

공동이 존재하는 암반에 시공된 말뚝기초의 하중지지 메카니즘에 관한 수치해석 연구

Numerical Investigation on Load Supporting Mechanism of a Pile Constructed above Underground Cavity

최 고 니¹ Choi, Go-Ny

유 충 식² Yoo, Chung-Sik

Abstract

This paper presents the results of a three-dimensional finite element analysis on load supporting mechanism of pile constructed above underground cavity in limestone rock formation. Considering a wide range of cavity conditions, the behavior of pile was studied using the bearing capacity, rock yielding pattern, stress distribution and deformation of pile head and the cavity. The results indicate that the load transfer mechanism of pile, rock yielding pattern and the reduction of bearing capacity of pile significantly vary with the location, size and length of cavity. Based on the results, graphical solutions defining the reduction of the bearing capacity with specific cavity conditions were suggested.

요 지

본 연구에서는 3차원 유한요소해석을 이용하여 석회공동형성 암반에 시공된 말뚝기초의 하중지지 메카니즘 변화를 분석하였다. 이를 위하여 공동의 기하학적 조건을 변화시키며 말뚝기초의 극한지지력, 지반의 항복형태, 말뚝과 공동 주위의 응력분포 및 말뚝기초의 침하와 공동의 변형 등 해석결과를 고찰하여 말뚝기초의 역학적 거동을 검토하였다. 본 연구결과, 말뚝의 하중지지 메카니즘, 지반의 파괴형태 및 말뚝기초의 극한지지력 감소율은 공동의 기하조건에 의해 결정되며 이러한 경향을 토대로 공동의 특정조건에 대한 말뚝의 극한지지력 감소율 그래프를 제시하였다.

Keywords : Ultimate bearing capacity, Pile foundation, Finite-element method, Limestone, Cavity

1. 서 론

우리나라의 석회암 지대가 분포하고 있는 동부와 중부내륙 산간지에 고속도로 교량이 건설되면서 석회 공동으로 인한 기초 암반 하부의 지반상태 안정성 검토 필요성이 대두되어 많은 문제점이 제기되고 있다. 한국 도로공사(2004)의 연구보고서에 의하면 옥천지향사대 고성대 퇴적암(석회암) 또는 퇴적변성암 지반 위에 구

조물을 시공한 중앙과 서해안 고속도로와 중부내륙, 동해안 그리고 서천-당진 고속도로 건설현장 등 여러 교량기초 시공실적 중 석회 공동 및 파쇄대의 영향에 대한 정확한 연구 및 설계와 시공법이 제시되지 않아 어려움을 겪고 있다.

석회암 지대는 용해 공동이나 점토가 협재된 파쇄대, 층리나 단층 등 불연속면의 형성에 의하여 구조물의 시공과정 중 자연붕괴에 의한 지반침하나 함몰 등을 발

1 성균관대학교 초고층장대교량학과 석사과정 (Graduate Student, Dept. of Mega Buildings and Bridges, Sungkyunkwan Univ.)

2 정희원, 성균관대학교 건설환경시스템 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil and Environmental Engr., Sungkyunkwan Univ., csyoo@skku.edu, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2011년 7월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

생시키거나 큰 하중을 지반에 전달하는 기초의 시공 후 지반 침하를 발생시켜 상부 구조물의 안정성에 큰 영향을 미친다. 특히 최근 석회암 지대에 많이 시공되는 교량 기초는 일반적으로 기반암에 상부 하중을 전달하는 말뚝기초로 설계 되는데 기반암에 공동이 존재할 경우 말뚝기초의 지지력저하 및 공동변형에 의한 과다 침하 발생 등 공동에 의한 교량구조물의 안정성을 확보할 수 없다. 이러한 상부구조물에 대한 석회 공동의 피해사례가 국내외에서 보고되고 있으나 기존 연구는 대부분 얇은 기초의 지지거동에 대한 연구 이외에 공동부의 사전 조사, 석회 공동 암반지대에 교량기초를 시공하기위한 시공공법 등 보수, 보강에 관련된 연구가 주를 이루고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 3차원 유한요소해석을 통하여 공동형성 암반위에 위치한 말뚝기초의 지지거동 메카니즘 변화를 검토하기 위하여 다양한 석회 공동 조건에 대하여 말뚝 기초의 거동에 영향을 끼치는 공동의 요인들에 대한 매개변수 연구를 수행하였다. 또한 상부하중에 의한 공동 주변의 연직응력 분포, 하중-침하 곡선, 소성변형률 분포 등을 분석하여 선단지지와 주변마찰의 분담율, 지지력감소를 등 말뚝 기초의 지지거동 변화를 검토하였으며 이와 같은 분석결과를 토대로 말뚝 기초의 지지력 발현에 영향을 미치는 공동의 영향영역을 설정하였다.

2. 관련 연구 동향

지금까지 다수의 연구자에 의하여 수행된 기초의 거동에 대한 공동의 영향평가는 얇은 기초에 국한되었으며 얇은 기초에 대한 공동의 영향을 검토한 해외 사례는 대부분 시공사례의 영향으로 점토나 고령토 지반조건에 대하여 수행되었다. 대표적인 연구로는 Wang과 Badie (1984, 1985), Wang과 Hsieh(1987), Azam 등(1991)의 연구 등을 들 수 있다.

Wang과 Badie(1984)는 탄소성 2차원 유한요소해석과 모형실험을 통하여 점토층 내 존재하는 공동이 상부 기초에 미치는 영향을 연구한 바 있다. 얇은 기초 중 띠 기초와 정방형 기초에 대하여 지반조건, 공동의 심도와 편심 변화에 의한 기초 지지력과 최대 침하량의 변화 경향을 검토하였으며 기초의 거동에 영향을 미치는 공동의 임계영역이 있음을 제안하였다. 또한 Wang과 Badie (1985)의 추가연구에 따르면, 공동의 형상과 방향 또한

얇은 기초의 거동에 영향을 미치며 공동의 임계영역이 기초 형태, 공동의 모양과 방향, 크기, 지반조건 등 여러 변수에 의하여 결정되는 것으로 알려져 있다.

Wang과 Hsieh(1987)은 한계평형해석을 이용하여 원형 공동에 의한 기초의 붕괴 메카니즘을 제안한 바 있으며 Azam 등(1991)은 고령토지반에 위치한 띠 기초에 대한 공동의 영향을 연구한 바 있다. 이 연구에서는 유한요소해석기법을 이용하여 띠 기초에 대한 지하 공동의 기하조건 및 위치 변화와 서로 다른 강도조건을 가진 두 개의 지반 층의 상호작용을 연구하였으며 두 지층의 두께, 강성비(k)와 공동의 중첩영향에 의하여 기초의 지지거동이 결정된다고 제안하였다.

국내연구는 대부분 해외 연구와 마찬가지로 얇은 기초에 관한 연구가 주를 이루고 최근에 다소 말뚝 기초에 관한 연구가 수행 되었으나 이는 대부분 시공법에 관련된 보수 및 보강의 연구였다. 대표적인 연구로는 얇은 기초에 대한 유충식(1994, 1997), 천병식 등(2005)의 연구가 있으며 시공법에 관한 임철훈(2000), 한국도로공사(2004), 홍원표 등(2008) 등의 연구를 들 수 있다. 유충식(1994)는 공동 영향에 의한 띠기초의 안정성 확보에 대한 연구를 수행하였으며, 유한요소해석으로부터 얻어진 항복된 요소들의 면적을 이용한 항복율을 평가하고 이를 이용한 극한지지력 산정법을 제안하였다 (1997). 또한 공동과 기초의 기하조건과 지반강도정수를 독립변수로 사용하여 다중 회귀분석을 실시, 영향영역 판별식을 제안한 바 있다(1997). 한편 천병식 등 (2005)은 석회암반에 위치한 얇은 기초의 경우 기초의 안정에 공동의 심도가 공동의 크기보다 더 큰 영향을 끼치는 경향을 보고한 바 있다.

한편 한국도로공사(2004)는 국내 석회암지대의 고속도로 시공사례 증가로 인하여 제트 그라우팅 공법으로 보강된 석회암 공동부에 위치한 얇은 기초와 말뚝 기초의 설계, 시공, 현장품질관리 기준을 마련하기 위하여 탄성과 토모그래피, 확인시추, BIPS, 텔레뷰어 등 다양한 실험을 실시하고 이에 대한 설계 및 시공 지침을 제안하였다. 또한 임철훈(2000)은 석회암지대에 시공되는 기초 보강에 대한 설계와 SIG공법 적용성을 고찰하였으며 홍원표 등(2008) 또한 고압분사주입공법으로 보강된 석회암 공동의 강도특성, 변형특성 및 지지거동 특성을 분석하여 지반의 보강효과를 검토한 바 있다.

