

## 저유동성물탈주입이 주변구조물에 미치는 영향

### The Effect of contiguous structure by the low slump mortar grouting

천병식<sup>1)</sup>, Byung-Sik Chun, 여유현<sup>2)</sup>, Yoo-Hyeon, Yeoh, 김진수<sup>3)</sup>, Jin-Soo, Kim, 지원백<sup>3)</sup>, Won-Baek, Ji

<sup>1)</sup> 한양대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

<sup>2)</sup> (주)가야이엔지 대표이사, President, Gaya Eng. Co. Ltd.

<sup>3)</sup> 한양대학교 대학원 목공학과 석사과정, Graduate student, Dept. of Civil Engineering, Hanyang University

**SYNOPSIS** : The low slump mortar grouting is widely used in reinforcement of structural foundation and ground improvement in soft ground. It also has merit that construction is possible in insufficient space. In this study, the main purpose is to evaluate effects for contiguous structures that can be happened along with soft ground improvement by the low slump mortar grouting. To estimate these effects, numerical analysis using finite difference method was applied. It was performed to analyze settlement, upheaval and horizontal displacement of surrounding ground and to measure horizontal stress variation by the first and the second grouting in the pile foundation.

**Key words** : The low slump mortar grouting, Numerical analysis, Horizontal displacement, Horizontal stress variation

## 1. 서론

지반주입공법은 1802년 프랑스의 C. Berigny가 실시한 점토와 석회액의 수용액을 지반 내에 주입시킨 것을 시초로하여 지반개량과 차수 및 기초보강 등의 다양한 목적으로 국외에서 활발하게 사용되고 있으며 국내에서는 1970년대 말부터 지하철공사 현장 등에서 활발하게 적용되기 시작하였다(천, 1998a). 현재 국내에서는 물유리계 약액주입공법(LW, SGR 등), MSG공법, 우레탄, 고압분사주입공법(JSP, Jet G., RJP, SIG 등), 심층혼합처리공법(DMP, CJM, DWM), 저유동성 물탈주입공법 등이 단독으로 또는 2~3가지가 병행되어 쓰이고 있으며 선진국에서는 이 보다 개선된 주입약액 및 주입공법, 예를 들면 기·액 반응약액인 Carbo Rock, 내구성이 우수한 실리카졸계의 Clean Rock(2중관순결 주입공법), SILACSOL, Silica Lizer, Hard Lizer, Perma Rock, 고압분사공법에서 Slurry 대신 시멘트, 생석회, 석회 등 분체를 사용하는 DJM(Dry Jet Mixing Method)공법, 공해물질인 Slime을 제거하고 강력한 구체를 형성시킬 수 있는 J&C(Jet & Compaction)공법, SQJ(Square Jet)공법 등 시멘트계 심층혼합처리공법이 쓰여지고 있다.

이들 공법 중 저유동성 물탈주입공법은 슬럼프가 낮은 저유동성 몰탈을 지반 내에 고압으로 주입하는 공법으로 부동침하된 구조물의 복원, 폐광함몰 지역 및 석회암동굴 지역에서의 지반보강, 연약지반에서 구조물 기초의 지반보강, 손상된 흙 댐 코어의 보수보강 등 다양한 목적으로 적용되고 있다. 또한, 시공 현장의 공간이 협소한 경우나 소음, 진동 등의 영향을 많이 받는 지역에서도 시공할 수 있는 특징이 있다(천, 1998b).

본 연구의 목적은 저유동성 몰탈주입에 의한 지반개량과 더불어 발생할 수 있는 인접구조물에 대한 영향을 평가하는 데 있다. 평가방법으로는 이차원 Explicit 유한차분법에 의한 수치해석 기법을 적용하

였으며, 주입에 의한 주변지반의 침하·응기, 방사방향 수평변위 특성, 1차 및 2차 주입에 의한 수평응력 변화, 주변 지하구조물 기초(Pile 기초)에 미치는 응력 변화 등을 해석하였다.

## 2. 해석단면 선정 및 적용 물성치

지반의 거동모델은 Mohr-Coulomb Model을 적용하였고, 단일 저유동성 몰탈주입시공시 경계조건은 좌, 우측은 X축 변위를 고정시켰고, 하부는 Y축 변위에 고정시켰다.

