한국지반공학회논문집 제23권 4호 2007년 4월 pp. 169 ~ 183

연약지반의 쇄석다짐말뚝에 대한 거동 분석 (I)

The Behavior of Rammed Aggregate Piers (RAP) in Soft Ground (I)

배 경 태[1] Bae, Kyung-Tae
이 종 규[2] Lee, Chong-Kyu

Abstract

Numerical analysis was performed to investigate the behavior of rammed aggregate piers (RAP) in soft ground with various interface conditions, area replacement ratio, aspect ratio and surcharge loads of pile and soil. And field modulus load test was carried out to predict the input parameters. Field prototype (unit cell) tests are in progress to compare the result of numerical analysis. Also a modified load transfer equation of RAP on soft foundation was proposed. According to the results, the behavior of RAP depended on such as interface conditions, settlement characteristics (free strain) and stress concentration ratio. On the other hand, maximum stress concentration ratio increased as area replacement ratio and aspect ratio increased, and it was remarkably affected by surcharge loads.

요 지

쇄석다짐말뚝으로 보강된 연약지반 상 기초지반의 침하특성과 하중분담효과를 구명하기 위하여 말뚝과 지반의 경계면 조건, 치환율, 형상비 및 상재하중 등을 고려하여 말뚝의 입력물성치 산정을 위한 현장재하시험과 수치해석을 수행하였고 본 연구의 해석결과와 비교, 검증하기 위하여 현장원형(prototype)시험을 진행 중에 있다. 아울러 기존의 SCP에 대한 탄성 하중전이 이론을 보정하여 수정식을 제안하였다. 해석결과 연성기초에 설치된 쇄석다짐말뚝의 경우 강성기초와는 다르게 경계면 조건에 따라 크게 영향을 받으며 침하특성은 자유변형률(free strain)로 인하여 말뚝은 감소하고 주변지반은 증가하는 경향을 보였으며 응력집중비는 말뚝 하부로 내려감에 따라 증가하였다. 또한 치환율과 형상비 증가에 따라 최대 응력집중비가 증가하나 어느 한계 이상에서는 수렴되었고 고치환율과 긴 말뚝에서는 상재하중 증가에 따른 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

Keywords : Field modulus load test, Free strain, Numerical analysis, Rammed aggregate piers

1. 서 론

용지면적의 부족으로 인하여 연약지반 개량의 필요성이 점증되고 있다. 조립토 다짐말뚝공법은 다양한 연약지반 처리방법 중 상부구조물 하중을 지지하기 위한 연약지반 보강에 효율적이고 경제적인 공법으로 알려져 있으며, 국내에서는 이 중 모래다짐말뚝공법(SCP)이 많이 활용되고 있으나, 모래자원의 고갈과 단가상승으로 인해 적용이 제한되고 있어 대체공법이 필요한 실정이다. 쇄석다짐말뚝(Rammed Aggregate Piers, RAP)은 그림 1과 같이 시공 시 타격에 의한 반복다짐으로 쇄석의 횡방향 응력을 증가시켜 주변지반의 전단저항력을 증가시키고 배수를 용이하게 함으로서 침하량 저감 및 침하시간을 앞당겨 공기를 단축시킬 수 있는 공법(Fox

1 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil and Environmental Engrg., Dankook Univ., kyungtaebae@hanmail.net, 교신저자)
2 정회원, 단국대학교 토목환경공학과 명예교수 (Member, Emeritus Prof., Dept. of Civil and Environmental Engrg., Dankook Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 10월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

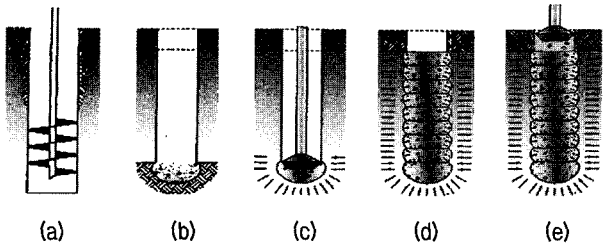
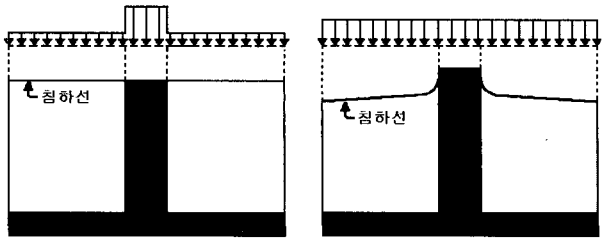


그림 1. 쇄석다짐말뚝의 개요(Fox and Cowell, 1988)



(a) 일정변형률 (b) 자유변형률

그림 2. 복합지반에서의 응력-침하 관계(김재권 등, 2004)

and Cowell, 1988)이다. 유럽 및 미국 등의 경우 기초지반의 지지력 증대와 침하량 감소를 위한 쇄석다짐말뚝 공법이 개발되어 사용되고 있으나, 국내의 경우 그 연구가 진행 중에 있고 현장시험 및 실제시공 사례가 거의 없어 실무에서 적용이 쉽지 않다(해양수산부, 2001).

조립토다짐말뚝에 관한 연구로 Balaam and Booker (1981), Barksdale and Bachus(1983)는 하나의 말뚝과 그 말뚝이 영향을 미치는 영향원을 하나의 단위로 묶는 단위셀(unit cell) 개념을 도입하여 말뚝과 지반의 강성차이에 의한 응력집중비(stress concentration ratio)를 제안하였다. 한편, 복합지반의 거동을 해석하는데 있어서 현재까지의 이론은 개량지반의 침하가 조립토다짐말뚝과 주변지반이 같은 크기로 일어난다고 가정한 일정변형률(equal strain) 조건하에 발전하여 왔다. 그러나 연약지반에 건설되는 도로, 철도 등과 같은 성토사면 기초로 활용되는 쇄석다짐말뚝의 경우 자유변형률(free strain)로 인하여 말뚝과 주변지반으로 하중이 분산되므로 이에 따른 하중분담효과 구명이 필요한 실정이다(그림 2). 이에 관하여 최근 Alamgir 등(1996)과 Poorooshasb 등(1996)이 탄성적인 해석을 통한 SCP 및 지반의 응력-침하에 관한 식을 제시한 바 있다. 또한 Alamgir 등(1996)은 해석적 방법을 통하여 연약지반의 설계에서 응력집중비를 적용할 때 단일 값을 사용하는 것은 합리적이지 않으며, 예측에 있어서 상당한 오류를 범할 수 있다고 하였다. 국내에서의 관련된 연구로는 천병식(2004)이 쇄석다짐말뚝(RAP) 복합지반의 지지력 및 파괴거동에 관하여 모형토조실험을 통하여 고찰하였고 유승경(2003)은 모형실험을 통하여 복합지반의 역학거동은 모래말뚝이나 점토지반 중 어느 하나에 좌우되는 것이 아니라 상호간의 역학거동에 의해 결정되며 그 중 가장 큰 영향을 미치는 요소 중의 하나로 응력집중비를 제안하였다. 이민희 등(2003)은 일정변형률 상태에서의 재하시험을 통한 쇄석다짐말뚝의 치환율, 응력분담비 관계를 분석하였고, 김재권 등(2004)은 실내시험과 유한요소해석을 수행하여 기초지반이 자유변형률 상태로 변형이 일어날 때 저치환율 SCP의 하중전이특성을 고찰하고 실험치와의 검증을 통하여 하중전이 특성평가를 위한 간편법을 제시하였다. 한편 배우석 등(2006)은 저치환율의 SCP로 개량된 복합지반에서 SCP와 주변지반 사이의 일정변형률과 자유변형률 조건을 모사하여 응력분담효과를 평가하기 위하여 원심모형실험을 수행하였다.

현재 대부분의 조립토다짐말뚝에 관한 연구들은 말뚝 자체의 지지력, 침하에 관한 연구가 대부분이고 말뚝과 지반의 복합지반에 관한 연구 또한 강성기초에 설치된 말뚝과 지반의 일정변형률 상태에 대하여 한정되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 국내 연약지반 성토체 등의 연성기초에 설치되는 쇄석다짐말뚝의 적용을 위하여 현장재하시험과 말뚝과 지반의 경계면 조건을 고려한 수치해석을 통해 기존의 강성기초의 거동과 비교한 후 쇄석다짐말뚝에 가장 큰 영향을 미치는 치환율, 형상비와 상재하중에 따른 침하특성과 하중분담효과를 구명하고 Alamgir 등(1996)이 제안한 SCP에 대한 탄성 하중전이 이론을 보정하여 탄소성 지반에서의 연성기초에 설치된 쇄석다짐말뚝의 하중전이 수정식을 제안하였다.

2. 연구동향

2.1 단위셀(Unit Cell)

단위셀 개념은 군말뚝 형태의 조립토다짐말뚝의 지지력과 침하해석을 수행하기 위하여 사용되어 왔다. 등변 삼각형 배치 형태의 군말뚝을 그림 3(a)에 나타내었다. 각각의 말뚝이 분담하는 면적은 육각형 형태이며 그림 3(b)와 같이 유효직경(d_e)을 갖는 단위셀이 대략 하나의 말뚝이 분담하는 면적을 나타낸다. 단위셀의 유효직경(d_e)은 식 (1)과 같이 구할 수 있다(Barksdale and

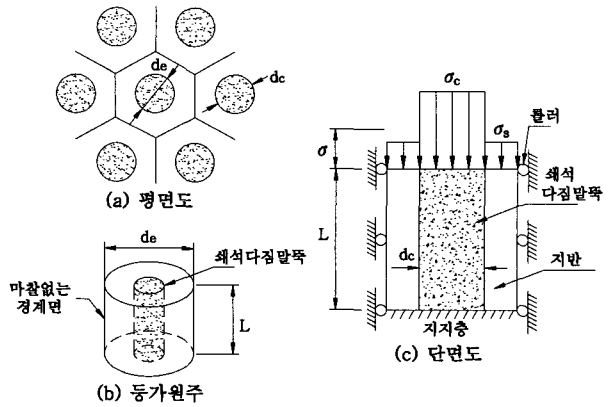


그림 3. 단위셀 개념(Barksdale and Bachus, 1983)

Bachus, 1983).

$$d_e = c_g \cdot s_c \tag{1}$$

여기서, d_e는 단위셀 유효직경이고, s_c는 말뚝의 간격이며, c_g는 계수(정삼각형 배열 : 1.05, 정사각형 또는 평행사변형 배열 : 1.13, 정육각형 배열 : 1.29)이다.