위에서 살펴본 바와 같이 국내외 기존연구는 다양한 지반조건에 대한 매개변수 연구를 통하여 공동과 얇은

기초의 지하조건변화에 따른 얇은 기초의 지지거동에 대한 수치해석연구가 주를 이루며 얇은 기초에 적용되는 공동의 영향영역 평가가 연구되었다. 한편 말뚝기초에 관한 한 공동에 의한 말뚝의 지지거동 변화에 관한 분석에 대한 연구는 매우 미비하며 석회공동 지반에 말뚝기초 시공 중의 보수, 보강공법의 지반강도 증진 효과 분석과 보강 후 지지력 재산정에 대한 연구가 주를 이룬다. 따라서 본 연구에서는 석회공동에 의한 말뚝의 지지거동 메카니즘 변화를 분석하고 이러한 분석에 근거하여 말뚝거동의 변화를 미치는 공동의 영향영역을 종합적으로 검토, 제안하였다.

3. 매개 변수 연구

본 절은 공동의 매개 변수 변화에 의한 말뚝의 지지거동 메카니즘 변화를 분석하기 위하여 단일 말뚝 기초 조건과 석회 지반 조건에 대한 3차원 유한요소 모델을 구축하였고 공동의 심도(V_D), 크기(V_W), 편심(V_E)과 길이(V_L)를 변화시키며 해석을 수행하였다. 하중 재하시 이론 산정 극한지지력의 약 1.5배의 크기로 말뚝 두부에 축하중을 재하하여 극한거동을 유도하였으며 이에 따른 결과로 각 단계별 하중침하 관계를 얻어 극한지지력을 결정하였다. 또한 소성변형률 분포, 말뚝기초 선단부 주변의 응력분포, 선단지지력과 주면마찰력의 분담을

변화 등을 분석하여 말뚝기초의 극한지지력 감소율을 검토하였다.

3.1 대상조건

본 연구에서는 그림 1과 같이 석회 공동 암반에 시공된 단말뚝 기초를 대상으로 하였다. 보이는 바와 같이 말뚝 조건은 길이 $L=20m$, 지름 $D=1.5m$ 이며 공동의 심도, $V_D = 0.7D, 2.0D(D=말뚝 직경)$ 로, 공동의 크기 $V_W = 0.7D, 1.0D, 1.5D$ 로, 공동의 편심 $V_E = 0, 0.7D, 1.3D, 2.0D$ 로, 공동의 길이 $V_L = 0.7D, 1.3D, 2.0D$ 로 변화시키며 말뚝 거동에 대한 공동의 매개 변수 연구를 실시하였다.

3.2 해석 모델링

본 연구의 유한 요소 해석은 소성 지반 해석에 타당하고 효과적인 상호면 모델링이 가능한 상용화 된 유한 요소 해석 프로그램 Abaqus 6.7로 수행하였다. 그림 2와 같이 공동의 기하학적 변화조건과 대칭인 점을 고려하여 반단면 3차원 유한요소망을 형성하고 말뚝기초와 지반은 20개 절점으로 구성된 직육면체 요소(C3D20R)를 채택하였다. 유한요소망은 대략 28800개 절점과 6200개의 요소로 구성되었으며 모델은 그림 2와 같이 세로방향으로 19.7D, 가로방향으로 13.0D의 크기로 결정하였

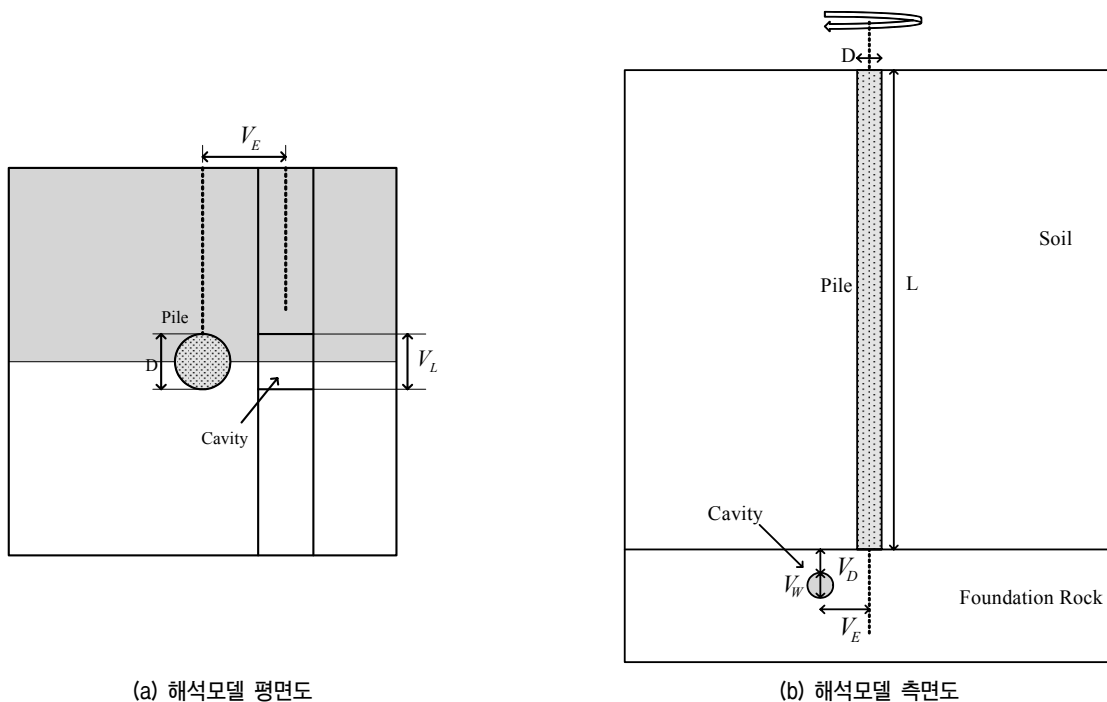


그림 1. 해석에 사용된 모델조건

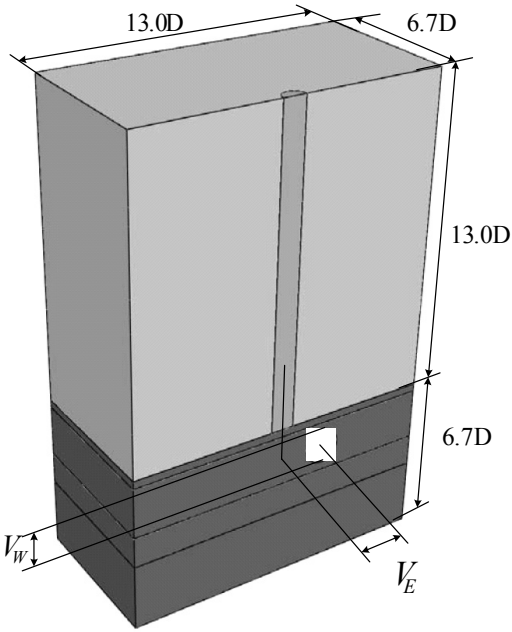
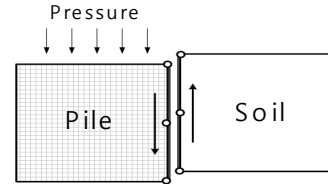
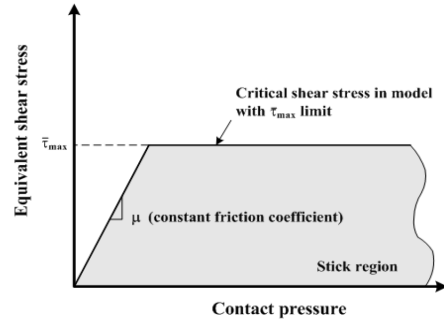


그림 2. 해석에 사용된 유한요소망



(a) Contact pair model



(b) Coulomb Friction 개념도

그림 3. 접촉요소를 이용한 미끄러짐 거동

표 1. 유한요소해석에 사용된 지반과 콘크리트 말뚝기초의 물성치

	Pile	Soil	Rock
초기탄성계수 E (kPa)	4×10^7	100,000	1,000,000
포아송비 ν	0.3	0.3	0.24
점착력 c (kPa)	N/A	20	125
내부마찰각 ϕ' (°)	N/A	35	33
팽창각 ψ (°)	N/A	5	5
단위중량 γ (kN/m^3)	23	18	23.5