지반에 분포되는 응력상태 및 지반의 변형거동을 예측하기 위해 수치해석을 이용하는데 있어서 지반의 물성치를 정확히 평가하는 것은 매우 중요할 뿐 아니라 많은 어려움이 있다. 따라서, 본 해석에 적용된 입력 물성치는 지반조사에서 구한 표준관입시험치와 실내토질실험결과를 이용하여 선정하였으며 그 외에는 일반적으로 적용되는 값과 토질주상도에서 구할 수 있는 값을 기본으로 일반적으로 통용되는 물성치를 선정하였다.

표 1. 적용 물성치

구 분	매립층	퇴적층1	퇴적층2	잔류토층	풍화암층	주입재
E (t/m <sup>2</sup> )	900	200	200	500	2000	17600
$\nu$	0.25	0.4	0.3	0.25	0.3	0.22
c (t/m <sup>2</sup> )	1.0	2.0	2.0	0.1	30	220
$\phi$ (°)	25	5	7	30	35	40

## 3. 주변지반 및 구조물에 미치는 영향

본 연구의 수치해석은 크게 두 가지의 과정으로 분류될 수 있다. 하나는 그림 1에서 그림 4와 같이 인접구조물에 미치는 영향을 파악하기 위한 것이고, 다른 하나는 그림 7 및 그림 8과 같은 인접구조물이 없는 원지반에서 1공 또는 5공을 주입함으로써 주변지반의 수직·수평 변위 및 방사방향 응력분포를 파악하기 위한 것이다.

그림 1 및 그림 3은 PHC 파일로 지지된 인접구조물로부터 3.8m 이격된 지점에 1차 주입공의 천공 및 주입을, 그림 2와 그림 4는 인접구조물로부터 5.8m 이격된 거리에 2차 주입을 위한 천공 및 주입을 묘사한 것이다.

이와 같은 주입으로 인한 PHC 파일이 받는 전단력은 물론, 수평변위를 파악함으로써 파일 및 상부 구조물에 대한 안정성 검토가 실행되었다.