2.2 치환율과 응력집중비

조립토다짐말뚝으로 치환된 흙의 체적은 지반개량 효과에 중요한 영향을 미친다. 치환율(area replacement ratio), A_s는 쇄석다짐말뚝의 영향면적에 대한 쇄석으로 치환된 면적의 비로다음과 같이 정의한다(Balaam and Booker, 1981).

$$A_s = \frac{A_c}{A} = C_1\left(\frac{d_c}{s_c}\right)^2 \tag{2}$$

여기서, A_c는 다진 후에 말뚝의 면적, A는 단위셀 내의 전체면적, d_c는 말뚝의 직경, s_c는 말뚝의 중심 간격 그리고 C_1은 쇄석말뚝의 배치형태에 관한 상수(사각형 배치 $C_1 = \pi/4$, 등방삼각형 배치 $C_1 = \pi/2\sqrt{3}$)이다. 한편, 조립토다짐말뚝으로 보강된 지반 위에 성토나 구조물 또는 기초의 푸팅이 놓인 경우 말뚝에 응력집중이 발생하게 되고 주변지반에는 응력이 감소하는데 이는 말뚝의 변형계수가 주변지반의 변형계수 보다 크기 때문이다. 응력집중비(stress concentration ratio), m은 식 (3)과 같이 표현될 수 있다(Barksdale and Bachus, 1983).

$$m = \frac{\sigma_c}{\sigma_s} \tag{3}$$

여기서, σ_c는 쇄석다짐말뚝의 응력이고 σ_s는 주변지반의 응력이다.

2.3 탄성 하중전이 이론 개요

Alamgir 등(1996)은 탄성 이론을 적용하여 간편하게 연성하중(flexible loading)을 받는 자유변형률 상태에서의 SCP의 깊이에 따른 연직응력을 산정하는 이론적 해석법을 제안하였다.

2.3.1 복합지반의 변위형태

가정된 말뚝-지반 시스템의 변형 형태와 좌표축을 그림 4에 나타내었다. 여기서 고려한 말뚝으로 보강된 지반의 변위형태는 다음의 식으로 표현된다.

$$w_{rz} = w_{cz} + \alpha_{cz}\,[r/a - e^{\beta c(r/a-1)}] \qquad \text{for } a \le r \le b \tag{4}$$

여기서, a와 b는 각각 말뚝과 단위셀의 반경, r은 말뚝으로부터 측정된 반경방향 거리, w_{rz}는 깊이 z와 반경방향 거리 r에서의 지반요소의 변위, w_{cz}는 깊이 z에서의 말뚝의 변위, α_{cz}와 β_c는 변위 매개변수이다.

식 (4)를 r에 대해 미분하고 전단탄성계수, $G_s = E_s/2(1+\nu_s)$로 치환하면 전단변형율, γ_{rz}와 전단응력, τ_{rz}는 다음과 같이 유도된다.

$$\gamma_{rz} = \frac{\delta w_{rz}}{\delta r} = \frac{\alpha_{cz}}{a}\,[1 - \beta_c e^{\beta_c(r/a-1)}] \tag{5}$$

$$\tau_{rz} = \frac{E_s \alpha_{cz}}{2a(1+\nu_s)}\,[1 - \beta_c e^{\beta_c(r/a-1)}] \tag{6}$$

하중과 기하학적 대칭으로 인하여 단위셀의 바깥쪽 경계면에서의 전단응력은 0이다. 즉, $r = b$에서 $\tau_{rz} = 0$. 이 조건을 식 (6)에 적용하고 α_{cz}이 0이 아니라면 다음

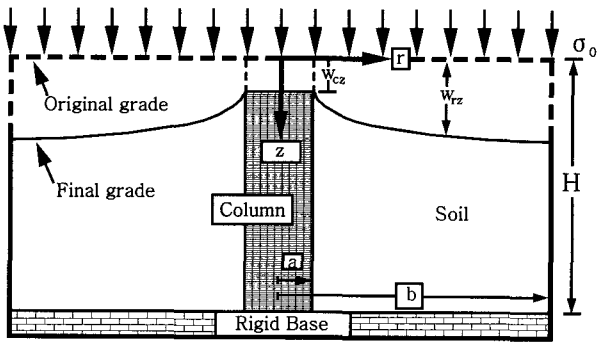


그림 4. 연성하중을 받는 복합지반의 변형 형태(Alamgir 등, 1996)

과 같이 된다.

$$\beta_c e^{\beta_c(n-1)} - 1 = 0 \tag{7}$$

2.3.2 말뚝의 응력

연약지반에 가해지는 균일한 하중은 말뚝과 주변지반의 강성과 기하구조, 접촉면의 전단응력에 따라 말뚝과 주변지반에 의하여 분담된다. 그림 5는 말뚝을 같은 두께, $\Delta H(=H/L)$를 가진 L개의 요소로 나누고 이때 말뚝의 j번째 요소에 가해지는 응력을 나타내고 있다. 요소의 연직력의 평형조건을 고려하면, 그림 5(b)에서 다음과 같이 유도된다.

$$(\sigma_{cz}+\Delta\sigma_{cz})\frac{\pi d_c^2}{4} - \sigma_{cz}\frac{\pi d_c^2}{4} - \tau_{az}\pi d_c \Delta z = 0 \tag{8}$$

$$i.e.\ \frac{d\sigma_{cz}}{dz} = \frac{4}{d_c}\tau_{az} \tag{9}$$

$r=a$에 대하여 식 (6)을 식 (9)와 결합하면 다음과 같다.

$$\frac{d\sigma_{cz}}{dz} = \frac{E_s(1-\beta_c)\alpha_{cz}}{a^2(1+\nu_s)} \tag{10}$$

따라서 식 (10)을 적분하면, 말뚝의 j번째 요소에 작용하는 연직응력은 다음과 같다.

$$\sigma_{cj+1} = \sigma_{cj} + \frac{(\Delta H/a)(1-\beta_c)E_s\alpha_{cj}}{a(1+\nu_s)} \tag{11}$$

여기서, σ_{cj}와 σ_{cj+1}은 각각 말뚝의 j번째 요소에 가해지는 상부와 하부의 연직응력이고, j는 1에서 L까지 변하며, α_{cj}는 변위 매개변수로 다음 식 (12)와 같다.

$$\alpha_{cj} = \frac{\left[\frac{\sigma_{sNj}}{E_s} - \frac{\sigma_{cj}}{E_c}\right]\Delta H}{(A_1+A_2+A_3)} \tag{12}$$

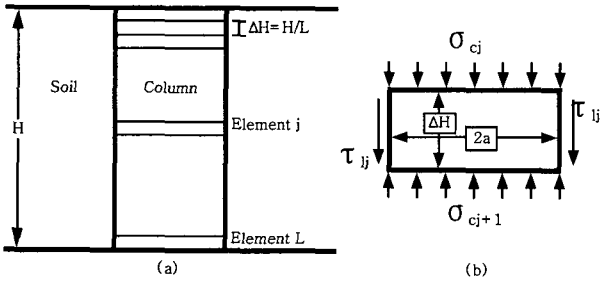


그림 5. (a) 분할된 말뚝 (b) 말뚝의 j번째 요소에 가해지는 응력

여기서,

$$A_1 = \frac{(\Delta H/a)^2(1-\beta_c)E_s}{2E_c(1+\nu_s)} \tag{13}$$

$$A_2 = \frac{(\Delta H/a)^2(n-\Delta R)[1-\beta_c e^{\beta_c(n-\Delta R-1)}}{4\Delta R(n-\Delta R/2)(1+\nu_s)} \tag{14}$$

$$A_3 = n - \Delta R/2 - e^{\beta_c(n-\Delta R/2-1)} \tag{15}$$

3. 현장시험

현장시험은 수치해석에 적용할 말뚝과 경계면 조건의 입력물성치 산정을 위한 현장재하시험(modulus load

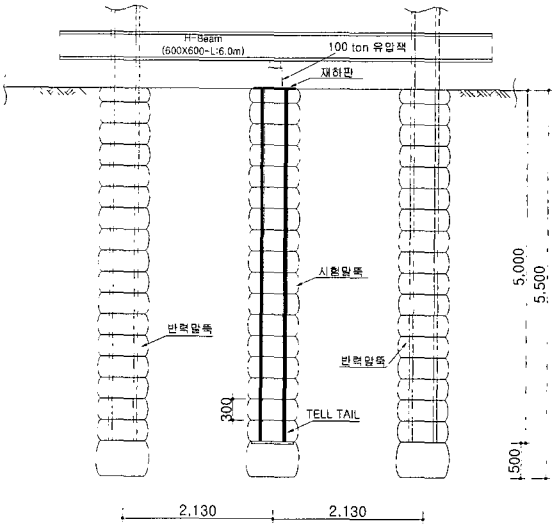


그림 6. 현장재하시험 단면도(modulus load test)