고 예비해석을 통하여 모델의 영역제하에 의한 말뚝 기초의 하중-변위 특성의 영향이 발생하지 않도록 하였다. 말뚝의 하중전이 현상의 효과적인 구현을 위해 말뚝 주변부에 그림 3(a)의 접촉요소(Contact pair)를 사용하여 말뚝과 지반의 상호작용을 표현하였다. 접촉요소는 이질층간의 상호거동을 Coulomb Friction 모델을 이용하여 모사하는데 그림 3(b)와 같이 접촉면의 전단 응력 τ 가 접지압(p)의 일부분으로 표현되는 임계전단응력 $\tau_{crit} = \mu \cdot p$ (μ : 마찰계수)을 초과할 경우 미끄러짐이 발생하는 것으로 간주한다. 임계전단응력을 결정하는 마찰계수 (μ)는 Ladanyi와 Archambault(1970)이 제안한 바와 같이 $\mu = \tan(\phi' + \psi)$ 로 결정하였다.

해석 시·각 요소의 역학적 특성은 말뚝기초의 경우 선형 탄성모델을 적용하였으며 풍화토와 석회 암반층의 경우 Mohr-Coulomb 파괴규준을 적용한 탄소성 모델을 적용하였다. 또한 해석에 필요한 팽창각(dilation angle)은 normality rule에 의해 발생하는 높은 팽창을 피

하기 위하여 5°로 가정하였다. 지반과 말뚝기초 부근에서는 두 재료 간의 큰 강성 차이로 인해 발생하는 응력 집중 현상이 예상되므로 조밀한 메쉬를 구성하였으며 말뚝으로부터 거리가 멀어질수록 밀도를 감소시켰다.

본 연구의 해석단계는 2단계로 나뉘어 수행되었으며 1단계는 초기상태를 구현을 위한 자중재하를 모사한 후 2단계에서 말뚝 두부에 등분포형태로 하중을 재하하였다. FE해석 단계에 따라 하중이 점차적으로 재하되었으며 공동의 크기(V_w)와 편심(V_E) 변화는 Abaqus 6.7의 Model Change 명령을 이용하여 지정한 요소를 제거(remove)하는 형태로 수행하였다. 각 하중재하별 단계 별로 말뚝의 선단부 침하와 소성변형을 분포, 말뚝의 축력변화, 주변 지반의 응력변화 등을 분석하여 말뚝의 하중지지 메카니즘의 변화를 검토하였다.

본 연구의 해석에 적용된 지반 물성치 초기탄성계수(E), 포아송 비(ν), 점착력(c), 내부마찰각(ϕ'), 팽창각(ψ), 단위중량(γ)은 아래 표 1과 같다. 먼저 말뚝 기초를

지지하는 암반은 우리나라의 대표적인 석회암지대인 단양 고수지역에서 실시된 단양 고수지역 지반안정성 기본 조사 보고서(2006)에 제시된 석회암반의 물성치를 사용하였으며 주면에 닿은 지층은 잔적토의 물성치를 사용하였다. 말뚝은 현장타설말뚝으로 초기탄성계수 40,000,000kPa, 포아송비 0.3, 단위중량 23kN/m³로 가정하였다.

4. 결과 분석

4.1 공동의 말뚝 지지거동 영향 메카니즘

본 연구에서는 말뚝기초 선단부 아래 공동이 존재하는 경우 말뚝의 하중지지 메카니즘 변화를 분석하기 위하여 그림 4-7과 같이 공동주변의 침하량 분포, 소성변형률, 연직응력 등을 토대로 공동이 말뚝기초에 끼치는 영향을 평가하였으며 본 절에서는 공동의 영향을 극대화시킨 조건인 $V_D = 0.7D$, $V_W = 1.5D$, $V_E = 0$, $V_L = 2.0D$ 인 CASE를 공동이 없는 CASE와 비교분석 하고 다음 절에서 다각적인 매개변수 분석을 다루도록 한다.

공동이 말뚝 선단부에 존재하는 경우 공동에 의하여 말뚝 선단과 공동의 주변 영역에 응력 분포가 변화하며 침하량이 증가하는 등 말뚝기초의 거동의 안정성을 저하시킨다. 그림 4는 공동영향에 의한 소성변형률 분포

를 보여주고 있는데 적용된 소성 변형률은 등가소성변형률(PEEQ, Equivalent plastic strain)로 재료의 파괴지표로 사용되며 식 (1)과 같이 결정된다.

$$PEEQ = \bar{\epsilon}_0^{pl} + \int_0^t \dot{\epsilon}^{pl} dt \quad (1)$$

$$\dot{\epsilon}^{pl} = \int \frac{1}{c} \sigma : d\epsilon^{pl} \quad (2)$$

이 때 $\bar{\epsilon}_0^{pl}$ 가 초기 소성변형, $\dot{\epsilon}^{pl}$ 은 적용된 소성 파괴규준에 의하여 결정되며 Mohr-Coulomb 파괴규준을 따르는 등가소성변형률, σ 는 요소에 작용하는 압축응력이고 c 는 Mohr-Coulomb 파괴규준의 강도정수인 점착력이다.

보이는 바와 같이 그림 4(a)의 소성변형률 분포도를 살펴보면 공동이 존재하지 않는 경우 말뚝 선단부 둘레에 뚜렷한 파괴선을 형성하며 국부전단파괴를 일으킨다. 이는 Sowers(1979), Kulhawy와 Goodman(1980)이 제안한 무결암의 국부전단파괴 형태와 동일하며 파괴선은 말뚝 선단부 1.0D까지 형성되고 그림 5와 같이 말뚝 선단부의 지반이 말뚝의 선단지지력을 전달하며 2.7D 아래까지 응력이 분산되어 하중을 분산시키는 경향을 확인할 수 있다.

한편 말뚝기초의 선단부에 공동이 존재할 경우($V_D = 0.7D$, $V_W = 1.5D$, $V_E = 0$, $V_L = 2.0D$) 그림 4(b)와 같은 소성변형률 분포가 발생한다. 보이는 바와 같이 공동이 존재하