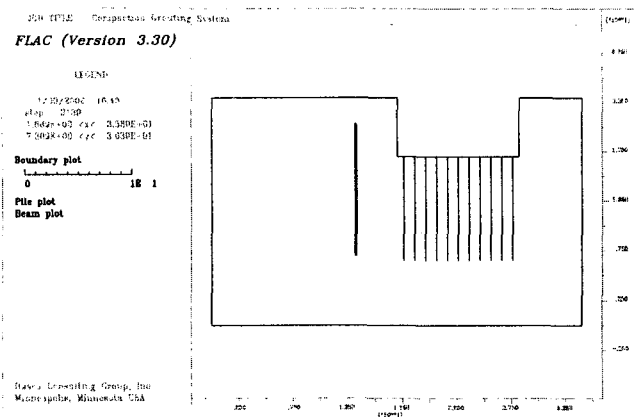


그림 1. 1차 주입공 천공

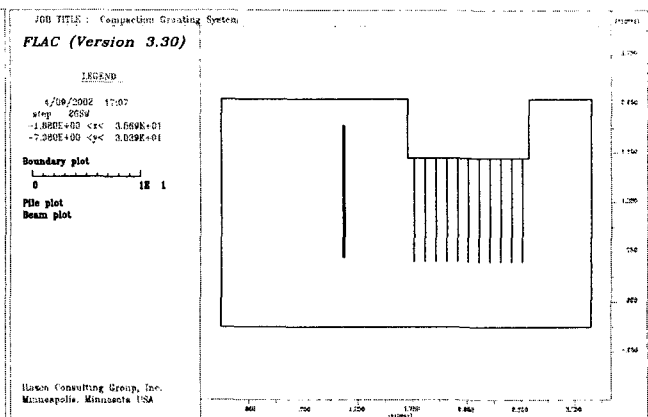


그림 2. 2차 주입공 천공

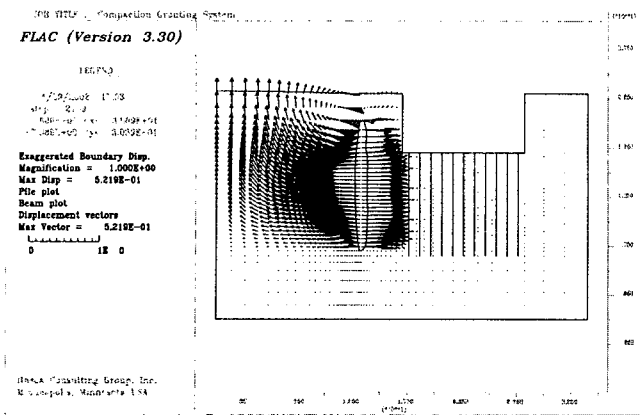


그림 3. 1차 주입 후 변형 및 변형 Vector

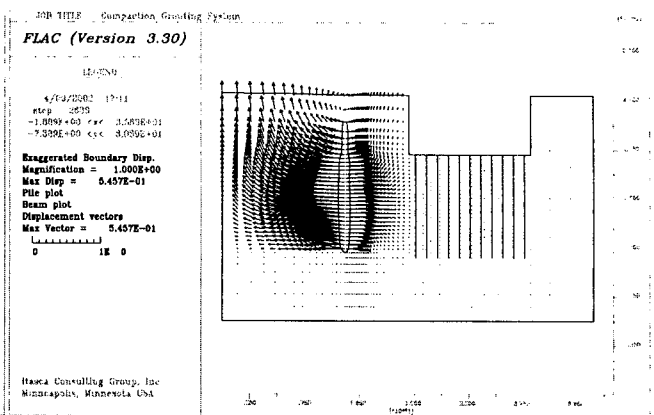


그림 4. 2차 주입 후 변형 및 변형 Vector

### 3.1 침하 · 융기특성 검토

ø800mm의 저유동성 몰탈주입으로 인한 주변지반의 최대 융기량은 37.13cm로 나타났다. 이와 같이 비교적 큰 융기량을 나타낸 것은 맥상고결이나 침투주입, Jet Grouting의 배출치환이 아닌 본 공법의 가장 큰 특징인 '비배출치환'에 기인 한 것으로 판단된다.