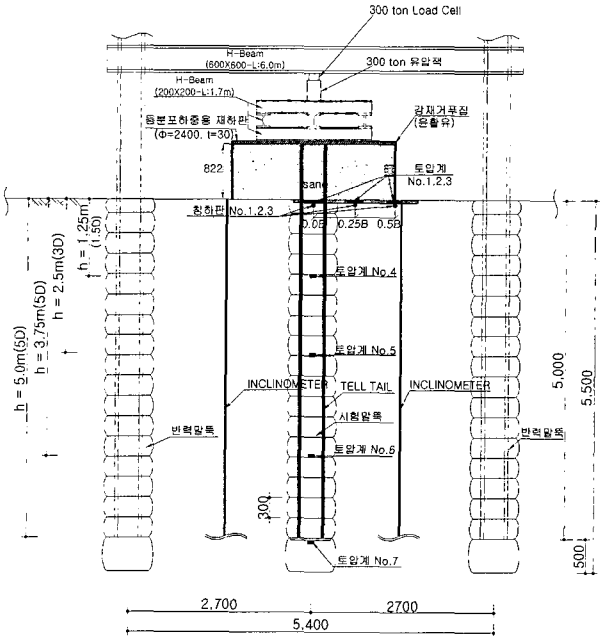


그림 7. 현장 원형(prototype)시험 단면도(unit cell test)

test)을 실시하였고, 본 연구에서 수행한 해석결과와 비교, 검증하기 위하여 현장원형(prototype)시험인 단위셀 시험(unit cell test)을 현재 수행 중에 있다. 그림 6과 7은 각각 현장재하시험과 단위셀 시험의 단면도이다.

3.1 현장재하시험

그림 6과 같이 수치해석에 적용할 쇄석다짐말뚝과 경계면 조건의 입력물성치 산정을 위하여 김해 인근지역의 연약지반 현장에서 현장재하시험을 실시하였다. 조사된 지반조건은 표 1(동아지질, 2006)과 같으며 쇄석다짐말뚝의 선단용 굵은 골재와 주면용 잔골재의 입도분포는 그림 8과 같다. 시험부지의 지반은 N치 5이하의 모래와 점토층으로 이루어진 연약지반이며, 쇄석다짐말뚝용 골재는 ASTM 규정에 따라 선단용 굵은 골재는 100mm 쇄석을, 주면용 잔골재는 25mm 이하 혼합골재를 사용하였다.

시험말뚝은 오거로 선 굴착한 후 선단용 굵은 골재(사진 1)를 50cm 투입하고 사진 3과 같은 특수 제작된 ramming 장비를 사용하여 초당 5회 다짐하며 이 후 주면용 잔골재(사진 2)를 30cm씩 투입하고 같은 방법으로 반복 다짐하였다. 말뚝은 길이 5.5m, 직경 76cm의 정사각형 배열로 설치간격 2.1×2.1m(치환율 10%)의 쇄석다짐말뚝(RAP)을 사용하였다. 재하시험 전에 사진 4와 같이 앵커식 반력말뚝을 시공하고 말뚝 하부의 침하량 측정을 위하여 telltale을 쇄석말뚝 다짐 전에 설치하였다.

시험하중은 설계하중 400kN의 150%까지 단계별 재하 하였고 쇄석다짐말뚝의 하중 증가에 따른 각각 말뚝의 상부와 하부에서의 침하량을 측정하여 그림 9에 나타

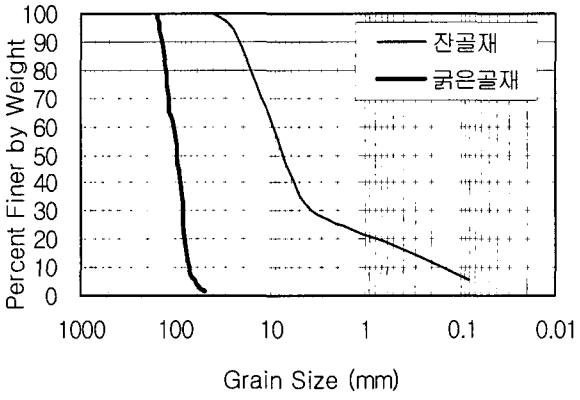


그림 8. 현장재하시험 골재의 입도분포곡선

사진 1. 선단용 굵은 골재

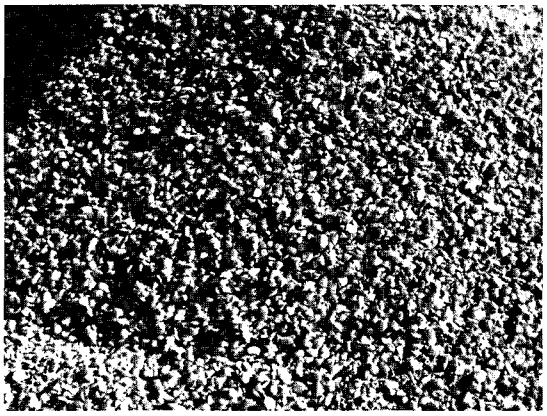


사진 2. 주면용 잔골재

표 1. 현장재하시험 지반조건과 수치해석에 적용한 쇄석다짐말뚝의 입력물성치

재료	모델	심도	N치	γ	E	ν	c	ϕ
		(m)	(blows)	(kN/m^3)	(kPa)		(kPa)	(°)
모래층	Mohr-Coulomb	3.2	5	18	1.0e4	0.35		28
점토층	Mohr-Coulomb	5.5	1	19	1.3e3	0.45	31.8	
풍화암	Elastic	7.9	50	21	5.0e5	0.20		
쇄석다짐말뚝	Elastic	5.5		20	5.4e5	0.40		
Interface	Coulomb의 파괴기준	k_n	k_s	ϕ	c	s		
		(kPa/m)	(kPa/m)	(°)	(kPa)	(m)		
	말뚝-모래 경계면	1.02e7	3.78e6	14		0.001		
	말뚝-점토 경계면	1.30e6	4.49e5		15.9	0.001		

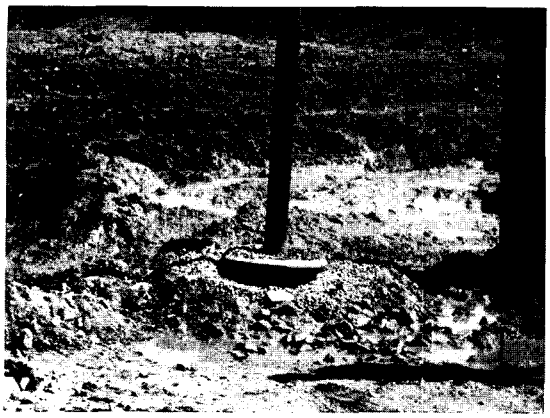


사진 3. 쇄석다짐말뚝 ramming 장비

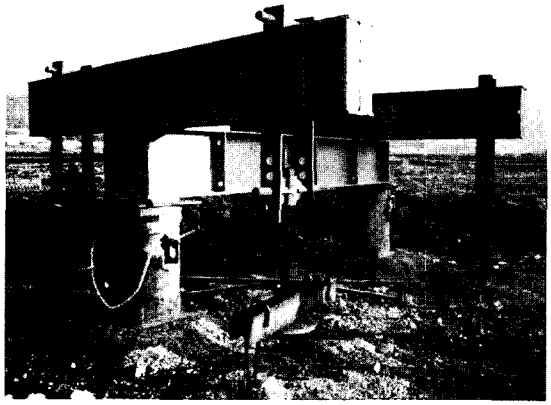


사진 4. 현장재하시험 전경

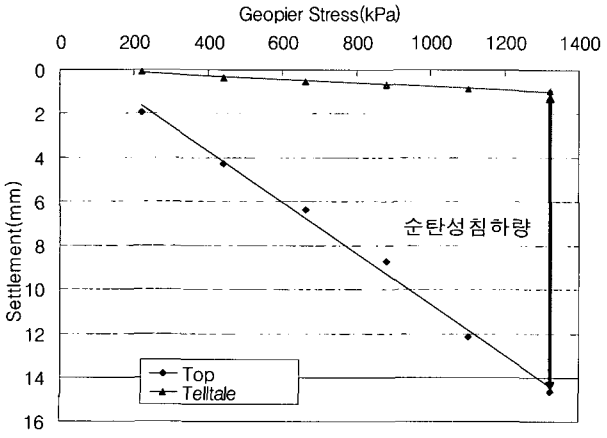


그림 9. 현장재하시험 결과

내었다. 그림에서와 같이 설계하중 구간 내 에서는 쇄석다짐말뚝의 상부와 하부에서 측정한 응력-변형 거동이 선형거동을 보임에 따라 상재하중이 600kN 작용한 경우 말뚝의 순 탄성침하량이 13.7mm 발생하였음으로 쇄석다짐말뚝의 탄성계수를 540,000kPa으로 적용하였다.

3.2 단위셀(Unit Cell) 시험

실제 자유변형률이 작용하는 연약지반에 설치된 쇄석다짐말뚝의 치환율에 따른 거동 분석을 위하여 현장 원형(prototype)시험인 단위셀시험을 현재 수행하여 본 연구 결과와 비교, 검증할 예정이다. 시험 조건은 그림 7과 같이 치환율 각각 10%와 20%에 대하여 단위셀 직경을 식 (1)과 같이 산정하였고 원형 강재거푸집을 제작하여 설치한 후 모래를 포설하고 등분포 하중을 재하하여 자유변형률 조건이 되도록 계획하였다. 각각 지표면에서 말뚝과 주변지반이 받는 하중과 침하량 측정은 미국 Geokon사의 total pressure cell과 settlement cell을 설치하여 측정하였으며 말뚝 깊이별 하중전이 특성을 파악하기 위하여 말뚝체 내에 토압계를 설치하였다. 또한 상재하중 작용 시 말뚝과 주변지반의 횡방향 bulging 영향을 측정하기 위하여 경사계를 매설하였다.