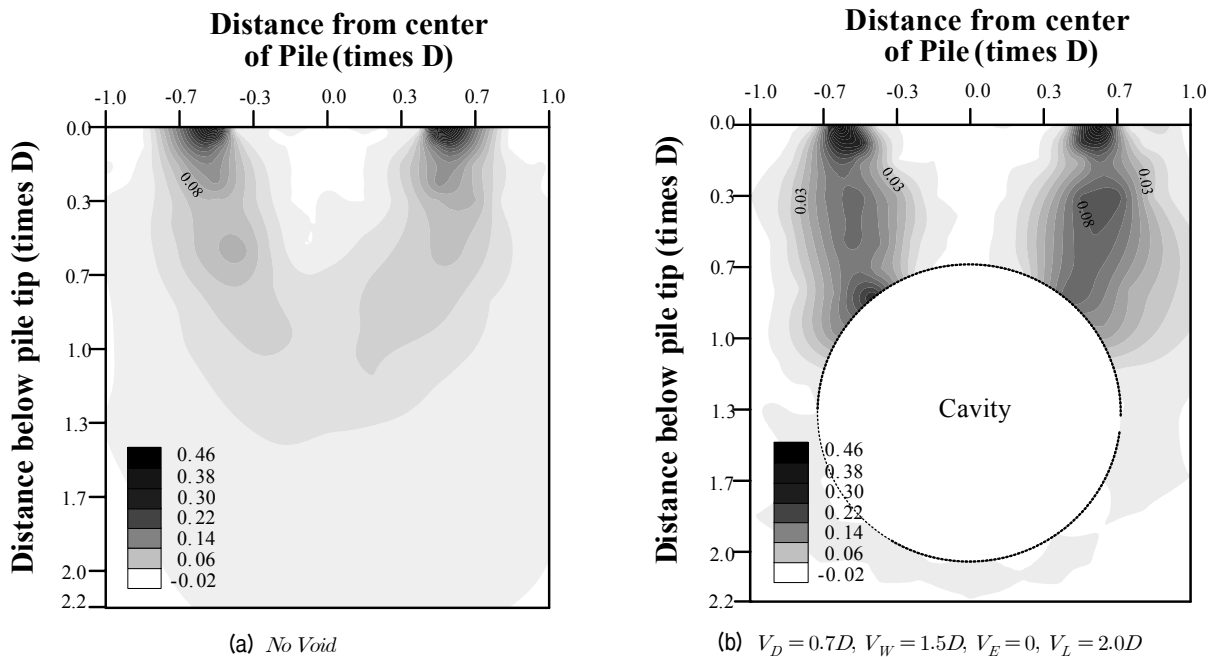


그림 4. 공동영향에 의한 소성변형률 분포도

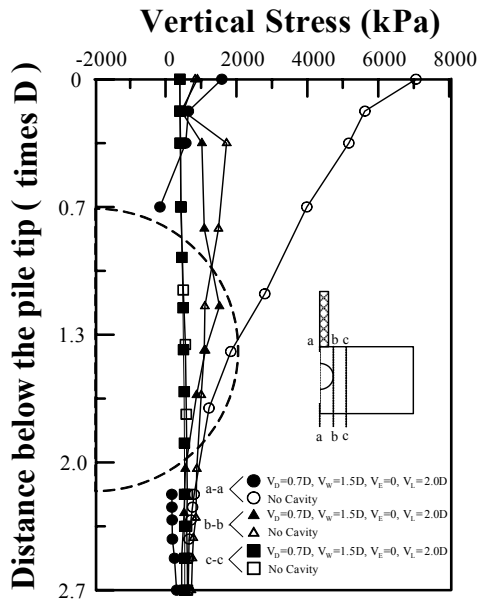


그림 5. 말뚝 주변의 연직응력 분포

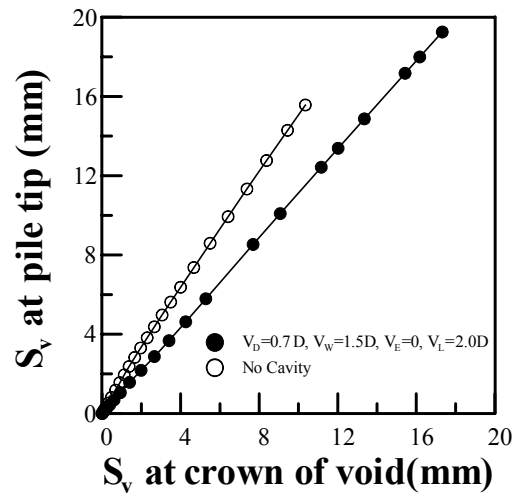


그림 6. 말뚝선단부와 공동상부의 침하비교

지 않는 경우보다 파괴시 더 큰 소성 변형률이 발생하며 공동의 어깨부분까지 전이되어 국부전단파괴가 발생한다. 또한 공동에 의하여 연속적인 하중전이가 불가능하기 때문에 그림 5와 같은 매우 불안정한 하중전달이 발생함을 알 수 있으며 공동중심에서 2.0D이내의 영역에서 공동에 의한 지반의 하중전이 변화가 발생한다. 그림 5의 a-a단면은 공동중심, b-b단면은 공동 측부, c-c단면은 공동중심에서 2.0D만큼 떨어진 위치이며 말뚝선단부의 하중전이가 공동에 의하여 약 69% 감소하고 공동상부는 상부 하중으로 인한 인장균열이 발생한다. 이는 공동영향으로 인하여 공동의 어깨부와 측벽부로 지반의 하중전이가 집중적으로 이루어지고 있음을 의미하며 공동에 의하여 지반의 하중 지지가 공동 상부로 집중되고 있음을 확인할 수 있다.

즉 말뚝 선단부와 공동상부의 침하관계를 나타내고 있는 그림 6과 같이 공동이 없는 경우 공동상부의 침하가 말뚝선단의 침하보다 작게 발생하는 반면 공동이 존재하는 경우 공동상부의 침하와 말뚝선단의 침하의 기울기가 약 45°를 이루며 거의 같은 크기로 발생한다. 이는 공동이 존재하는 경우 말뚝의 침하가 공동 상부의 변형에 의하여 발생하는 것으로 공동이 지반과 말뚝 기초의 상호작용에 의하여 지지 메카니즘을 변화시킴을 의미하며 이와 같은 침하거동의 차이가 말뚝의 선단지지를 감소시키는 경향을 확인할 수 있다.

4.2 말뚝의 극한지지력 변화 경향

본 절에서는 LRFD(2004) 설계기준과 구조물기초설계기준해설(2009)에서 제시한 말뚝의 하중-침하 관계를 이용한 극한지지력 산정법을 적용하여 극한지지력을 결정하였다. 대표 CASE인 $V_D=0.7D$, $V_W=1.5D$, $V_E=0$, $V_L=2.0D$ 의 유한요소 해석결과 FHWA(1999) 기준 말뚝직경의 5% 침하, DeBeer 방법 (LogP-LogS 곡선법) 기준 말뚝직경의 0.2%~0.3% 침하, Davisson 방법기준 말뚝직경의 최소 1.3% 침하, P-S 곡선법 기준 말뚝직경의 0.7%~0.8% 침하, DIN 4026(1975)기준 말뚝직경 2.5% 침하의 결과를 나타냈다. 극한지지력이 과대평가 되거나 과소평가되는 기준을 배제하고 본 해석 조건이 현장 타설 대구경 말뚝임을 감안하며 안전측의 설계를 고려할 경우, 해석 전 CASE에 대하여 말뚝직경의 1%에 해당하는 침하량에서의 하중을 극한지지력으로 결정하였다.

4.2.1 공동 침도의 영향

본 절에서는 공동의 침도(V_D) 변화에 따른 말뚝기초의 거동특성을 고찰하기 위하여 $V_D=0.7D$, 2.0D의 조건에 대하여 말뚝선단부의 하중-침하(P-S) 곡선, 말뚝선단부 주변의 소성변형률 분포, 주면마찰과 선단지지의 변화, 지지력비율을 산정하여 비교 분석하였다.