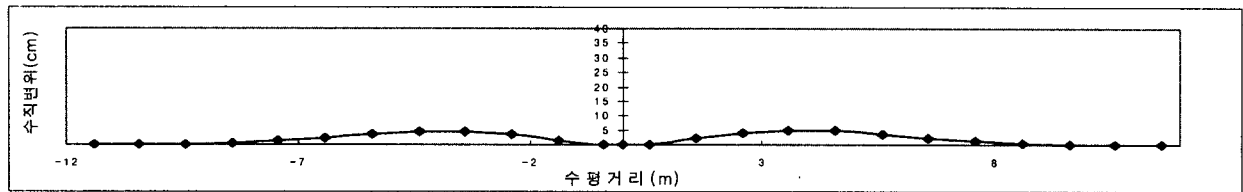


그림 5. 1공 주입에 의한 주변지반 침하/융기량

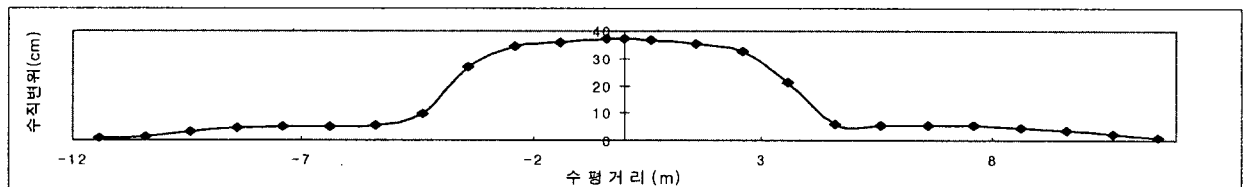


그림 6. 5공 주입에 의한 주변지반 침하/융기량

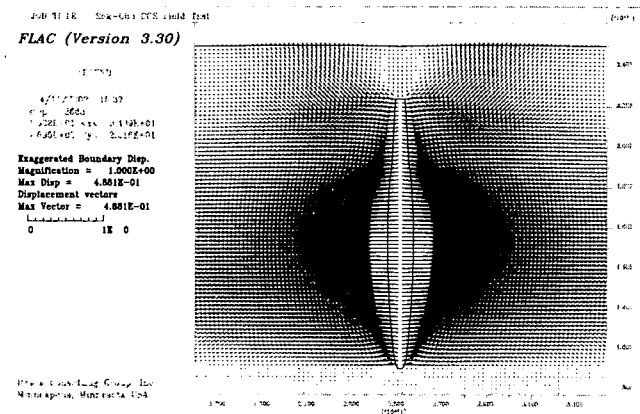


그림 7. 1공 주입시의 변형 및 변형 Vector

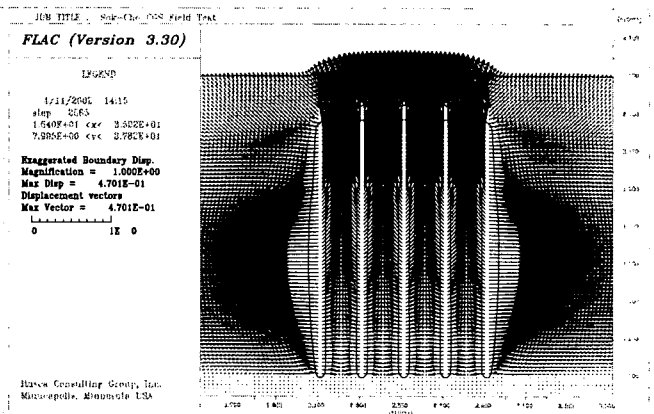


그림 8. 5공 주입시의 변형 및 변형 Vector

### 3.2 방사방향 수평변위 및 수평응력특성

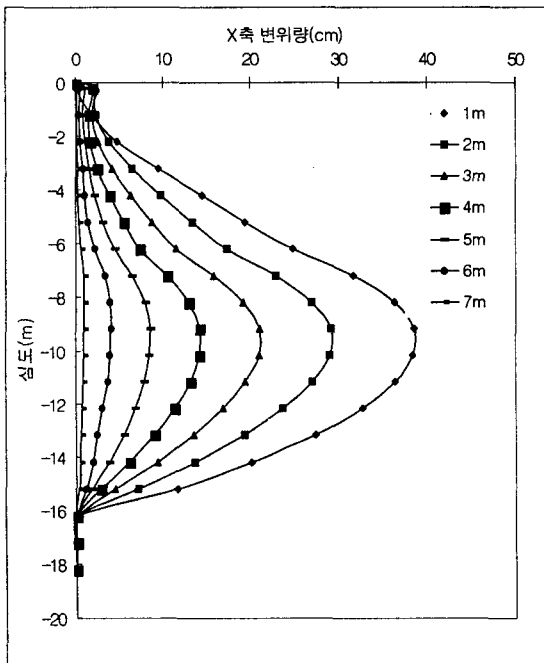


그림 9. 이격거리별 수평변위 특성

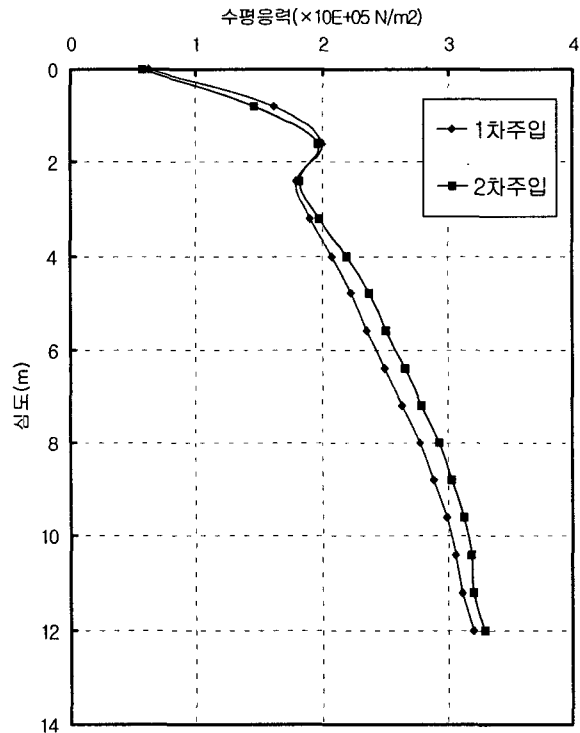


그림 10. 구체중심에서 2.0m 이격거리의 심도별 주입별 수평응력

저유동성 몰탈주입에 따른 지중 수평변위특성을 파악하고자 그림 7의 해석을 이용하여 천공지점으로부터 각각 1m, 2m, 3m, 4m, 5m, 6m, 7m의 이격거리별 수평변위 측정하였으며, 그 결과는 그림 9와 같다.

