최근에는 공사지반의 지질에 破碎帶, 마사, 未固結砂岩 등 불균질한 지층이 나타나는 경우가 많아지면서 보통포틀랜드시멘트만으로는 주입효과가 불충분하기 때문에 유기계의 주입재가 많이 개발되어 사용되고 있지만 高價이면서, 주변의 지하수를 汚染시키는 등 2차적인 문제가 있다.

한편, 댐건설, 도시토목공사 등에 사용되는 주입재는 환경보전, 강도, 내구성 측면에서 어떤 他재료보다도 수경성시멘트가 가장 우수하지만 지금까지 사용되어 왔던 시멘트계 주입재의 粒子徑은 최대입경 100㎛, 평균입경 15~20㎛정도로 그 적용범위에 한계가 있었다. 그러나, 최근에는 시멘트 생산 분야에도 분쇄 · 분급기술이 급속도로 발달하여 시멘트 粒子徑이 최대입경 10㎛, 평균입경 4㎛정도의 마이크로시멘트를 상업적으로 생산이 가능함으로써 지반보강 분야의 새로운 주입재로 각광받게 되었고 당사에서 개발한 마이크로시멘트의 종합적인 특성은 〈그림-1〉과 같다.

본 연구에서는 지하철 연약지반, 기초암반 및 산악지역 터널 등의 불균질한 기초에 대해서 보통포틀랜드시멘트를 사용하여 처리하고 있는 주입공사 설계 및 시방으로 대처하기에는 한계가 있기 때문에 일본, 구미 등 선진국에서 널리 사용되고 있는 마이크로시멘트를 이용한 기초처리 효과를 注入性, 施工性 및 經濟性 측면에서 검토하여 설계 및 시방에 대한 기술자료를 제공코자 한다.



〈그림-1〉. 마이크로시멘트 특성

2. 지반보강공사의 영향인자

2-1 注入材의 浸透性

각종 주입재의 침투를 쉽게 하기 위해서는 주입재

입자가 토립자사이 또는 균열간극을 무리없이 통과할 수 있을 정도로 입자크기가 충분히 작아야 하며, G.A.Kravetz는 각종 주입재 및 침투가능한 토립자에 대한 浸透性 실험결과 다음과 같은 注入比(groutability ratio) 관계식을 보고한 바 있다.

$$N1 = \frac{D15}{G85} > 15 \qquad N2 = \frac{D10}{G90} > 8$$

N1, N2 ; 注入比(Groutability Ratio)

D15, D10 ; 토립자 입경가적 15%,10%粒子徑

G85, G90 ; 주입재 입경가적 85%,90%粒子徑

또한, 암반균열 주입에 관해서 암반균열폭과 주입가능한 주입재의 최대입자경과의 관계를 J.K.Michel이 제안한 注入比는 다음과 같다.

$$N = \frac{D_{fissure}}{G_{max}} > 3$$

$D_{fissure}$; 암반균열幅,

G_{max} ; 주입재 입자의 최대 입경

따라서, 암반균열 주입비에 의하면 보통포틀랜드시멘트로 주입가능한 균열의 최저폭은 0.3mm, 마이크로시멘트로 주입가능한 균열의 최저폭은 0.03mm 수준으로 알려져 있다.

注入比로만 판단하면 주입용 시멘트의 입자가 작을수록 좋다고 볼 수 있지만 실리카흄이나 점토광물에서와 같이 지나치게 고분말이기 때문에 오히려 응집현상이 발생함으로써 주입을 방해하는 것도 있다. 따라서 注入比에 의한 주입성의 평가는 마이크로시멘트와 같이 일정범위의 입도범위에 있는 재료가 효과적인 것으로 판단되며 마이크로시멘트를 비롯한 기타 침투성 주입재의 토질별 주입범위는 〈그림-2〉와 같이 평가되고 있다.