4. 수치해석

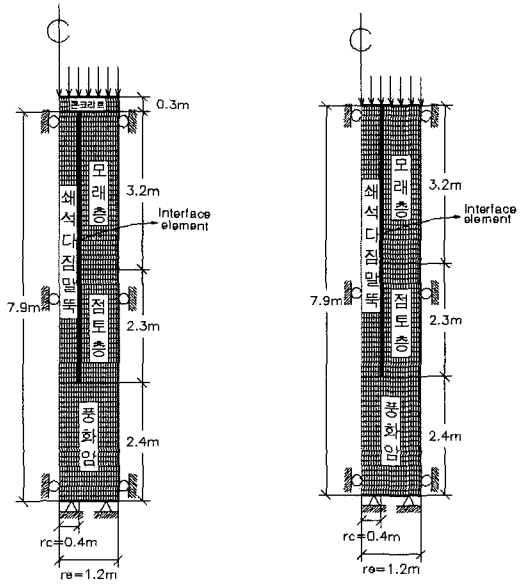
4.1 수치해석 조건

연성기초에 설치된 쇄석다짐말뚝과 주변지반의 경계면 조건, 치환율, 형상비 그리고 상재하중에 따른 침하특성과 하중분담효과를 고찰하기 위하여 표 2와 같은 조건으로 수치해석을 수행하여 강성기초에 설치된 쇄석다짐말뚝과 비교하였다. 축대칭(axisymmetric) 평면변형(plane strain) 해석으로 2차원 유한차분해석(FLAC)을 수행하였으며 수치해석 모델은 그림 9의 현장재하시험 결과를 적용하여 검증하였다. 지반조건은 표 1(동아지질, 2006)과 같으며 현장재하시험 결과를 역해석하여 말뚝과 경계면 조건의 입력물성치를 산정하였다.

해석모델의 요소망은 현장재하시험 조건을 기본으로 하여 모델링 하여 표 2의 해석조건 중 대표적으로 각각 강성과 연성기초에 설치된 말뚝의 길이 5.5m(형상비 7.2), 말뚝간격 2.1m(치환율 10%), 정사각형 배열, 말뚝반경(r_c) 0.4m, 등가유효반경(r_e) 1.2m의 말뚝과 지반의 경계면 조건 slip인 경우의 요소망을 그림 10에 나타내었다. 강성기초에 설치된 말뚝의 경우 상부에 콘크리트를 30cm 설치한 후 상재하중을 재하하고 연성기초의 경우에는 지표면에 직접 하중을 재하 하였다.

표 2. 수치해석 조건

쇄석다짐말뚝 조건	Interface	치환율 (%)	형상비 (말뚝길이)	상재하중 (성토고)
강성기초에 설치 (일정변형률 조건) 연성기초에 설치 (자유변형률 조건)	slip	5	3.9 (3.0m)	38kPa (2m)
		10	7.2 (5.5m)	76kPa (4m)
	non-slip	20	10.5 (8.0m)	114kPa (6m)
		40	13.8 (10.5m)	152kPa (8m)
				190kPa (10m)



(a) 강성/slip (b) 연성/slip

그림 10. 유한차분 요소망(치환율 10%, 형상비 7.2)

4.2 경계면 조건

말뚝과 지반의 경계면 조건은 non-slip과 slip 조건에 대하여 수행하였으며 여기서 slip 조건은 표 1과 같이 현장재하시험을 통하여 산정한 경계면 스프링 계수를 적용하였다(그림 11). 연직(k_n)과 전단(k_s) 강성 스프링은 근사적으로 식 (16)에 의해 산정하였고(Singh, 1973) 전단력의 한계 값은 식 (17)과 같이 Coulomb의 파괴규준을 적용하였다. 그림에서 S는 슬라이더, T는 인장강도, L_N과 L_M은 각각 그리드 포인트 N과 M과 관련된

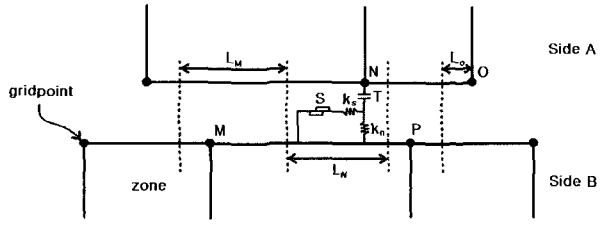


그림 11. 연직(k_n)과 전단(k_s) 강성 스프링에 의해 연결된 경계면 조건

길이, 점선은 경계면 영역을 나타낸다.

$$k_n = \frac{E \cdot E_c}{s(E_c - E)},\quad k_s = \frac{G \cdot G_c}{s(G_c - G)} \tag{16}$$

여기서, E와 G는 각각 지반의 변형계수와 전단탄성계수이고, E_c와 G_c는 각각 쇄석다짐말뚝의 변형계수와 전단탄성계수이며, s는 경계면 간격이다.

$$F_{smax} = cL + \tan\phi F_n \tag{17}$$

여기서, c는 경계면의 점착력이고 L은 그림 11의 경계면 유효접촉길이 이며, ϕ는 경계면의 내부마찰각이다. 경계면 요소의 점착력과 내부마찰각은 현장재하시험 결과를 활용하여 각각 인접지반 물성치의 1/2을 적용하여 해석하였다.

5. 침하특성과 하중분담효과

5.1 침하특성

기초의 변형조건(equal/free strain)과 경계면 조건에 따른 말뚝과 지반의 침하특성을 파악하기 위하여 강성과 연성기초에 설치된 말뚝에 대하여 각각 non-slip과 slip 조건을 적용하여 해석하였으며 현재 진행 중인 현장 원형(prototype)시험과의 비교를 위하여 본 연구에서는 단기 침하특성을 고찰하였다. 표 1과 같이 모래-점토-풍화암층으로 이루어진 지반에 쇄석다짐말뚝을 설치하고 제방 등의 성토하중 영향을 살펴보기 위하여 상재하중을 각각 38, 76, 114, 152, 190kPa을 재하 하였다. 이 중 치환율 10%, 형상비 7.2(말뚝길이 5.5m)인 조건에 대하여 각각 경계면 조건에 따른 강성기초에 설치된 말뚝과 주변지반에 대한 말뚝중심으로부터의 거리와 상재하중에 따른 침하특성을 그림 12(a), (b)에, 연성기초의 침하특성을 그림 12(c), (d)에 도시하였다.