그림 7은 공동의 침도(V_D) 변화에 따른 말뚝기초 선단부의 P-S곡선을 보여 주고 있다. 보이는 바와 같이 공

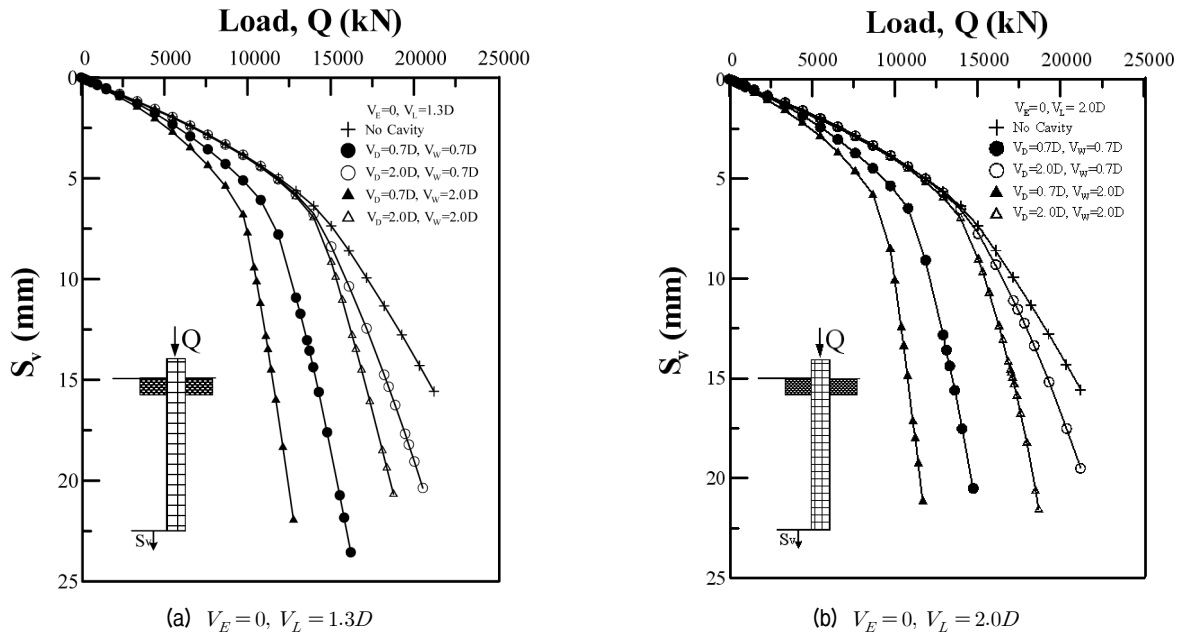


그림 7. V_D 의 변화에 따른 말뚝의 P-S곡선

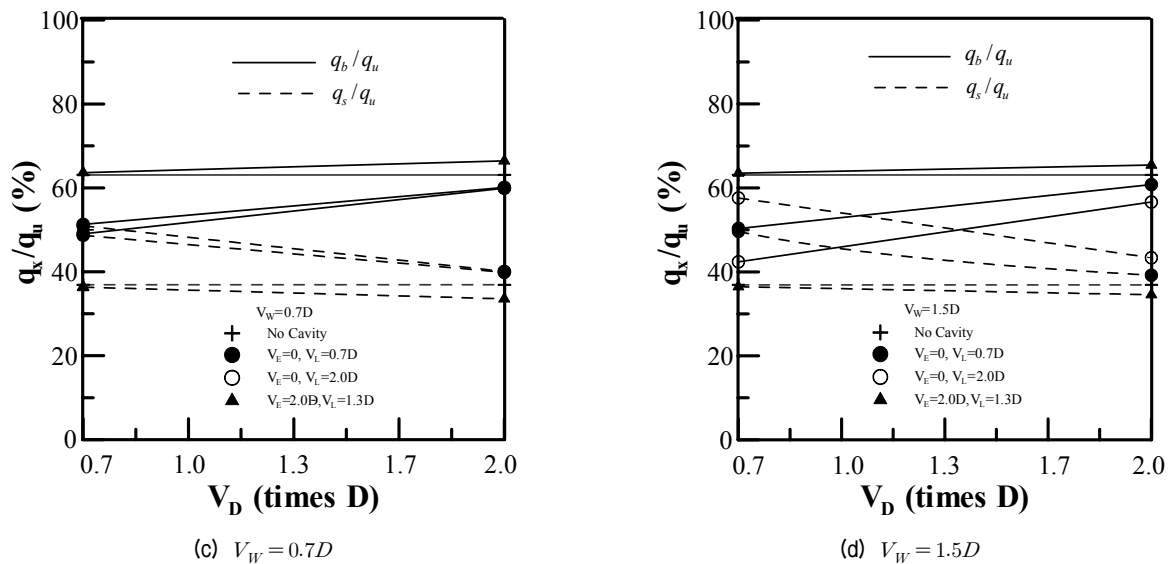


그림 8. 말뚝의 지지력 분배율에 대한 V_D 의 영향

동의 심도(V_D)가 감소하여 공동이 말뚝 선단과 가까울수록 공동 상부 변형에 의한 말뚝의 순침하량이 증가하여 P-S곡선의 기울기가 급격히 감소하고 이에 의하여 선단지지 감소에 의한 극한지지력의 감소양상을 볼 수 있다.

선단지지와 주면마찰의 분담을 변화를 분석은 극한 지지력의 크기의 하중 재하시 말뚝기초의 축하중 분포와 말뚝 둘레의 접촉요소(Contact Pair)를 이용한 주면마찰력의 분석을 통하여 이중 검토 되었으며 공동의 심도(V_D) 변화에 의한 말뚝기초의 선단지지와 주면마찰 분

담율은 그림 8과 같다. 그림 8의 q_x 는 곡선에 따라 선택되는 선단지지력 또는 주면마찰력, q_b 는 파괴시 발현되는 선단지지력, q_s 는 파괴시 발현되는 주면마찰력, q_u 는 파괴시 극한지지력으로 공동이 말뚝기초 선단부와 가까워질수록 주면마찰력은 주로 일정한 값을 유지하는 한편 선단지지력의 감소에 의하여 극한지지력이 감소하는 양상을 보인다. 또한 공동의 크기(V_W)가 클수록 공동의 심도변화에 민감한 지지 메카니즘 변화양상을 보이며 공동의 편심이 2.0D이내일 경우 심도변화에 대한 말뚝의 지지 메카니즘의 변화가 발현될 수 있다.

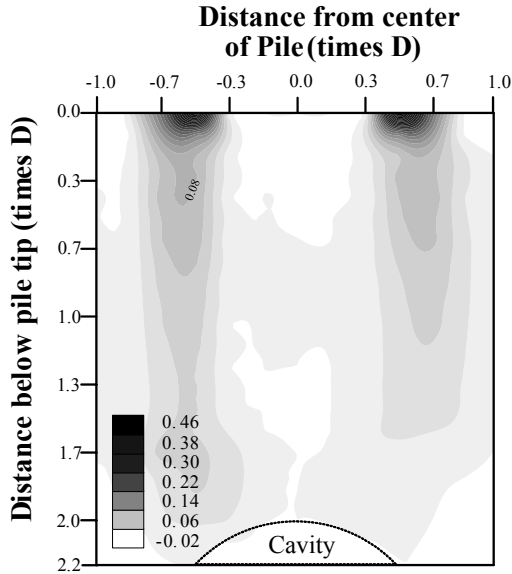


그림 9. $V_D = 2.0D$, $V_W = 1.5D$, $V_E = 0$, $V_L = 2.0D$ 소성변형률 분포도

$V_D = 2.0D$ 일 경우 선단지지와 주변마찰의 지지비율은 공동이 존재하지 않는 6:4의 비율에 수렴하며 이는 공동이 일정 심도 이상에 존재할 경우 말뚝기초의 거동변화에 영향이 없는 것으로 판단된다. 또한 공동 심도가 깊은 $V_D = 2.0D$, $V_W = 1.5D$, $V_E = 0$, $V_L = 2.0D$ 인 경우 그림 9와 같은 형태의 파괴선이 형성된다. 그림 4(a)와 비교해볼 때 말뚝 선단부 아래 2.0D아래까지 연장된 형태의 파괴선이 형성되나 1.0D아래의 영역은 소성 변형률이 매우 작은 크기이며 소성 변형률이 0.06이상인 영역은 공동이 존재하지 않는 경우와 거의 같은 형태의 분포를 보인다. 이는 $V_D = 2.0D$ 인 경우 지반의 파괴형태가 공동이 존재하지 않는 경우와 거의 유사한 결과임을 보여주고 있다. 이는 기존 연구 및 선단지지와 주변마찰 분담율 분석 결과와 마찬가지로 말뚝 기초 또한 지지 메커니즘을 변화시키는 공동의 임계영역이 존재함을 의미한다.

그림 10은 공동이 존재하지 않는 경우의 극한지지력 (q_u)과 공동이 존재하는 경우의 극한지지력 (q_u)의 지지력 비율을 나타낸다. 공동의 크기(V_W)가 클수록 심도변화에 민감하여 $V_W = 0.7D$ 일 때 V_D 가 2.0D에서 0.7D로 말뚝기초 선단부에 공동이 가까워짐에 따라 평균 35%, $V_W = 1.5D$ 일 때 V_D 가 2.0D에서 0.7D로 말뚝선단부와 공동이 가까워짐에 따라 평균 47%의 극한지지력이 감소한다. 동일한 심도일 때 공동의 크기(V_W)가 공동의 길이(V_L)보다 말뚝기초의 극한지지력 감소에 대하여 다