그림 9에 나타난 바와 같이 저유동성 몰탈주입으로 인한 이격거리별 수평변위특성을 살펴보면  $\phi = 800\text{mm}$ 로 할 경우, 7m의 이격거리에서는 주입에 의한 수평변위가 거의 발생하지 않았으며, 한계이격거리 2.0m에서 최대 29.05cm로 나타났다.

한편, 저유동성 몰탈주입구체 중심으로부터 2.0m 이격된 지점의 수평응력을 검토한 결과, 그림 10과 같이 32.72~33.60t/m<sup>2</sup>정도로 나타났다(1차 주입 후 의한 최대 수평응력  $3.206 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 32.72 \text{ t/m}^2$  2차 주입 후 의한 최대 수평응력  $3.293 \times 10^5 \text{ N/m}^2 = 33.60 \text{ t/m}^2$ ).

### 3.3 건물의 파일에 미치는 영향

저유동성 몰탈주입으로 형성된 원주상 고결체에 의해 밀려난 토사는 방사방향으로의 거동을 나타내게 되며, 이로 인한 수평응력은 아파트건물의 말뚝(PHC 말뚝)에 있어 말뚝 축방향에 직각으로 작용하는 외력으로 작용하게 된다. 말뚝기초는 축방향의 하중에 대해서는 큰 강도를 나타내지만 축방향과 직각방향으로 작용하는 하중에 대해서는 약하므로 수평응력으로 인한 구조물 기초의 영향검토가 필요하다.

그림 11은 1개소의 저유동성 몰탈주입시 주입압에 의하여 약 3.8m 이격된 인접구조물의 말뚝기초에 작용하는 전단력을 해석한 결과이며, 그림 12는 시험시공시 2개소의 저유동성 몰탈주입에 의하여 말뚝에 작용하는 전단력을 해석한 결과이다.

1개소의 저유동성 몰탈주입시 주입압에 의하여 말뚝에 작용하는 전단력은  $2.527 \times 104\text{N} = 2.58\text{ton}$ 으로

나타났으며, 2개소의 저유동성 몰탈주입에 의하여 말뚝에 작용하는 전단력은  $3.756 \times 10^4 \text{N} = 3.83 \text{ton}$ 으로 나타났다. 따라서, 이와 같은 수평응력발생 특성을 고려한 주변지반 및 구조물의 영향을 최소화할 수 있는 대책의 수립이 필요한 것으로 판단된다.

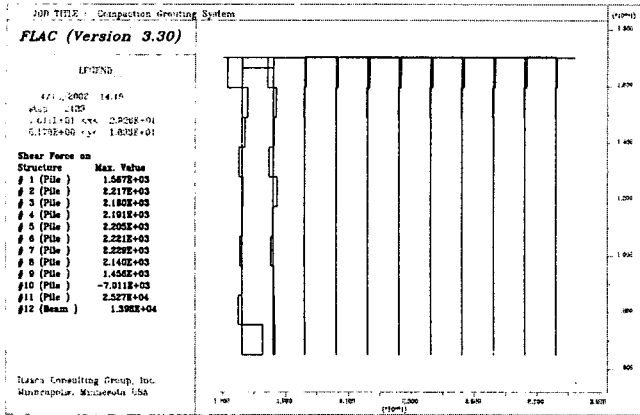


그림 11. 말뚝기초에 작용하는 전단력(1차 주입)

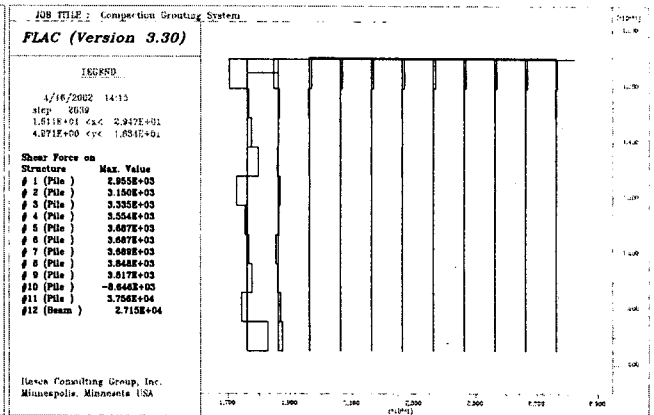


그림 12. 말뚝기초에 작용하는 전단력(2차 주입)