〈그림-2〉에서 알 수 있듯이 마이크로시멘트는 침투성이 유기계의 용액형과 거의 같은 高浸透性일뿐만 아니라 무기계의 특징인 내구성과 고강도성 등을 갖추고 있기 때문에 침투성 주입재로서는 가장 바람직한 재료라고 할 수 있다.

2-2 주입재의 재료분리 저항성

주입재를 현탁시킨 밀크의 재료분리저항성은 밀크중의 시멘트 粒子徑과 입자간 분산성에 의해서 영향을 받는다. 보통포틀랜드시멘트는 分散系(10㎛ 이상)와 凝集系(10㎛ 이하)의 혼합계인 반면, 마이크로시멘트는 0.1~10㎛의 입도를 갖는 응집계로 구성되어 있기 때문에 재료분리 저항성이 크다.

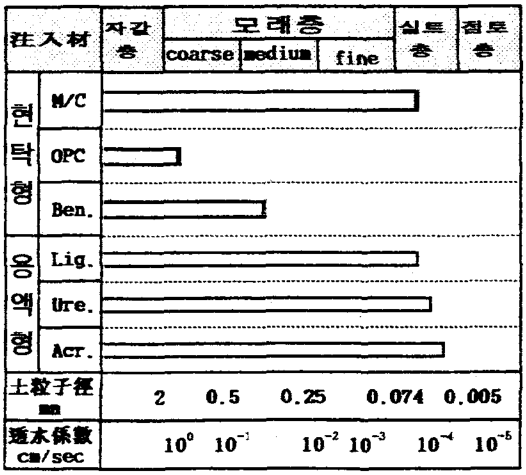
시멘트입자경의 재료분리저항성에 대해서는 수화에 의해서 입자경의 증대 이외에 입자간의 충돌에 의한 응집의 강약에 큰 영향을 받고 실제의 주입에 있어서는 믹서의 교반방법, 교반시간 등에 의해서 복잡하게 영향을 받는다.

주입용 시멘트밀크는 주입 직전까지 균일한 상태로 주입되는것이 이상적이지만 밀크는 비중이 비교적 큰 시멘트입자와 다량의 물로 묽게 배합되어 있기 때문에 재료분리가 일어나기 쉽고 불안정한 주입시공이 일어날수 있다. 따라서 균일한 밀크를 얻기 위해 입자의 분산화를 계획할 필요가 있다.

2-3 주입재의 流動性

작은 힘으로 운동량이 큰 유체는 유동성이 크다고 하고 유체의 유동성의 양부는 점도로 비교된다. 주입재의 유동성(粘度)은 주입효율(주입속도, 주입량)에 영향을 미치고 밀크의 농도, 시멘트의 입도, 반응성 이외에 응집성과 관계가 크다.

즉, 시멘트밀크의 농도를 묽게하고 반응성을 지연시켜줄 수 있는 혼화재를 사용함으로써 유동성을 향



〈그림-2〉 침투성 주입재의 토질별 침투범위

상시킬 수 있지만 시멘트의 입도를 미세하게 할 수록 입자의 응집성이 강하므로 오히려 유동성이 떨어지는 경향을 보인다. 따라서, 주입재의 입자를 미세하게 할 경우 밀크의 유동성을 확보하기 위해서 적당한 분산 계획을 세워야 한다.

3. 실험 및 결과분석

3-1 사용재료

본 시험에 사용된 시멘트는 국내 S社에서 개발 시판하고 있는 마이크로시멘트(상품명:마이셈8000)와 보통시멘트를 선정 사용하였고 주입재의 응결조절재로는 규산소다 3호를 사용하였다.

3-2 시멘트 품질 분석

마이크로시멘트는 화학성분에서부터 보통시멘트와 차이가 뚜렷하다. 즉, 초미립화 함으로써 초기에 수화 활성이 지나치게 크면 작업성 확보가 어렵기 때문에 초기수화 속도를 조절할 수 있도록 성분이 조정된 시멘트로서 입도가 보통시멘트보다 훨씬 작다. 따라서, 마이크로시멘트는 보통시멘트에 비해서 토립자사이 또는 암반균열 사이로 침투되는 비율(groutability ratio)이 커질 수 있다 〈표-2〉.