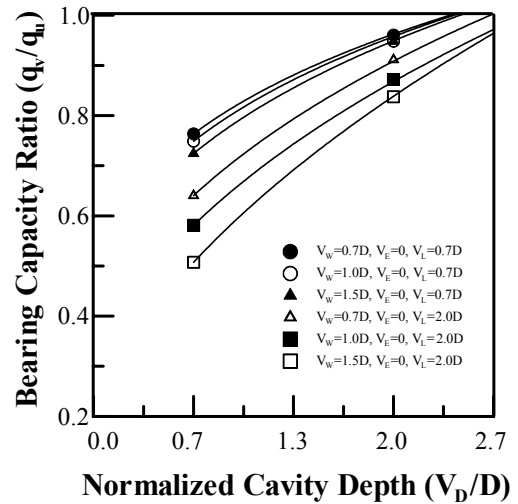


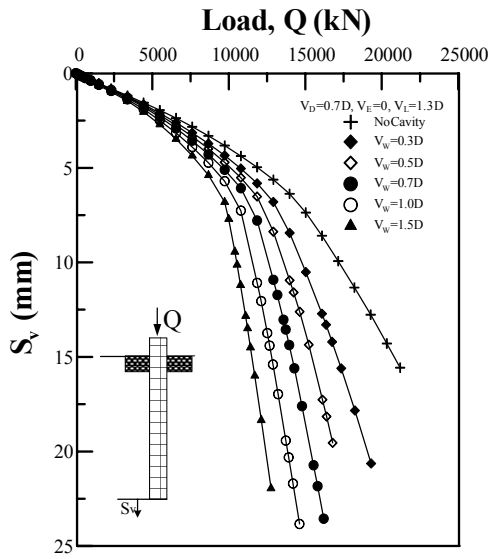
그림 10. 공동의 심도 (V_D) 영향에 따른 말뚝기초의 지지력 비율

소 큰 영향을 끼치며 공동의 심도(V_D) 변화의 영향이 가장 큰 CASE에서 약 50%의 극한지지력 감소율을 보이는 것으로 보아 기존의 얇은 기초에 관한 연구와 마찬가지로 말뚝 기초 또한 공동의 심도(V_D) 변화에 의한 하중지지 메커니즘의 변화가 가장 큰 것으로 판단된다. 또한 공동의 심도(V_D)에 상관없이 공동의 편심(V_E)이 1.3D 이상일 경우 공동의 심도와의 중첩영향으로 대부분의 말뚝기초의 지지거동에 변화가 발생하지 않는 경향을 확인할 수 있다.

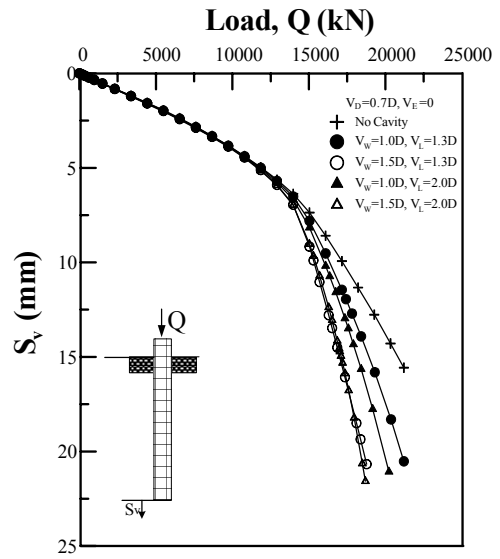
4.2.2 공동 크기의 영향

본 절에서는 공동의 크기(V_W)가 말뚝기초의 거동에 미치는 영향을 고찰하기 위해 $V_D = 0.7D$, $V_E = 0$, $V_L = 1.3D$ 의 경우를 대상으로 공동의 크기(V_W)를 0.3D~1.5D (0.3D, 0.5D, 0.7D, 1.3D, 1.5D)로 변화시켰으며 이 외의 경우는 $V_W = 0.7D$, 1.0D, 1.5D로 변화시켜 얻어진 해석결과를 검토하였다.

그림 11은 공동의 크기(V_W)변화에 따른 말뚝선단의 P-S곡선을 보여주고 있다. 공동이 말뚝 중심에 위치하고 공동의 심도가 0.7D($V_D = 0.7D$, $V_E = 0$)를 나타내는 그림 11(a)를 살펴보면 말뚝기초의 거동이 공동의 크기(V_W)에 의하여 크게 변화하며 $V_W \leq 0.7D$ 의 작은 크기의 공동이라도 말뚝기초의 급격한 지지력 감소를 유발 시킴을 확인할 수 있다. 파괴형태를 살펴보면 그림 12와 같이 $V_W < 1.0D$ 인 경우 말뚝 선단 주변부에서 공동의

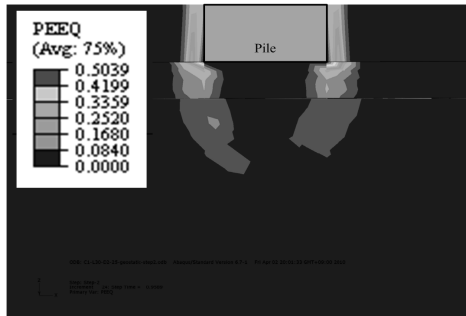


(a) $V_D = 0.7D, V_E = 0, V_L = 1.3D$

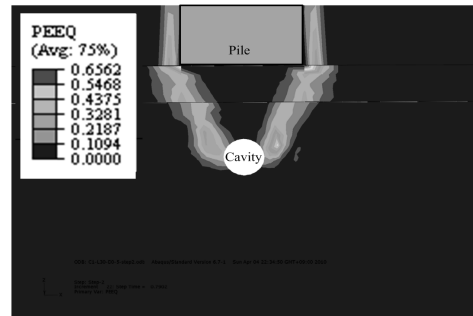


(b) $V_D = 0.7D, V_E = 0$

그림 11. V_W 의 변화에 따른 말뚝의 P-S곡선



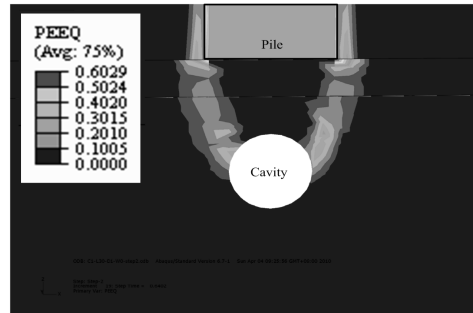
(a) No Cavity



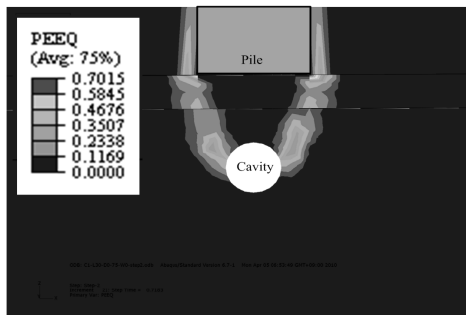
(b) $V_W = 0.3D$



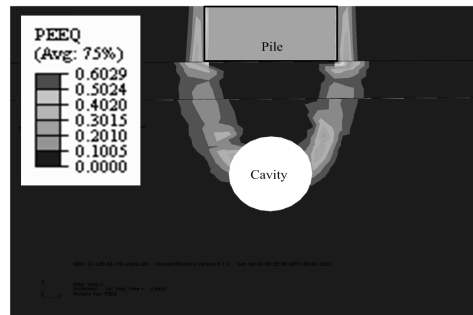
(c) $V_W = 0.5D$



(d) $V_W = 0.7D$

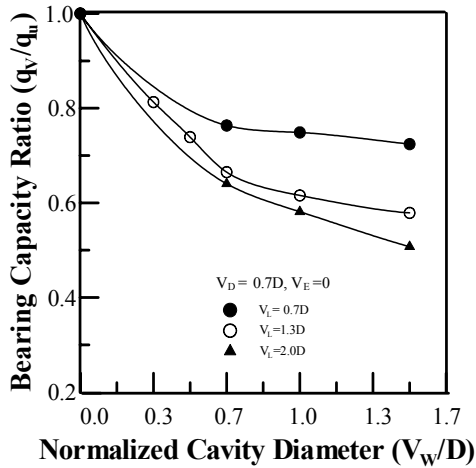


(e) $V_W = 1.0D$

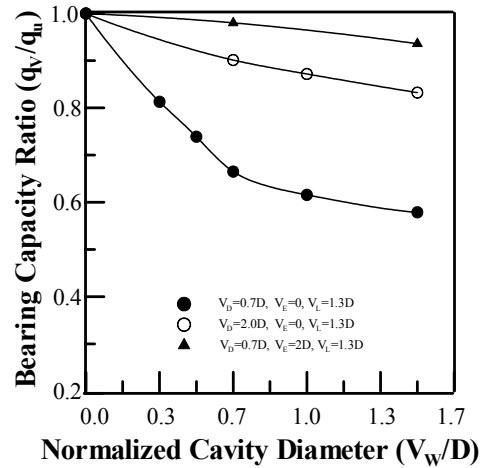


(f) $V_W = 1.5D$

그림 12. V_W 의 변화에 따른 소성변형률 분포도 ($V_D = 0.7D, V_E = 0, V_L = 2.0D$)



(a) V_L 의 영향



(b) V_D, V_E 의 영향

그림 13. 공동의 크기(V_w) 영향에 따른 말뚝기초의 지지력 비율

측부로 파괴선이 길게 형성되어 파괴궤가 공동크기에 비하여 넓게 형성된다. 이에 의해 지반의 지지거동이 매우 불리해지며 $V_w > 1.0D$ 인 경우 공동의 어깨부분으로 파괴선이 비교적 좁게 형성되어 상부하중을 불안정하게 전달한다. 또한 $V_w = 0.3D, 0.5D$ 일 경우 공동 상부와 하부에 인장응력이 발생하며 공동의 크기가 커짐에 따라 공동의 상부에만 인장응력이 발생한다. 따라서 말뚝기초가 시공되는 지반에 $0.7D$ 이하의 작은 크기인 공동이 존재할지라도 상부 말뚝기초의 지지거동에 큰 영향을 미쳐 말뚝 안정성을 심각하게 저하시킬 수 있다.