그림 12(a), (b)에서와 같이 강성기초에 설치된 쇄석다짐말뚝의 경우 경계면 조건에 관계없이 말뚝과 지반

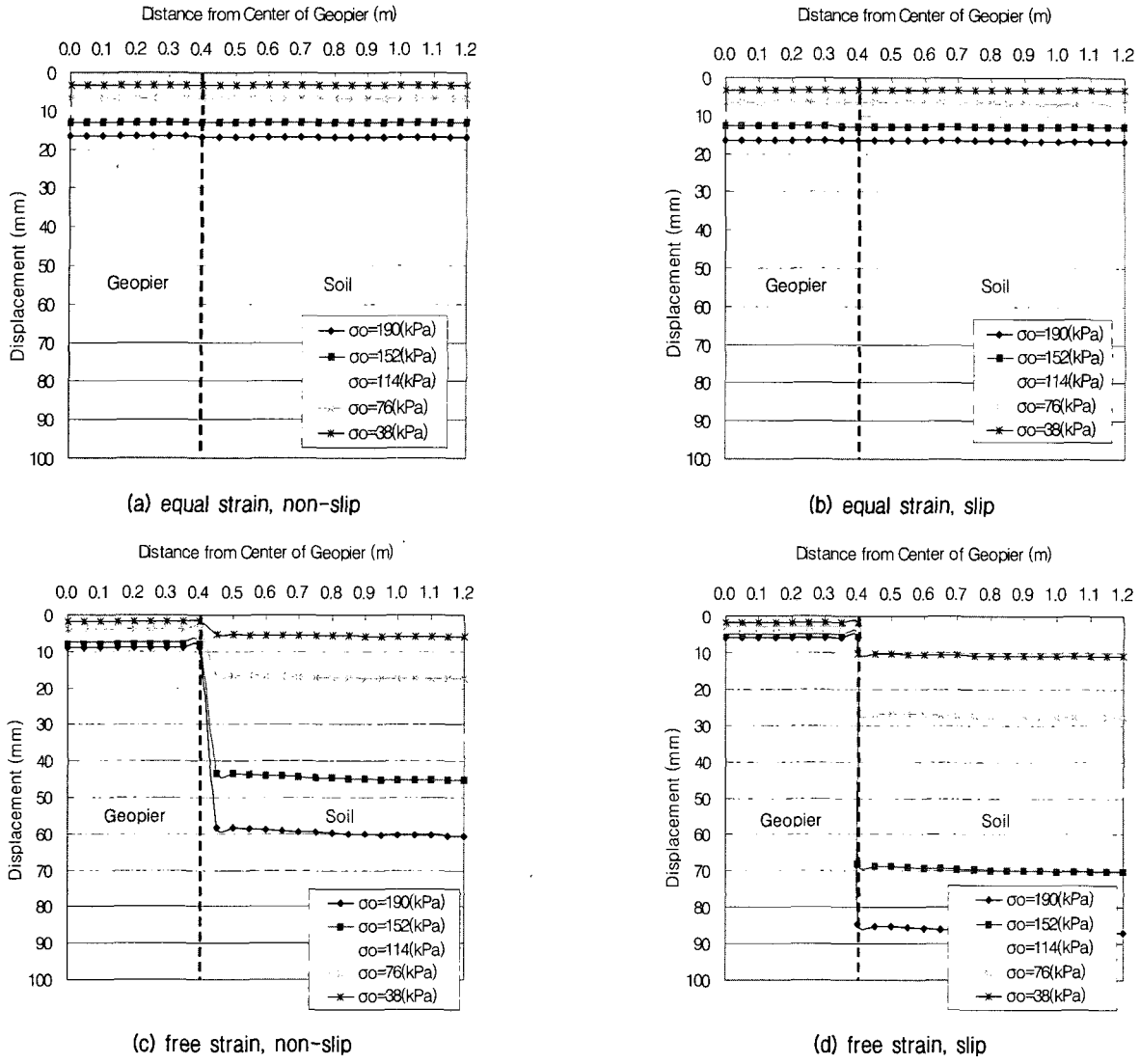


그림 12. 경계면 조건에 따른 강성기초와 연성기초의 침하특성

모두 상재하중 최대 190kPa을 재하 하였을 경우 말뚝과 지반 모두 침하량 17mm로 전형적인 일정변형률의 경향을 보이고 있다. 그러나 연성기초에 설치된 쇄석다짐말뚝의 경우 그림 12(c), (d)에서와 같이 자유변형률로 인하여 말뚝과 지반의 침하가 다르게 나타났으며 경계면 조건에 따라 slip 조건인 경우 말뚝과 지반의 경계면인 말뚝 중심으로부터 0.4m 지점에서 미끄러짐이 발생하여 말뚝의 침하량은 상재하중 190kPa을 재하 하였을 경우 non-slip 조건인 경우에 비해 최대 9mm에서 6mm로 감소하고 지반의 침하량은 최대 61mm에서 87mm로 증가함을 알 수 있다. 연성기초인 경우 강성기초와는 달리 자유변형률로 인하여 말뚝의 침하량은 감소하였으나 지반의 침하량이 상당히 증가하므로 실제 연약지반에 축조되는 도로 및 철도 등의 성토체와 같이 연성기초에 직접 쇄석다짐말뚝을 설치한 경우 이러한 침하특성을 고려해야 할 것으로 생각된다.

5.2 깊이별 응력변화

기초의 변형조건(equal/free strain)과 경계면 조건에 따른 말뚝과 지반이 받는 깊이별 응력변화를 살펴보기 위하여 강성과 연성기초에 설치된 말뚝과 지반에 대하여 각각 non-slip과 slip 조건을 적용하여 깊이별 응력의 변화를 살펴보았다. 표 1과 같이 모래-점토-풍화암층으로 이루어진 지반에 쇄석다짐말뚝을 설치하고 제방 등의 성토하중 영향을 살펴보기 위하여 상재하중을 각각 38, 76, 114, 152, 190kPa을 재하 하였다. 이 중 치환율 10%, 형상비 7.2(말뚝길이 5.5m)인 조건에 대하여 각각 경계면 조건에 따른 강성기초에 설치된 말뚝과 주변지반의 깊이별 상재하중에 따른 응력의 변화를 그림 13(a),

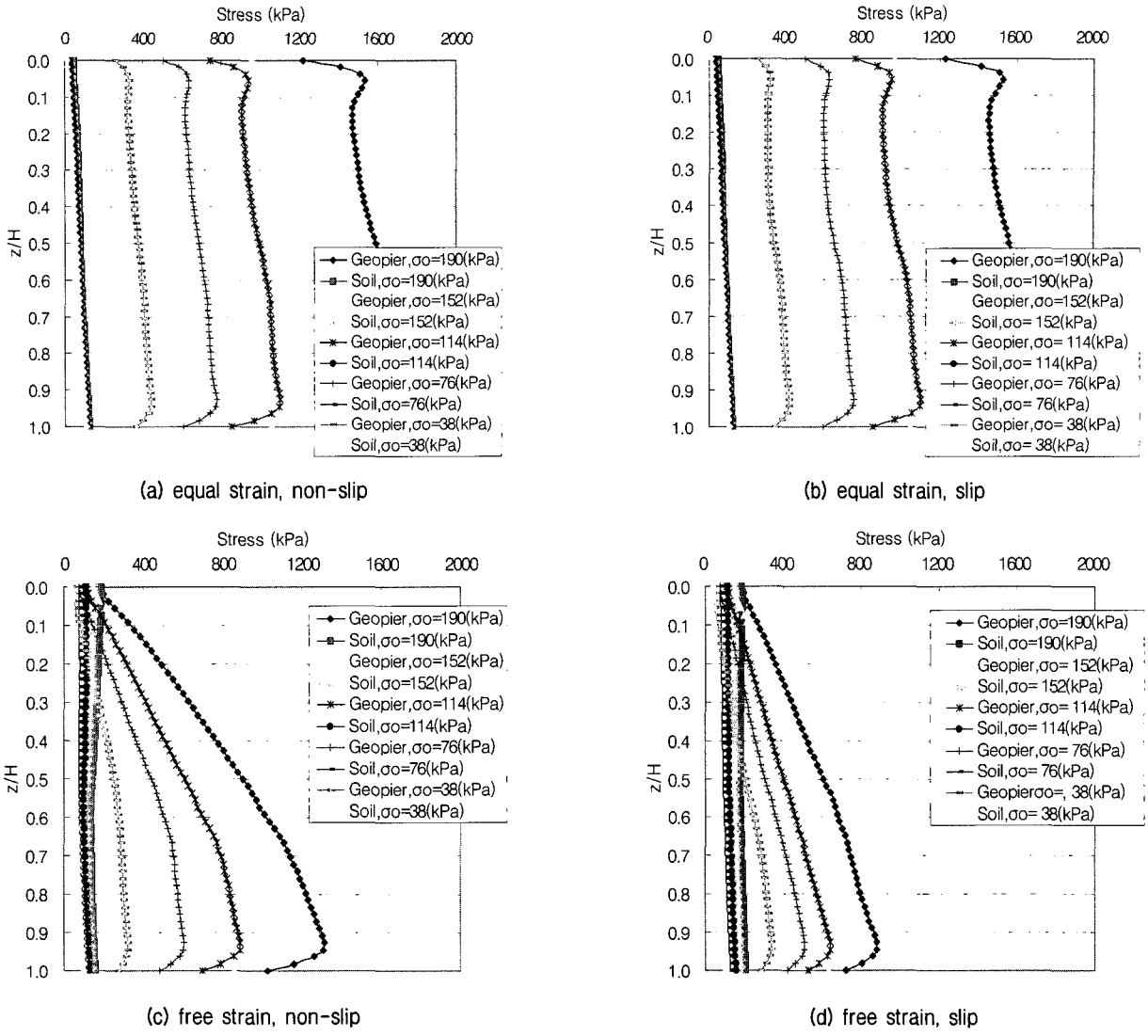


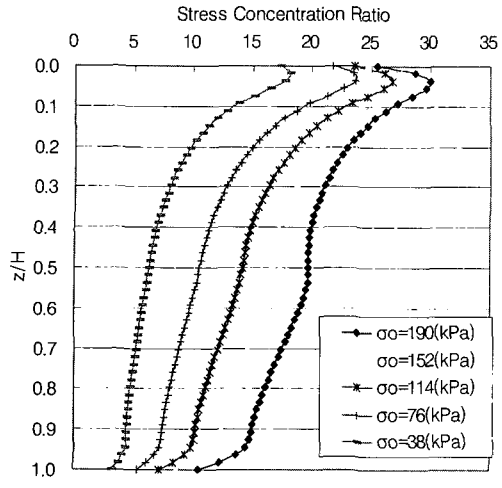
그림 13. 경계면 조건에 따른 기초와 지반의 깊이별 응력변화

(b)에, 연성기초의 응력의 변화를 그림 13(c), (d)에 도시하였다.

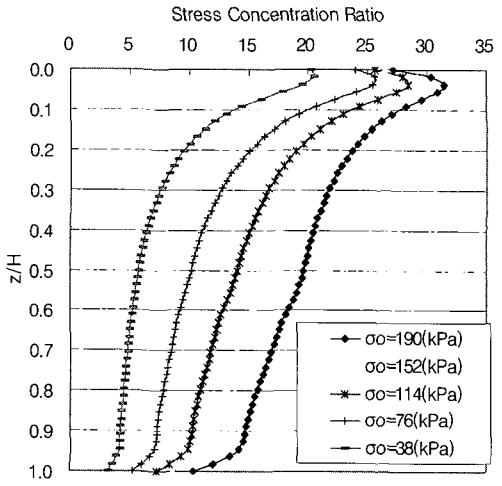
그림 13(a), (b)에서와 같이 강성기초에 설치된 쇄석다짐말뚝의 경우 경계면 조건에 관계없이 깊이별 응력변화가 일정한 경향을 보이며, 주어진 상재하중에 대해 지표면에서는 최대 6.8배, 말뚝 하부인 말뚝길이비(z/H) 0.93에서는 최대 11.5배로 대부분의 상재하중이 말뚝으로 전이되어 말뚝에 큰 응력이 집중되는 것을 알 수 있다. 그러나 그림 13(c), (d)에서와 같이 연성기초에 설치된 쇄석다짐말뚝과 지반의 경우에는 강성기초와는 다르게 자유변형률로 인하여 지표면에서는 주어진 상재하중과 말뚝, 지반이 받는 응력이 모두 같으며 하부로 내려감에 따라 말뚝이 받는 응력은 증가하고 지반이 받는 응력은 약간 감소함을 알 수 있다. non-slip인 경우 말뚝 하부인 말뚝길이비(z/H) 0.93에서 상재하중 38kPa의 약 8.5배, 190kPa의 약 6.9배를 말뚝이 받는 것으로 나타났으며, slip인 경우 상재하중 38kPa의 약 9배, 190kPa의 약 4.6배를 말뚝이 받는 것으로 나타났다. 연성기초인 경우 강성기초와는 달리 지표면에서는 경계면 조건에 관계없이 주어진 상재하중 그대로 말뚝이 응력을 받으며 말뚝 하부에서도 경계면 조건과 상재하중에 따라 다소 차이가 있으나 강성기초에 비해 작은 응력을 받음을 알 수 있었다.