화학성분

〈표-1〉 (%)

종류	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3
OPC	20.4	5.8	3.1	62.6	3.6	0.13	0.77	1.9
M/C	27.5	11.2	1.7	51.3	4.8	0.17	0.44	2.1

입도분포

〈표-2〉 (누적 %)

㎛	1	2	4	8	12	16	24	64	MS
OPC	4.9	7.3	14.3	27.1	37.0	45.3	62.3	96.0	18.2
M/C	14.5	27.9	57.2	89.6	98.2	99.6	100	-	3.5

3-3 주입재의 물리성능 분석

지하철 등 일반 연약지반 주입공사에서 가장 많이 사용되는 공법은 응결성(Gel-Time) 조절이 용이하고 경제적인 반현탁형 물유리계 LW工法으로 본시험에서 적용한 배합수준은 다음과 같다.

	W/C.(%)	물(g)	시멘트(g)	비고
A액	200	6,000	3,000	1ℓ기준
B액	물유리액 : 규산소다 3호 3.5ℓ +물3.5ℓ			

〈표-4〉의 실험결과 중에서 Gel-Time과 Homo-gel 압축강도는 A액과 B액을 1:1로 교반할 때 Gel化되

물리적 성질

〈표-3〉

종 류	비 중	Blaine (㎠/g)	응결시간(길모아)			Flow	압축강도 kgf/㎠				
			W/C.%	초결, 분	종결,시간	%	W/C.%	1일	3일	7일	28일
OPC	3.15	3,180	25.0	170	7:30	106.2	48.5	96	195	278	368
M/C	3.03	8,420	30.5	260	9:30	108.5	51.5	103	295	295	588

실 험 결 과

〈표-4〉

종 류	Gel time Sec	B형 초기 점도, cps	Bleeding율 (30분 후)	침투성*			Homo-gel 압축강도, kgf/㎠			
				시간,Sec	재료분리, %	Cracking	1일	3일	7일	28일
요구수준	60~90	10이하	작을수록 양호	작을수록 양호			1일이후 1kg/㎠ 이상 클수록 양호			
OPC	64	12	40	90초과	70	많음	1.2	2.3	4.6	15.7
M/C	65	4	3	3	-	-	2.3	14.2	34.8	48.5

*.Sand Column Test ; ø10cm×H25cm, Sand F.M.=2.8, 펌프흡인력=-5torr

는 시간과 Gel化 後 재령별로 강도발현 특성이다.

동 실험결과에서도 알 수 있듯이 보통시멘트는 침투성이 나쁘고 재료분리 경향이 크기 때문에 주입후 차수 및 지반강화 효과가 떨어질 가능성이 크지만, 마이크로시멘트는 일반적으로 요구되는 품질수준기준을 모든 항목에서 우수한 수준으로 만족하고있다. 특히, Homo-gel 압축강도 발현에서 큰 차이가 나는 것은 마이크로시멘트가 토립자사이 및 암반균열에 침투후 경화가 되면 보통시멘트를 사용한 경우보다 지반강화(earth concreting) 효과가 크다는 것을 의미한다.

4. 현장적용 사례

4-1 대구지하철 1-5공구

지하철 공사현장에서 불과 20m정도 떨어진 인접지역에 15층짜리 고층아파트가 있고, 그 기초지반은 풍화암지대로 보링조사되었다. 따라서, 지하철을 굴착하면서 지반침하에 의한 인접 구조물의 심각한 균열발생이 우려되고 민원의 가능성이 높기 때문에 사전에 충분한 기술적 검토를 거쳐 확실한 지반보강대책을 세우기위한 기술자료를 얻기위해서 마이크로시멘트를 이용하여 Grouting Test를 실시하기로 하였다.