그림 13은 공동의 크기(V_w) 변화에 의한 말뚝기초의 지지력 비율을 나타내고 있다. 보이는 바와 같이 일반적으로 공동의 크기가 클수록 말뚝기초의 지지력감소율은 증가하나 $V_w \leq 0.7D$ 인 경우 급격한 지지력 감소가 발생하고 $V_w > 0.7D$ 인 경우 공동의 크기 증가에 대하여 일정한 지지력 감소율을 보인다. 그림 13(a)를 보면 공동의 심도(V_D)가 일정할 경우 공동의 길이(V_L)가 길수록 공동의 크기(V_w) 변화에 대하여 민감한 지지력 감소경향을 보이며 그림 13(b)를 보면 공동의 심도(V_D) 변화가 공동의 편심(V_E) 변화에 비하여 $V_w \leq 0.7D$ 인 경우의 말뚝기초의 지지력감소에 더 큰 영향을 끼치는 것으로 판단된다.

4.2.3 공동 편심의 영향

본 절에서는 공동의 편심(V_E) 변화에 의한 말뚝기초의 거동특성에 의한 분석을 위해 공동의 길이가 $1.3D$ 인

경우($V_L = 1.3D$) 공동의 편심을 $0 \sim 2.0D$ 로 변화시켜($V_E = 0, 0.7D, 1.3D, 2.0D$) 이에 의한 해석결과를 비교분석하였으며 이 외의 경우는 해석의 경제성을 위하여 $V_E = 0, 2.0D$ 인 조건에 대하여 해석을 수행, 해석 결과를 검토하였다.

그림 14는 말뚝의 극한지지력 결정에 끼치는 공동의 편심(V_E)의 영향을 나타내는 P-S곡선이다. 그림 14(a)와 같이 공동의 편심(V_E) 영향이 큰 $V_D = 0.7D, V_w = 1.5D$ 인 경우 $V_E < 1.3D$ 일 때 큰 지지력 감소가 발생하며 그림 14(b)와 같이 다른 매개변수의 변화에도 불구하고 $V_E = 2.0D$ 이면 말뚝선단부의 침하가 공동이 존재하지 않는 경우와 거의 유사함을 알 수 있다.

공동 편심(V_E) 변화에 의한 지반의 파괴형태를 살펴보면 그림 15와 같이 공동이 말뚝중심에서 벗어날 경우 파괴선이 비대칭으로 형성되면서 지반의 하중전이도 공동이 없는 방향으로 다소 치우친다. 공동의 편심(V_E) 변화에 대한 말뚝 중심 하부의 연직응력 분포를 살펴보면 $V_E = 0, 0.7D$ 인 경우 말뚝 선단부에 작용하는 하중이 약 74% 감소하며 매우 불안정한 거동을 보인다. 이러한 말뚝의 비대칭 거동에 의하여 부등침하가 다소 발생하며 말뚝 중심과 공동의 중심이 일치하지 않는 경우($V_E = 0.7D, 1.3D$) 약 1mm의 부등침하가 발생한다. 이는 지반 하중전이의 편심이 발현되어 안정적인 하중분배가 이루어지지 않기 때문에 말뚝의 선단지지 발현을 크게 저하시킨다.

그림 16은 공동의 편심(V_E) 변화에 의한 말뚝기초의 지지력 비율을 보여주고 있다. 보이는 바와 같이 $V_D = 0.7D$ 인 조건에 대하여 $V_w = 0.7D$ 일 경우 공동의

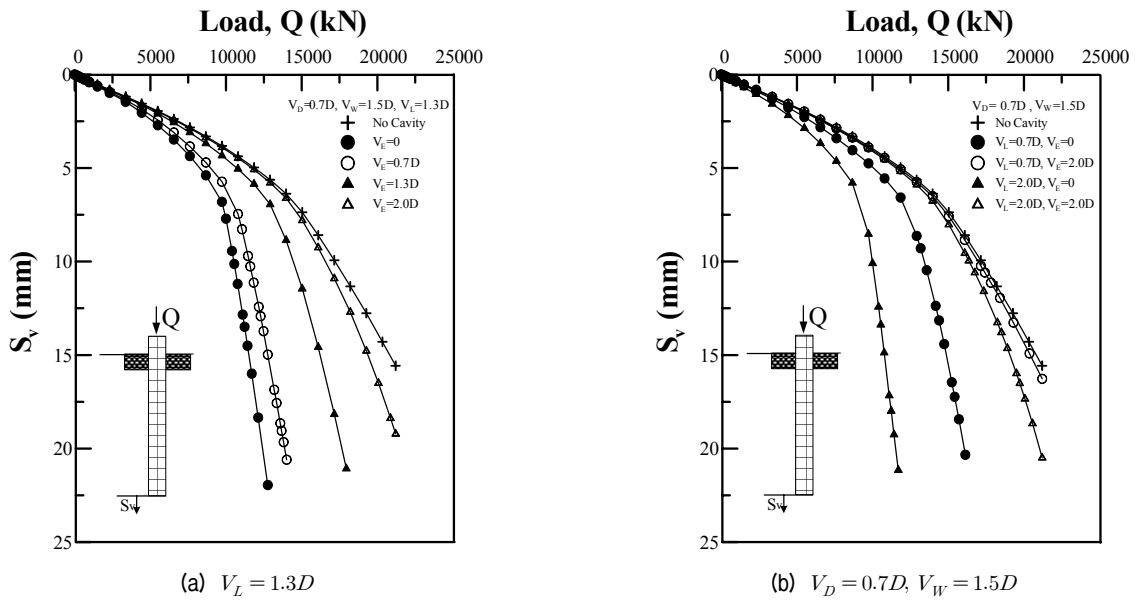


그림 14. V_E 의 변화에 따른 말뚝의 P-S곡선 ($V_D = 0.7D$, $V_W = 1.5D$)