5.3 하중분담효과

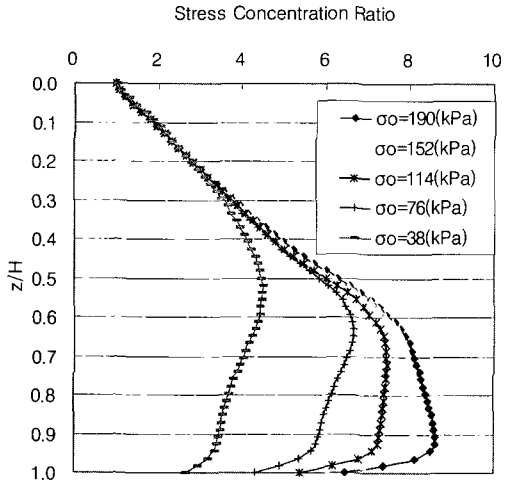
기초의 변형조건(equal/free strain)과 경계면 조건에 따른 말뚝과 지반의 하중분담효과를 살펴보기 위하여 강성과 연성기초에 설치된 말뚝과 지반에 대하여 각각 non-slip과 slip 조건을 적용하여 깊이별 응력집중비를



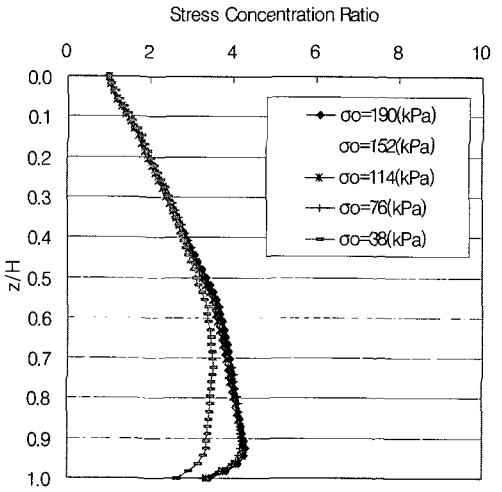
(a) equal strain, non-slip



(b) equal strain, slip



(c) free strain, non-slip



(d) free strain, slip

그림 14. 경계면 조건에 따른 강성기초와 연성기초의 응력집중비

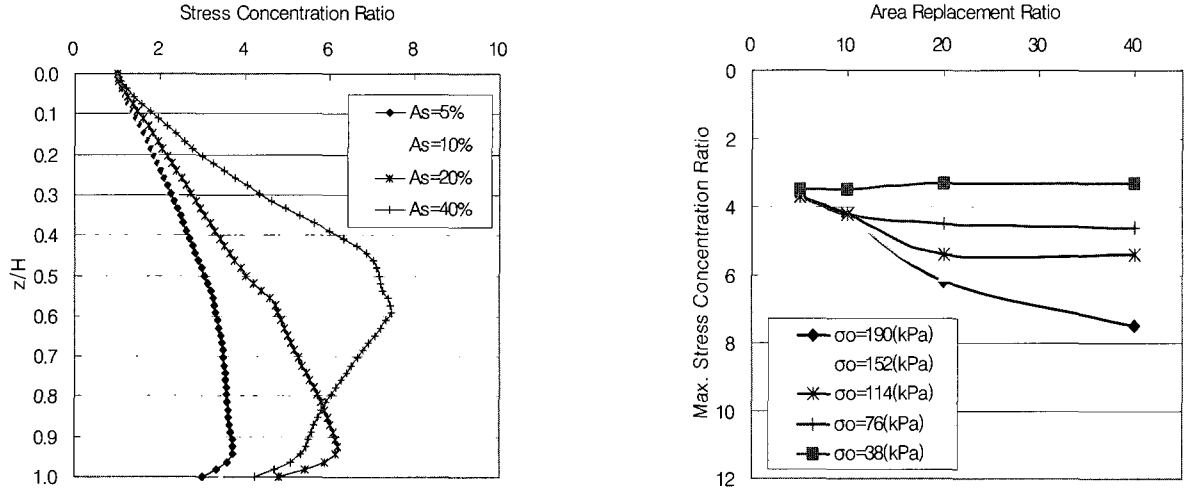
고찰하였다. 표 1과 같이 모래-점토-풍화암층으로 이루어진 지반에 쇄석다짐말뚝을 설치하고 성토하중 영향을 살펴보기 위하여 상재하중을 각각 38, 76, 114, 152, 190kPa으로 재하 하였다. 이 중 치환율 10%, 형상비 7.2(말뚝길이 5.5m)인 조건에 대하여 각각 경계면 조건에 따른 강성기초에 설치된 말뚝과 주변지반의 상재하중과 말뚝깊이에 따른 응력집중비를 그림 14(a), (b)에 도시하였고, 연성기초의 응력집중비를 그림 14(c), (d)에 도시하였다.

그림 14(a), (b)에서와 같이 강성기초에 설치된 쇄석다짐말뚝의 경우 경계면 조건에 관계없이 말뚝으로 응력이 집중되어 상재하중이 190kPa인 경우 응력집중비가 말뚝 상부인 말뚝길이비(z/H) 0.04에서 약 31.5로 최대값을 나타내며, 상부에서 최대가 되고 하부로 내려감에 따라 감소함을 알 수 있다. 그러나 그림 14(c), (d)에서와 같이 연성기초에 설치된 쇄석다짐말뚝의 경우에는 강성기초와는 다르게 자유변형률로 인하여 지표면에서는 말뚝과 지반이 받는 응력이 같아서 응력집중비가 1.0이 되고 하부로 내려감에 따라 증가하여 말뚝길이비(z/H) 0.94에서 최대값을 보임을 알 수 있었다. 또한 non-slip인 경우에 비해 slip 조건인 경우 상재하중이 190kPa인 경우 응력집중비가 말뚝 하부인 말뚝길이비(z/H) 0.94에서 최대 8.6에서 4.3으로 감소하고 상재하중의 영향을 적게 받음을 알 수 있는데 이는 연성기초에 설치된 말뚝과 지반의 경계면에서 slip 조건으로 인하여 전단응력이 감소해 말뚝으로의 하중전이가 감소되었다고 판단된다. 연성기초인 경우에는 전체적으로 응력집중비가 강성기초에 비해 작고 경계면 조건, 상재하중 그리고 말뚝 깊이별 응력집중비가 다르므로 응력집중비 결정에 신중해야 할 것이다.

5.4 치환율과 형상비에 따른 하중분담효과

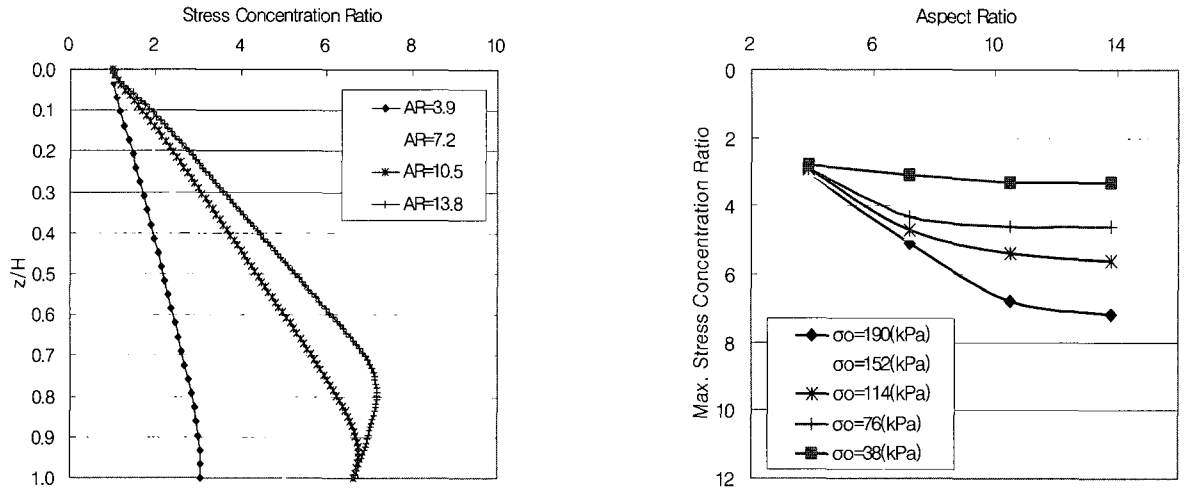
쇄석다짐말뚝으로 개량된 면적과 개량되기 전 지반의 면적의 비인 치환율에 따른 자유변형률 상태에서의 말뚝과 지반의 하중분담효과를 살펴보기 위하여 slip 조건의 연성기초에 치환율이 5, 10, 20, 40%로 증가함에 따라 지반의 등가유효반경(r_e)을 1.7, 1.2, 0.85, 0.6m로 감소시키고 상재하중을 각각 38, 76, 114, 152, 190kPa 재하 하여 응력집중비를 분석하였다. 이 중 형상비가 7.2이고 상재하중을 190kPa 재하 한 경우에 대하여 치환율과 말뚝깊이 변화에 따른 응력집중비의 영향을 그림 15(a)에 치환율과 상재하중 변화에 따른 최대 응력집중비를 그림 15(b)에 각각 도시하였다. 한편, 쇄석다짐말뚝의 직경과 길이의 비인 형상비(aspect ratio, AR)에 따른 자유변형률 상태에서의 말뚝과 지반의 하중분담효과를 살펴보기 위하여 slip 조건의 연성기초에 형상비가 3.9, 7.2, 10.5, 13.8로 증가함에 따라 말뚝의 길이를 3.0, 5.5, 8.0, 10.5m로 증가시키고 상재하중을 각각 38, 76, 114, 152, 190kPa 재하 하여 응력집중비를 분석하였다. 이 중 치환율이 10%이고 상재하중을 190kPa 재하 한 경우에 대하여 형상비와 말뚝깊이 변화에 따른 응력집중비의 영향을 그림 16(a)에 형상비와 상재하중에 따른 최대응력집중비를 그림 16(b)에 각각 도시하였다.