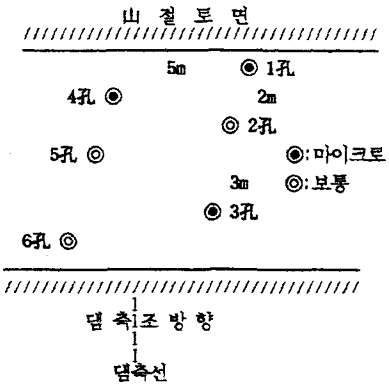
〈표-5〉의 결과에서 알 수 있듯이 본 현장의 지반에 마이크로시멘트를 적용할 경우 차수 및 지반보강 효과가 확실하다고 판단하여 아파트 앞부분의 Grouting에 마이크로시멘트를 적용하였다.

〈표-5〉 현장 Grouting test 결과

실험항목	결 과
주입성	계획량을 일정한 압력으로 계속적으로 주입할 수 있었음.
투수계수	- 주입전측정치 : 8.2×10^{-4} cm/sec - 주입후개선목표 : 5.4×10^{-5} cm/sec - 마이크로시멘트 grouting 後 측정된 투수계수 : 2.7×10^{-6} cm/sec
표준관입 N-value	- 주입前측정치 : 15/30cm - 주입後측정치 : 47/30cm

4-2 보령댐 축조현장

보령댐의 기초지반은 層離가 밀집되고 炭層이 협재한 불균질한 암반으로 보링조사되었고 이와 같은 지반에는 보통시멘트로는 효과적인 Grouting이 어렵다고 판단되었다. 따라서 高浸透性의 마이크로시멘트를 사용할 경우 차수 및 지반보강 효과가 어느정도 개선될 수 있는지 확인하기 위해서 탄층대가 협재된 지역에서 시험 Grouting을 실시키로 하였다.



〈그림-3〉 孔 배치
-孔깊이 : 탄층대 위치까지 천공(7~12m)

탄층대 수압시험결과 孔1 및 孔5를 제외하고는 Lu〈3으로 절리가 거의 없는 주입이 불필요한 암층대로 판단되며 실제로 주입을 시도한 결과 거의 주입이 되지 않았다. 한편, 孔2, 3 및 6의 수압시험결과 모두 Lu〉10으로 투수성이 큰 암층대로 판단되며 보통시멘트와 마이크로시멘트를 각 공별로 주입하였다.〈표-6〉

〈표-6〉 수압시험

孔 NO.	천공 깊이 (m)	탄층깊이 (m)	탄층대 루죤치 (Lu)	암층대 루죤치 (Lu)
1	7.5	4.8~5.7	8.7	-
2	11.4	8.8~10.7	0.1	36.7
3	7.0	4.8~5.5	1.2	33.3
4	11.9	9.8~11.6	0.2	-
5	7.0	5.1~6.0	4.0	-
6	11.5	9.5~11.3	0.1	17.5

〈표-7〉 탄층대에서의 실험 결과

孔 NO.	탄층깊이 (m)	Step長 (m)	탄층대 루죤치 (Lu)	주입 시멘트 (종류)	시멘트 주입량 (kg)	단위 주입량 kg/m
1	4.8~5.7	3.0	8.7	M/C	114.7	38.2
5	5.1~6.0	2.5	4.0	OPC	2.3	0.9

〈표-8〉 암층대에서의 실험 결과

孔 NO.	암층깊이 (m)	Step長 (m)	암층대 루죤치 (Lu)	주입 시멘트 (종류)	시멘트 주입량 (kg)	단위 주입량 kg/m
2	0.5~4.5	4.0	36.7	OPC	1508	377
3	0.5~4.5	4.0	33.3	M/C	2459	615