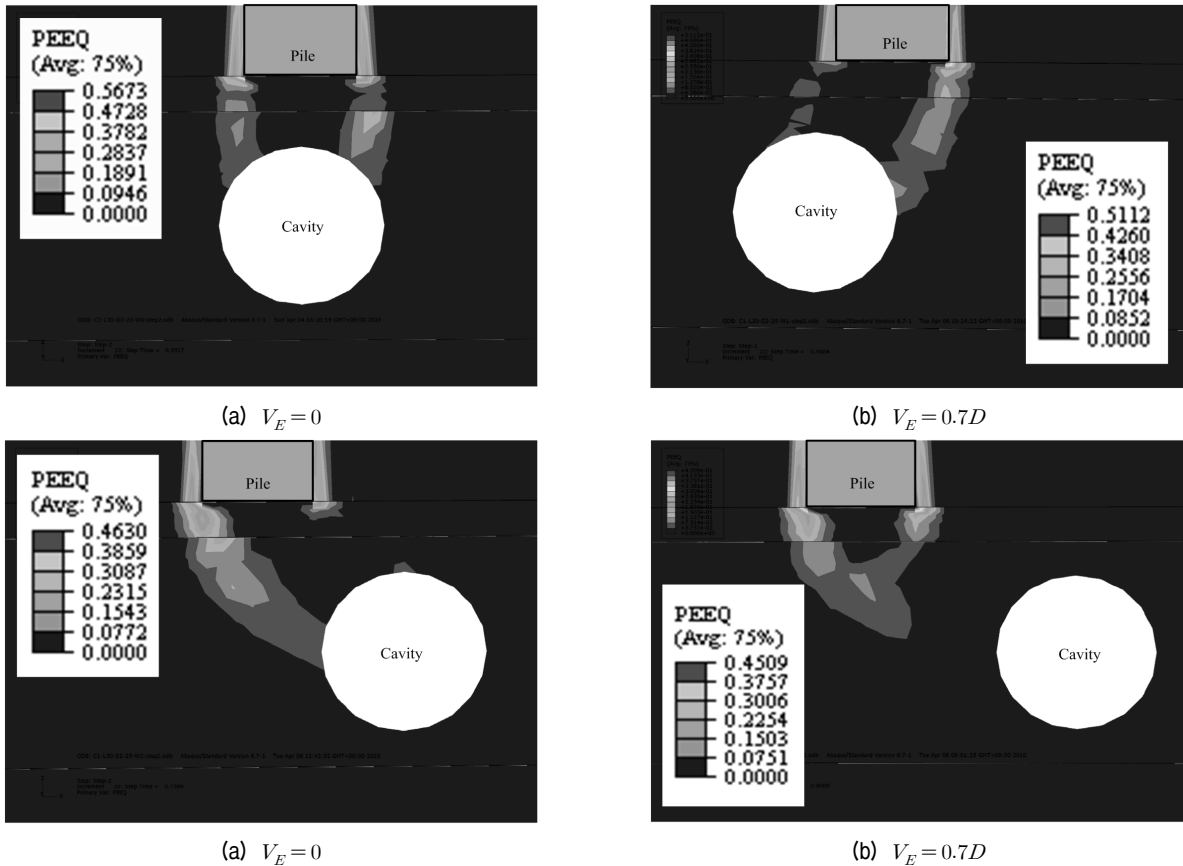


그림 15. V_E 의 변화에 따른 소성변형률 분포도 ($V_D = 0.7D$, $V_W = 1.5D$, $V_L = 1.3D$)

편심변화에 대하여 최대 35%의 지지력 감소를 보이며 $V_W = 1.5D$ 일 경우 최대 50%의 지지력 감소가 발생한다. 공동의 편심 영역이 0.7D이상일 경우 급격한 지지력 감소 경향을 보이며 공동의 편심이 0.7D이하로 공동 중

심이 말뚝 기초의 선단부내에 존재할 경우 다소 일정한 지지력 감소를 보인다. 이는 공동의 위치에 의하여 말뚝 기초의 기하조건이 대칭이 아닐 경우 말뚝기초의 지지 메카니즘 변화에 더 민감한 영향을 끼침을 의미한다.

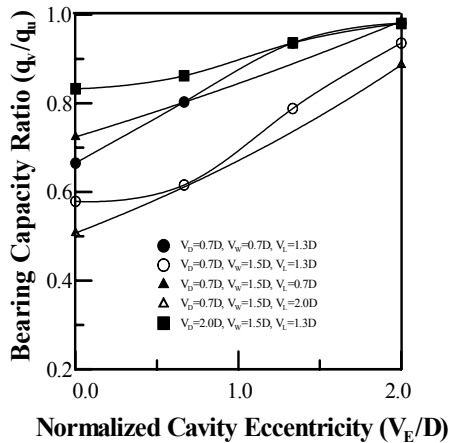


그림 16. 공동의 편심(V_E) 영향에 따른 말뚝기초의 지지력 비율

5. 결론

본 연구에서는 3차원 탄소성 유한요소해석을 통하여 석회 지하 공동이 말뚝 기초의 지지거동 메카니즘의 변화에 미치는 영향을 연구하였다. 이를 위해 공동의 심도, 크기, 편심, 길이의 조건을 변화시키며 매개변수 연구를 수행하고 말뚝의 하중지지 메카니즘을 분석하였으며 그 해석결과를 토대로 공동에 의하여 감소한 말뚝 기초의 극한 지지력 비율을 산정하였다.

- (1) 기존의 연구와 비교해 볼 때 공동에 의한 말뚝기초의 지지력 감소비는 얇은기초에 비하여 그 크기가 작으며 이는 근입깊이에 의한 구속압의 존재, 공동에 의하여 형성되는 파괴꺾기의 형태 및 말뚝기초의 주변마찰에 의한 지지거동 차이에 요인한 것으로 판단된다. 또한 공동이 말뚝거동에 영향을 미치는 영역안에 존재하는 경우 공동상부에 하중전이가 집중적으로 이루어지고 공동상부에 변형이 발생하여 최대 50%의 말뚝 지지력 저하가 발생한다.
- (2) 매개변수중 말뚝기초의 지지거동 변화에 공동의 심도(V_D) 변화에 의한 지지력 감소가 가장 크게 발생하며 심도변화에 대한 극한 지지력감소는 정비례로 발현되는 경향을 보인다. 또한 1m 이하 직경의 작은 공동일지라도 말뚝의 극한지지력이 60%~80%로 급감하여 상부 구조물의 안정성에 큰 영향을 끼칠 수 있으므로 말뚝 시공에 앞서 철저한 지반조사가 이루어져야 할 것이다. 한편 공동의 편심이 존재할 경우 말뚝기초의 비대칭거동을 초래하며 선단지지와 주변마찰 발현에 큰 영향을 끼치고 편심길이(V_E)가

2.0D이상일 경우 말뚝에 대한 공동의 영향을 무시할 수 있다.

- (3) 본 연구 범위내에 해당하는 실제 현장문제에 말뚝의 지지력감소를 그래프가 효율적으로 적용될 수 있을 것으로 사료되며 공동이 말뚝기초의 지지력 발현에 영향을 미치는 영역안에 존재할 경우 이에 적합한 설계반영과 시멘트 그라우팅, 지하수 차단 등의 보강공법을 시행하여 시공안정성을 확보해야 할 것이다.

참고 문헌

1. 유충식 (1994), “지하 공동이 얇은 기초의 극한지지력에 미치는 영향”, *대한토목학회*, 제1권, pp.581-584.
2. 임철훈 (2000), “석회암 지대의 기초보강 필요성 및 대책”, *대한토목학회*, Vol.48, No.3, pp.46-54.
3. 유충식 (1997), “지하공동위에 위치한 확대기초의 지지력 산정 기법”, *한국지반공학회*, 제13권, 제1호, pp.75-84.
4. 천병식, 박형준 (2005), “유한요소해석에 의한 석회암 공동지반의 변형특성에 관한 연구”, *한국지반환경공학회*, 제6권, 제1호, pp.63-72.
5. 홍원표, 홍건표, 여규원 (2008), “고압분사주입공법으로 보강된 석회암공동의 거동특성”, *한국지질공학회*, 제18권, 제1호, pp.7-16.
6. 광해방지사업단 (2006), *단양고수지역 지반안정성 기본조사보고서*.
7. 한국도로공사 (2004), *석회암 공동부에 근입된 말뚝기초의 설계 및 시공법 개발*.
8. 한국지반공학회 (2009), *구조물 기초설계기준 해설*.
9. AASHTO. (2004). LRF Bridge Design Specification, 3rd Edition, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, DC.
10. Azam, B., Hsieh, C.W. and Wang, M.C. (1991), Performance of Strip Footing on Stratified Soil Deposit with Void, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.117, No.5, pp.753-772.
11. Kulhawy, F.H. and Goodman, R.E. (1980), “Design of Foundations on Discontinuous Rock.”, *Proceedings of the International Conference on Structural Foundations on Rock*, International Society for Rock Mechanics, Vol.1, pp.9-220.
12. Ladanyi, B., and Archambault, G. (1970), “Simulation of shear behaviour of a jointed rock mass”, *Proc of 11th Symp. on Rock Mechanics*, : Theory and Practice, pp.105-125.
13. O'Neill M.W. and Reese, L. (1999), “Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods”, Publication No. FHWA-IF-99-025, and ADSC-TL-4, Office of Implementation, McLean, VA.
14. Sowers, G.P. (1979), *Introductory Soil Mechanics and Foundations*, *Geotechnical Engineering*, 4th ed., McMillan, NY.
15. Wang, M.C. and Badie, A. (1984), Stability of Spread Footing above Void in Clay, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.110, No.11, pp.1591-1605.
16. Wang, M.C. and Badie, A. (1985), Effect of Underground Void on Foundation Stability, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.111, No.8, pp.1008-1019.
17. Wang, M.C. and Hsieh, C.W. (1987), Collapse Load of Strip Footing above Circular Void, *ASCE Journal of Geotechnical Engineering*, Vol.113, No.5, pp.511-515.

(접수일자 2010. 6. 11, 심사완료일 2010. 12. 28)