그림 15(a)에서와 같이 치환율이 5%에서 40%로 증가함에 따라 응력집중비가 최대 3.7에서 7.5로 증가하며, 치환율 5, 10, 20%의 저치환율에서는 말뚝길이비(z/H)



(a) 상재하중(190kPa) (b) 최대응력집중비

그림 15. 치환율에 따른 응력집중비(자유변형률, slip condition)



(a) 상재하중(190kPa) (b) 최대응력집중비

그림 16. 말뚝 형상비에 따른 응력집중비(자유변형률, slip condition)

0.94인 말뚝의 하부에서 응력집중비가 최대가 되나 치환율 40%의 고치환율에서는 최대 응력집중비가 말뚝길이비(z/H) 0.6로 말뚝 중앙부에서 발생함을 알 수 있다. 또한 그림 15(b)에서와 같이 저치환율에서는 고치환율에 비해 상재하중 증가에 따른 최대 응력집중비의 영향을 덜 받고 있으며, 치환율 20%이상의 고치환율에서는 최대 응력집중비가 일정하게 수렴하는 것을 알 수 있었다.

한편, 그림 16(a)에서와 같이 형상비가 3.9에서 13.8로 증가함에 따라 응력집중비가 최대 3.1에서 7.2로 증가하며, 형상비 3.9, 7.2, 10.5의 짧은 말뚝에서는 말뚝길이비(z/H) 0.95인 말뚝의 하부에서 응력집중비가 최대가 되나, 형상비 13.8의 긴 말뚝에서는 말뚝길이비(z/H) 0.8로 그보다 약간 상부에서 발생함을 알 수 있다. 또한 그림 5.5(b)에서와 같이 짧은 말뚝에서는 긴 말뚝에 비해 상재하중 증가에 따른 최대 응력집중비의 영향을 덜 받고 있으며, 형상비 10.5 이상의 긴 말뚝에서는 최대 응력집중비가 일정하게 수렴하는 것을 알 수 있다. 이는 치환율과 형상비 증가에 따라 인접 말뚝의 구속효과와 긴 말뚝의 거동으로 인하여 말뚝으로 전이되는 하중이 증가하지만 어느 한계에 이르면 더 이상 증가하지 않는 것으로 판단된다.

6. 쇄석다짐말뚝의 하중전이 추정

6.1 하중전이 수정식

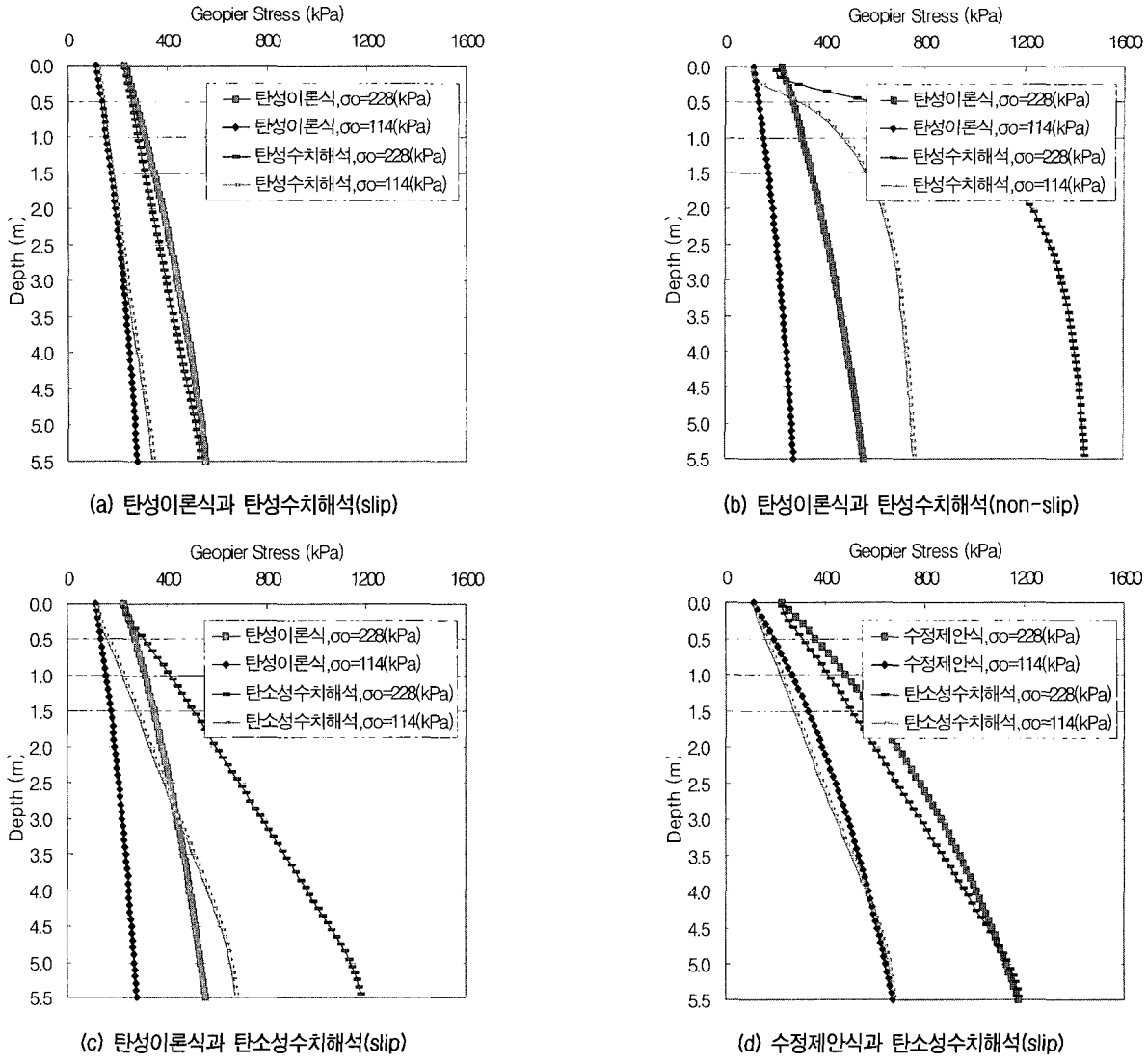
연성기초에 설치된 쇄석다짐말뚝의 하중전이 관계를 예측하기 위한 간단한 이론적 해석을 위하여 Alamgir 등(1996)이 제안한 SCP의 탄성이론을 보정하여 탄소성 지반에 적용가능한 수정식을 제안하였다. 탄성이론은 말뚝과 지반 모두 선형으로 변형하는 균질한 재료로 가정하며 횡방향 변위는 무시하고 연직방향 변위만 고려하여 해석하였다. 따라서 본 연구에서는 탄소성지반에 적용 가능하며 횡방향 변위를 고려한 하중전이 해석법을 제안하기 위하여 각각 탄성과 탄소성 수치해석을 수행하여 기존의 탄성이론과 비교, 고찰하였다. 이를 위하여 표 3과 같이 가상지반(Bowles, 1996)을 조성한 후 각각 치환율과 상대밀도를 변화하여 경계면 조건을 고려한 수치해석을 수행하였다. 상대밀도에 따라 점토지반은 연약, 중간, 굳은 지반으로 나누고 모래지반은 느슨, 중간, 조밀 지반으로 나눈 후 각각 10, 20, 40%의 치환율을 적용하여 해석하였다. 그림 17(a), (b)는 이 중 중간 모래지반의 치환율 10%, 형상비 7.2인 말뚝에 대하여 slip과 non-slip 조건을 적용하여 탄성 수치해석을 수행한 후 탄성이론과 비교한 그림이며 그림 17(c)는 탄소성 수치해석을 수행하여 비교한 그림이다. 한편 탄성이론식 식 (11)의 오른쪽 항이 말뚝과 지반 경계면의 전단응력 항임을 착안하여 탄소성해석을 고려한 보정계수 λ를 도입한 식 (18)과 같은 수정식을 제안하고 탄소성 수치해석과 비교하여 그림 17(d)에 도시하였다.

$$\sigma_{cj+1} = \sigma_{cj} + \frac{\lambda(\Delta H/a)(1-\beta_c)E_s\alpha_{cj}}{a(1+\nu_s)} \tag{18}$$

여기서, λ는 수정식의 보정계수이다. 그림 17(a), (b), (c)에서와 같이 기존 탄성이론의 경우 경계면 조건 slip의 탄성해석인 경우 약간의 차이는 있으나 이론식과 매우 유사한 경향을 보이고 있으나 non-slip인 탄성해석인 경우와 경계면 조건 slip의 탄소성해석인 경우에는 상재하중에 따라 이론식과 오차가 매우 큼을 알 수 있다. 그러나 수정식을 적용한 결과 그림 17(d)에서와 같이 말뚝 상부 1/3지점인 약 2m 근처에서 상재하중 114kPa인 경우 약 14%, 상재하중 228kPa인 경우 약 12%로 탄소성 해석과 약간의 오차는 있으나 말뚝 상부와 하부에서는 대부분 일치하여 탄소성해석 결과와 상당히 유사함을 알 수 있었다.

