

수치해석을 이용한 강관합성말뚝의 보강효과 분석 (I) - 재료 강도 -

Analysis of Reinforcement Effect of Steel-Concrete Composite Piles by Numerical Analysis (I) - Material Strength -

김성렬* · 이주형** · 박재현*** · 정문경****

Kim, Sung-Ryul · Lee, Juhung · Park, Jae-Hyun · Chung, Moonkyung

Abstract

The steel pipe of steel-concrete composite piles increases the pile strength and induces the ductile failure by constraining the deformation of the inner concrete. In this research, the numerical models and the related input parameters were analyzed to simulate the axial load-movement relations, which were obtained from the compression loading tests for the cylindrical specimens of the steel pipe, the concrete, and the steel-concrete composite. As the results, the behavior of the steel pipe was simulated by the von-Mises model and that of the concrete by the strain-softening model, which decreases cohesion and dilation angles as the function of plastic strains. In addition, the reinforcing bars in the concrete were simulated by applying the yielding moment and decreasing the sectional area of the bars. The applied numerical models properly simulated the yielding behavior and the reinforcement effect of the steel-concrete composite piles. The parametric study for the real-size piles showed that the material strength of the steel-concrete composite pile increased about 10% for the axial loading and about 20~45% for the horizontal loading due to the reinforcement effect by the surrounding steel pipe pile.

Keywords : *steel-concrete composite pile, numerical analysis, drilled shaft, steel casing, yielding behavior*

요 지

강관합성말뚝의 강관은 내부 콘크리트의 변형을 억제하여 말뚝강도를 증가시키고 연성파괴를 유도하는 보강효과를 발휘한다. 본 연구에서는 강관, 콘크리트, 강관합성 시험체에 대하여 수행된 압축재하 실험의 하중-변위 곡선을 모사할 수 있는 해석모델 및 입력물성값을 분석하였다. 그 결과, 강관은 von-Mises 모델, 그리고 콘크리트는 소성변형률에 따라 점착력과 팽창각을 감소시키는 변형률 연화모델을 적용하여 실험결과를 모사하였다. 또한, 콘크리트 내부의 철근은 항복 모멘트 적용 및 철근의 단면적을 감소시켜 모사하였다. 본 연구에서 적용된 해석기법은 실험결과와 비교하여 강관합성말뚝의 항복거동 및 보강효과를 잘 모사할 수 있는 것으로 나타났다. 실험크기 말뚝에 대한 변수연구를 수행한 결과, 강관합성말뚝의 재료강도는 강관의 보강효과에 의해 축방향에 대해 약 10%, 횡방향에 대해 약 20~45% 증가하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 강관합성말뚝, 수치해석, 현장타설말뚝, 강관케이싱, 항복거동

1. 서 론

최근 구조물이 장대화 됨에 따라 구조물을 지지하는 기초 공법으로 대구경 현장타설말뚝이 많이 사용되고 있다. 대구경 현장타설말뚝의 일반적인 시공방법은 강관 케이싱으로 굴착 공벽을 지지하면서 강관 내부의 토사 및 암을 해머 글래브 및 RCD 장비 등을 이용하여 굴착하고, 굴착이 완료되면 케이싱 내부에 철근망을 삽입한 후 콘크리트를 타설하여 말

뚝체를 형성한다. 이 때, 강관 케이싱은 콘크리트 타설과 함께 제거하거나 공벽유지 등을 위하여 남겨두기도 한다. 강관 케이싱이 제거되지 않고 남겨지는 경우 강관은 내부 콘크리트의 변형을 구속하는 역할을 하여 콘크리트의 강도를 증가시키고 취성파괴가 아닌 연성파괴 거동을 유도한다.