탄층대에서의 수압시험결과 10루죤이하로 큰 절리는 거의 없고 미세한 절리만 존재하는 암층일 것으로 추정되며 실제로 탄층대의 코아 관측결과에서 도 큰 절리는 거의 없었다. 탄층대의 주입실험결과 마이크로시멘트를 주입한 孔1은 38.2kg/m, 보통시멘트를 주입한 孔5는 0.9kg/m정도로 마이크로시멘트의 주입량이 40배이상 컸다. 따라서 미세한 절리만 발달되어 있어서 주입이 어려운 지반일수록 보통시멘트와 같이 입자가 굵은 시멘트보다는 마이크로시멘트를 사용하는 것이 주입성 측면에서 훨씬 유리하다는 것을 알 수 있다 〈표-7〉.

孔2와 孔3의 단위 주입량으로부터 알 수 있듯이 절리가 집중적으로 발달되어 있는 주입범위에서는 보통시멘트도 주입이 잘 되고 있지만 마이크로시멘트가 보통시멘트에 비해서 주입량이 1.6배이상 컸기 때문에 마이크로시멘트로 그라우팅하는 경우 루죤치와 배합비 관계를 적절히 조정해서 시공성을 개선할 수 있고, 注入孔 간격을 넓힘으로써 그라우팅의 경제성을 개선할 수 있다고 판단된다 〈표-8〉.

5. 결 론

1) 마이크로시멘트와 보통시멘트간의 Grouting효과를 비교 파악하기 위하여 주입재의 물리성능 평가 실험을 실시한 결과 마이크로시멘트는 밀크의 안정성, 지반침투성능 및 지반보강효과 측면에서 보통시멘트보다 월등히 우수하였다.

2) 탄층대와 같이 Grouting이 어려운 지층에서 마이크로시멘트는 보통시멘트 보다 40배이상 주입이 잘되었다. 따라서, 미세 균열이 많아서 주입이 어려운 지층일수록 초미분말이면서 밀크의 분산성이 좋은 마이크로시멘트의 주입효과가 크다고 판단된다.

3) 암층대와 같이 암반절리가 집중되어 있어 보통시멘트로도 Grouting이 잘되는 지층에서도 마이크로시멘트는 보통시멘트보다 2배정도 주입이 많이 되었다. 따라서, 층리가 발달되어 있는 일반 암층대에서도 마이크로시멘트의 주입량이 보통시멘트보다도 많기 때문에 루죤치 수준별로 주입재 배합비를 적절히 고배합으로 조정함으로써 시공성을 개선할 수 있고 마이크로시멘트의 高浸透性을 이용하여 注入孔 간격을 넓힐 수 있기 때문에 시공비 절감도 가능할 것으로 판단된다.

〈참고문헌〉

1. 千柄植 ; 건설기술자를 위한 地盤注入工法, 圓技術, 1995
2. 千柄植 ; 基礎地盤改良工法, 建設硏究社, 1990
3. 대우엔지니어링 기술연구소 ; 地盤改良을 위한 그라우팅 工法에 關한 硏究, 1988
4. 삼부토건주식회사 ; 最新 地盤改良工法, 1983
5. Richard Widmann ; Grouting in Rock and Concrete, A.A.Balkema Rotterdam, 1993
6. William J. Clarke 外 2人 ; Ultafine Cement Tests and Drilling Warm Springs Dam, American Society of Civil Engineers Geotechnical Engineering Division, April, 1993
7. セメント系固化材硏究會 ; セメント系固化材んによる地盤改良マニュアル, セメント協會, 1994
8. 草野一人 ; 藥液注入工法ハンドブック, 吉井書店, 平成4年
9. 島田俊介 外 2人 ; 最先端技術の藥液注入工法, 理工圖書, 平成3年
10. 일본 道平川댐건설사무소 ; 道平川ダムのコンソリデーショングラウチングついて,ダム技術, No.42, pp.58~64, 1990
11. 島田俊介 ; 最先端技術の藥液注入工法, 理工圖書, 1991