표 3. 탄소성해석 시 가상지반의 재료정수

재 료		E(kPa)	ν	γ(kN/m^3)	c_u(kPa)	ϕ(°)
쇄석다짐말뚝		5.4e5	0.40	20	–	–
점토지반	연약	5.0e3	0.45	17	10	–
	중간	1.0e4	0.40	18	20	–
	굳은	3.0e4	0.40	19	40	–
모래지반	느슨	1.0e4	0.35	16	–	28
	중간	2.0e4	0.35	18	–	30
	조밀	4.0e4	0.30	20	–	34



(a) 탄성이론식과 탄성수치해석(slip)

(b) 탄성이론식과 탄성수치해석(non-slip)

(c) 탄성이론식과 탄소성수치해석(slip)

(d) 수정제안식과 탄소성수치해석(slip)

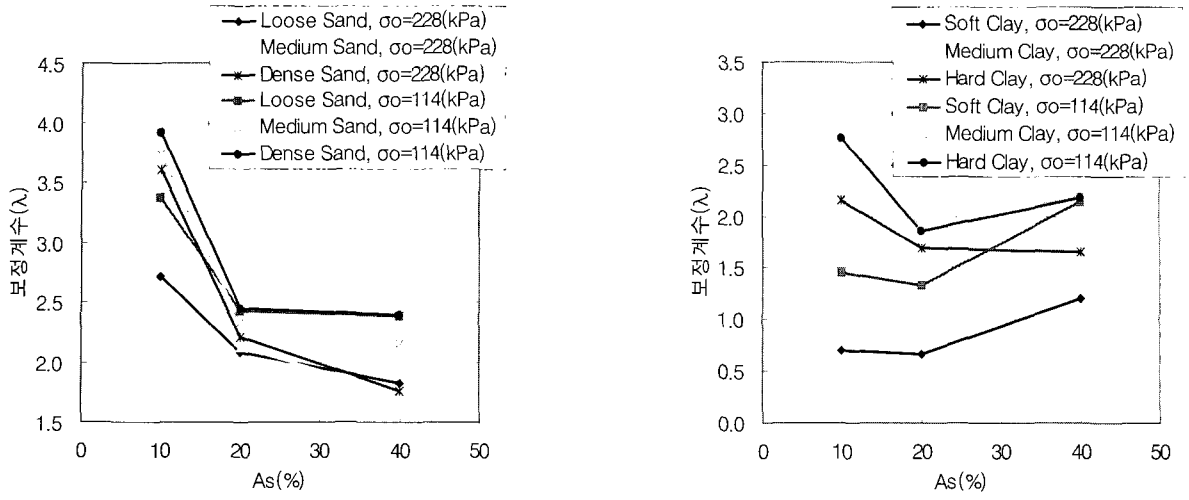
그림 17. 해석결과의 비교(중간 모래지반, 치환율 10%)

표 4. 수정식의 보정계수(λ)

점토지반	치환율 (%)	상재하중 (114kPa)	상재하중 (228kPa)	모래지반	치환율 (%)	상재하중 (114kPa)	상재하중 (228kPa)
연약	10	1.45	0.70	느슨	10	3.37	2.72
	20	1.33	0.67		20	2.43	2.08
	40	2.15	1.20		40	2.38	1.82
중간	10	2.29	1.10	중간	10	3.74	3.12
	20	1.93	1.09		20	2.33	2.12
	40	2.20	1.76		40	2.16	1.74
굳은	10	2.76	2.16	조밀	10	3.92	3.61
	20	1.86	1.69		20	2.45	2.21
	40	2.18	1.65		40	2.39	1.76

6.2 수정식의 보정계수

본 연구에서 제안한 수정식을 적용하여 연성기초에 설치된 쇄석다짐말뚝의 하중전이 관계와 표 3의 가상지반에 대하여 수행한 탄소성수치해석과 비교하여 산정한 보정계수를 점토지반과 모래지반에 대하여 각각 상대밀도, 치환율과 상재하중에 따라 표 4에 정리하고 그림 18에 나타내었다.



(a) 모래지반 (b) 점토지반

그림 18. 치환율에 따른 수정식의 보정계수

그림 18에서와 같이 모래지반에서의 보정계수는 대부분 치환율이 10%에서 20%로 증가함에 따라 급격히 감소한 후 그 이상에서는 완만히 감소하는 경향을 보이고 있으며, 상대밀도가 감소하고 상재하중이 증가함에 따라 약간 작아짐을 알 수 있다. 한편 점토지반에서는 모래지반에서와 같이 보정계수가 큰 상관성은 보이지 않으나 대체적으로 치환율 증가에 따라 감소하는 경향을 보이고 있으며, 상대밀도가 감소하고 상재하중이 증가함에 따라 감소하는 변동 폭이 커짐을 알 수 있었다.

7. 결 론

말뚝의 입력물성치 산정을 위한 현장재하시험과 수치해석을 수행하여 강성기초와 연성기초에 설치된 쇄석다짐말뚝의 경계면 조건, 치환율, 형상비, 상재하중에 따른 말뚝과 지반의 침하특성과 하중분담효과를 비교·분석 하였고 탄소성지반에서의 연성기초에 설치된 쇄석다짐말뚝의 하중전이 수정식을 제안하였다.

(1) 연성기초에 설치된 쇄석다짐말뚝은 경계면 조건에 따라 크게 영향을 받으며 침하특성은 자유변형률(free strain)로 인하여 말뚝은 감소하고 주변지반은 증가하는 경향을 보였으며 응력집중비는 말뚝 하부로 내려감에 따라 증가하며, 말뚝과 지반 경계면에서의 slip 조건으로 인하여 전단응력이 감소해 말뚝으로의 하중전이가 감소함을 알 수 있었다.

(2) 연성기초와 비교하기 위한 강성기초에 설치된 쇄석다짐말뚝의 침하특성은 경계면 조건에 관계없이 말뚝과 지반의 침하가 같은 전형적인 일정변형률의 경향을 보이고 있으며, 하중분담효과 또한 말뚝으로 응력이 집중되어 경계면 조건에 관계없이 응력집중비가 말뚝 상부에서 최대가 되고 하부로 내려감에 따라 감소함을 확인하였다.

(3) 연성기초에 설치된 쇄석다짐말뚝의 경우 치환율과 형상비 증가에 따라 응력집중비가 증가하고 최대 응력집중비 발생위치는 지표면 쪽으로 상승하는 것으로 나타났다. 또한 저치환율과 짧은 말뚝에서는 상재하중 증가에 따른 최대 응력집중비의 영향을 덜 받으며 치환율과 형상비가 증가할 때 어느 한계 이상에서는 최대 응력집중비가 수렴하는 것을 알 수 있었다.

(4) 연성기초에 설치된 쇄석다짐말뚝의 하중전이 관계를 예측하기 위한 수정식은 현재 진행 중인 현장원형(prototype)시험을 통하여 비교, 검증 된다면 간편하게 적용할 수 있을 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 김재권, 김수일, 정상섬 (2004), "연약지반의 모래다짐말뚝에 대한 하중전이 연구", *한국지반공학회논문집*, 제20권, 제7호, pp.183-196.
2. 동아지질 (2006), *경전선 복선전철 및 부산신항 배후철도(2-2공구) 현장 지질주상도 및 실내시험보고서*, 부산, pp.1-46.
3. 배우석, 오세욱, 신방웅 (2006), "모래다짐말뚝으로 개량된 복합지반의 거동에 관한 원심모형실험 -응력집중을 중심으로", *대한토목학회논문집*, 제26권, 제1호, pp.19-24.
4. 유승경 (2003), "저치환 모래다짐말뚝에 의한 복합지반의 응력분

담거동에 대한 실험적 연구", *한국지반공학회논문집*, 제19권, 제5호, pp.253-261.
5. 이민희, 최용규, 임종철, 황근배 (2003), "현장재하시험을 통한 쇄석다짐말뚝의 응력분담에 관한 연구", *한국지반공학회논문집*, 제19권, 6호, pp.107-114.
6. 천병식 (2004), "RAP 복합지반의 지지력 및 파괴거동에 관한 실험적 연구", *한국지반공학회논문집*, 제20권, 제5호, pp.127-134.
7. 해양수산부 (2001), *모래다짐말뚝과 쇄석다짐말뚝의 설계 및 시공 지침서*, 서울, pp.1-69.
8. Alamgir, M., Miura, N., Poorooshasb, H. B. and Madhav, M. R. (1996), "Deformation analysis of soft ground reinforced by columnar inclusions", *Computers and Geotechnics*, Vol.18, No.4, pp.267-290.
9. Balaam, N. P. and Booker, J. R. (1981), "Analysis of rigid raft supported by granular piles", *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, Vol.5, pp.379-403.
10. Barksdale, R. D. and Bachus, R. C. (1983), Design and Construction of Stone Column, FHWA, pp.37-38.
11. Bowles, J. E. (1996), *Foundation Analysis and Design*, 5th ed., McGraw-Hill, New York, pp.108-316.
12. Fox, N. S. and Cowell, M, J. (1988), Geopier™ Foundation and Soil Reinforcement Manual, pp.55-91.
13. Poorooshasb, H. B., Alamgir, M. and Miura, N. (1996), "Negative skin friction on rigid deformable piles", *Computers and Geotechnics*, Vol.18, No.2, pp.109-126.
14. Singh, B. (1973), "Continuum Characterization of Jointed Rock Masses: Part I - The Constitutive Equations", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.*, pp.315-335.

(접수일자 2007. 2. 8, 심사완료일 2007. 4. 9)