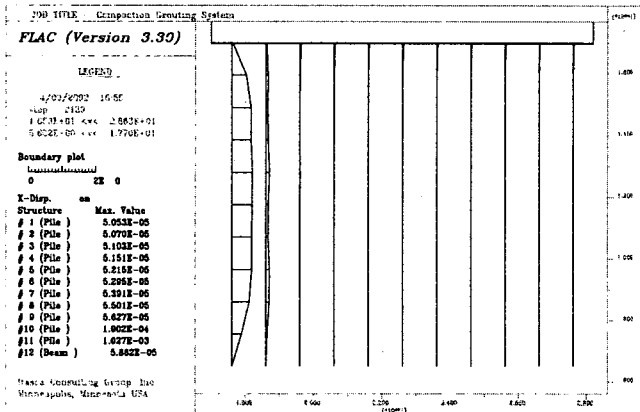


그림 13. 1차 주입에 의한 Pile의 변형량  
(최대  $1.027 \times 10^{-3} \text{m}$ )

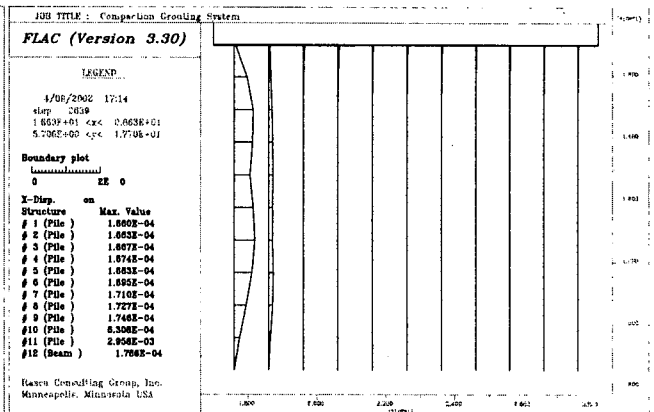


그림 14. 2차 주입에 의한 Pile의 변형량  
(최대  $2.958 \times 10^{-3} \text{m}$ )

수평응력으로 인한 구조물 기초의 영향검토는 다음과 같다.

< 저유동성 몰탈주입에 의한 말뚝기초의 안정조건 >

- 저유동성 몰탈주입에 의한 방사방향으로의 발생 수평응력 :  $\tau$

$\phi=800\text{mm}$ 로 하여 인접구조물이 2.0m 이격 조건인 경우

① 1공의 저유동성 몰탈주입주입시

$$\text{작용응력}(\tau_1) = 32.72 \text{ t/m}^2$$

② 2공의 저유동성 몰탈주입주입시

$$\text{작용응력}(\tau_2) = 33.60 \text{ t/m}^2$$

- PHC 말뚝의 허용전단응력 :  $\tau_a$

$$\tau_a = 0.25\sqrt{f_{ck}}, \quad f_{ck} = 800 \text{ kg/cm}^2$$

$$\tau_a = 0.25\sqrt{f_{ck}} = 0.25\sqrt{800} = 7.07 \text{ kg/cm}^2 = 70.7 \text{ t/m}^2$$

$$\therefore \tau_1 < \tau_a, \tau_2 < \tau_a \text{ (O.K)}$$

수치해석결과와 시공성 등을 고려하여 저유동성 몰탈주입중심으로부터 2.0m 이격조건인 경우 구체의 직경이  $\phi 800\text{mm}$ 이고 매립층의 층후가 약 5m정도임을 고려하여 케그리(Kögler)의 지반내 응력을 구하는 원리를 역으로 이용하여 평가할 수 있다. 건물과 인접한 개량지역에서의 현장조건과 저유동성 몰탈주입 개량체의 단면조건을 나타내면 그림 15와 같다.