강관-콘크리트 합성구조체에 압축하중이 증가하면 콘크리트 변형도가 0.002 정도에서 부피 팽창이 시작되고 콘크리트 압축강도의 약 95% 응력수준에서부터 강관의 인장력에

*정회원 · 동아대학교 토목공학과 조교수 · 공학박사 (E-mail : sungryul@dau.ac.kr)

**정회원 · 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원 · 공학석사 (E-mail : leejh73@kict.re.kr)

***정회원 · 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원 · 공학석사 (E-mail : jaehyeon@kict.re.kr)

****정회원 · 교신저자 · 한국건설기술연구원 지반연구실 책임연구원 · 공학박사 (E-mail : mkchung@kict.re.kr)

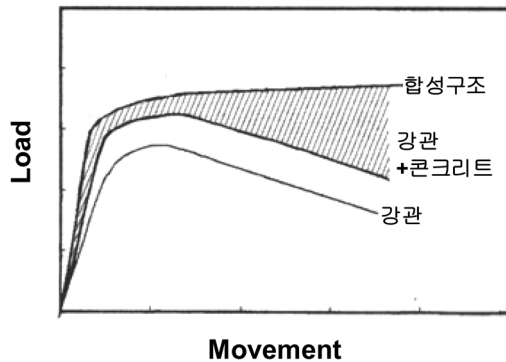


그림 1. 강관-콘크리트 합성구조체의 보강효과

의한 구속응력이 발생하게 된다. 이러한 강관과 콘크리트의 상호작용에 의해 그림 1에 나타난 바와 같이 합성구조의 강도는 강관과 콘크리트 각각의 강도를 합한 것보다 더 증가하는 것으로 알려져 있다(Kilpatrick과 Rangan, 1999).

국내 설계에서는 일반적으로 영구강관 케이싱의 보강효과를 무시하고 콘크리트만을 구조체로 고려하여 말뚝체의 강도를 산정한다. 그러나, 미국 시방기준(AASHTO, 2004)에서는 강관 케이싱의 두께가 3mm 이상인 경우에는 강관에 의한 재료강도 증가효과를 고려하여 설계하도록 규정하고 있다.

지금까지 강관-콘크리트 합성재료와 관련된 대부분의 연구는 말뚝이 아닌 건축구조의 기둥부재 또는 토목구조의 교각등을 대상으로 모형체 실험(엄진호 등, 2000; 송준엽 등, 2000) 또는 수치해석 방법(방춘석 등, 2002, 2003; Mirmiran 등, 2000; Kwon 등, 2002)을 통하여 연구되어 왔다.

지반공학 분야에서는 강관합성말뚝의 보강효과 등에 대한 연구가 거의 이루어지지 않았는데 그 이유는 말뚝의 재료강도가 커서 지반의 지지력이 설계를 지배하고 이에 따라 말뚝을 탄성체로 고려하였기 때문이다. 그러나, 최근의 대구경 현장타설말뚝은 단단한 임반에 근입되어 지반의 지지력이 말뚝의 재료강도보다 큰 경우가 빈번히 발생하고 있다. 그러므로, 지반공학 분야의 설계에서도 강관-콘크리트 합성거동 등을 고려하여 말뚝재료의 강도 및 변형특성을 연구하는 것이 필요해지게 되었다.

그러므로, 본 연구에서는 지반공학 분야에 널리 이용되는 범용 수치해석 프로그램을 이용하여 강관합성말뚝의 항복거동 및 보강효과를 분석하고자 하였다. 이를 위하여 기존에 수행된 콘크리트, 강관, 강관합성 시험체의 압축강도 시험결과를 이용하여 해석모델 및 입력값을 검증하였다. 그리고, 검증된 해석모델을 이용하여 실물크기의 말뚝에 대한 강관합성말뚝의 보강효과를 분석하였다.

2. 시험체 압축강도 실험

한국건설기술연구원(2008)에서는 강관, 콘크리트, 강관합성 말뚝의 재료거동을 분석하기 위하여 그림 2에 나타난 바와 같이 외경 200mm, 높이 400mm의 시험체를 각각 제작한 후 압축강도 실험을 수행하였다. 각 시험체의 제원은 표 1에 정리하였다. 강관합성 시험체는 강관 시험체와 동일한 강관의 내부에 콘크리트를 채워서 제작하였다.