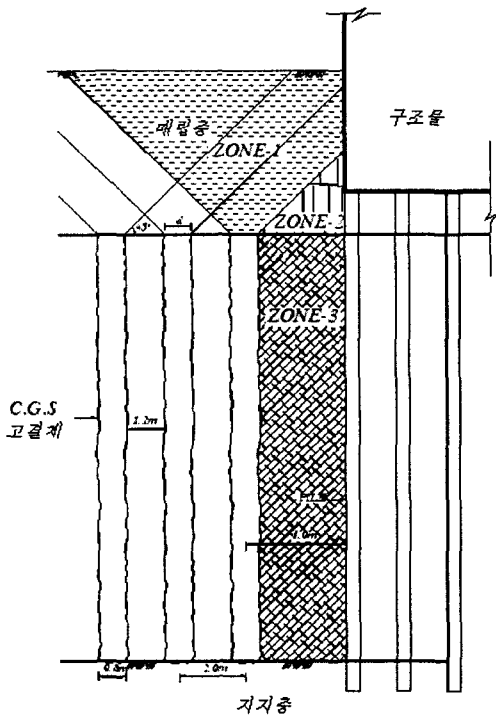


그림 15. 주변지반의 저유동성 몰탈주입개량체에 의한 상호거동

그림에서와 같이 구체에 의한 상부 매립토층의 하중 지지범위는 지반구조의 상호작용에 의해 매립층 전구간을 포함(ZONE 1)하게 되므로 미개량시와 비교하여 연약지반 상부지반에 미치는 매립토층의 하중은 크게 감소(ZONE 2의 하중으로 감소)할 것이다. 또한, 저유동성 몰탈주입시 말뚝주변지반(ZONE 3)에서의 방사방향 압축효과는 고결체의 말뚝 지지효과와 주변지반의 개량이 복합적으로 거동하는 복합지반효과에 의해 예상되는 압밀침하는 크게 억제될 것이다. 또한, 개량지역이 협소하여 저유동성 몰탈주입을 1~2열 배치하는 지역에서도 동일하게 평가될 수 있는 사항으로 저유동성 몰탈주입으로 인한 주변지반과의 복합지반효과에 의해 개량지역 및 주변지역은 뛰어난 지지력 증대효과에 더불어 발생 침하량을 크게 억제시켜 부등침하에 의한 영향은 매우 작을 것으로 판단된다.

### 3. 결론

- (1) 주입으로 인한 주변지반의 최대 용기량은 37.13cm로 나타났다. 이와 같이 비교적 큰 용기량을 나타낸 것은 맥상고결이나 침투주입, Jet Grouting의 배출치환이 아닌 본 공법의 가장 큰 특징인 '비배출치환'에 기인 한 것으로 판단된다.
- (2) 주입으로 인한 이격거리별 수평변위특성을 살펴보면, 7m의 이격거리에서는 주입에 의한 수평변위가 거의 발생하지 않았으며, 한계이격거리 2.0m에서 최대 29.05cm로 나타났으며, 구체 중심으로부터 2.0m 이격된 지점의 수평응력을 검토한 결과 1차 주입 후 32.72t/m<sup>2</sup>, 2차 주입 후 33.60t/m<sup>2</sup>로 나타났다.
- (3) 주입압에 의하여 약 3.8m 이격된 인접구조물의 말뚝기초에 작용하는 전단력을 해석한 결과, 1공 주입시 말뚝에 작용하는 전단력은 2.58ton으로 나타났으며, 2공 주입시 3.83ton으로 나타났다. 따라서, 이와 같은 수평응력발생 특성을 고려한 주변지반 및 구조물의 영향을 최소화할 수 있는 대책의 수립이 필요한 것으로 판단된다.
- (4) 방사방향응력으로 인한 주변 구조물 기초의 영향성 검토 결과, 허용치에 모두 만족하는 것으로 나타난 근접시공에 대한 말뚝기초의 안정성은 충분한 것으로 나타났다.

### 참고 문헌

- (1) 천병식(1998a), "지반공학 -이론과 실제-", 구미서관, pp. 684~729.
- (2) 천병식(1998b), "최신 지반주입 -이론과 실제-", 원기술, pp. 17~37.
- (3) "Fast Lagrangian Analysis of Continua Version 3.3 User's Manual", Itasca Consulting Group.

Inc.