그림 3(a)~그림 3(d)는 실험에서 얻어진 축방향 하중-변위

표 1. 시험체의 제원

구분	외경(mm)	두께(mm)	높이(mm)
강관	216.5	5.85	400
콘크리트	204.8	-	400
강관합성	216.5	-	400

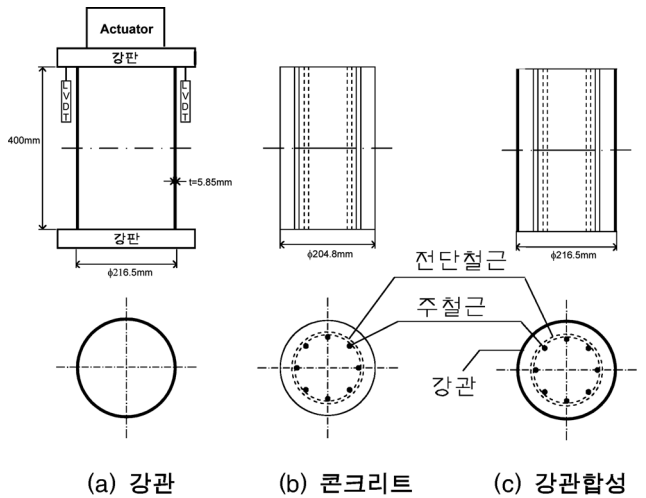


그림 2. 시험체의 단면과 압축시험 모식도(한국건설기술연구원, 2008)

결과이다. 결과를 보면, 그림 3(a)의 강관 시험체는 최대 약 1,000kN, 그림 3(b)의 콘크리트 시험체는 약 1,000~1,300 kN의 재하하중에서 재료항복이 발생하였다. 그림 3(c)와 그림 3(d)는 강관합성 시험체의 결과로서 각각 콘크리트 내부에 주철근(직경=10mm, 개수=8개, 피복두께=25mm)이 없는 경우와 있는 경우의 실험결과이다. 철근이 없는 경우에는 약 2,500kN, 철근이 있는 경우에는 약 2,700kN의 하중에서 항복이 발생하였다. 강관합성 시험체가 강관과 콘크리트의 각 항복하중의 단순한 합인 2,000~2,300kN보다 더 큰 재하하중에서 항복된 것은 강관 내에 채워진 콘크리트의 변형이 외부 강관에 의해서 구속되면서 콘크리트의 강도가 증가되었기 때문이다.

3. 시험체 압축강도 시험결과와 모사

3.1 구성모델

본 연구에서는 FLAC 3D 프로그램(Itasca, 2006)을 이용하여 말뚝재료의 항복거동에 대한 수치해석을 수행하였다. FLAC은 오랫동안 지반구조물의 설계 및 연구에 널리 이용되어 그 적용성이 검증된 프로그램이다. 그리고, 3차원 해석 프로그램을 적용한 이유는 말뚝의 축방향 거동과 함께 횡방향 거동 모사가 필요하였기 때문이다.

그림 4는 FLAC 3D에 적용된 강관 시험체(그림 4(a)), 콘크리트 시험체(그림 4(b)), 그리고 강관합성 시험체(그림 4(c))의 해석요소망을 보여준다. 해석요소망의 하단면은 x, y, z 방향의 변위를 고정시켰으며, 상단면에서 변위제어로 동일한 축방향 변위를 가하여 압축시험을 모사하였다.

각 시험체의 수치해석에 적용되는 구성모델은 다음과 같이 결정하였다. 강관 시험체(그림 3(a))의 경우 재료항복시 약간의 변형을 경화거동(strain hardening)을 보이고 있지만 전반

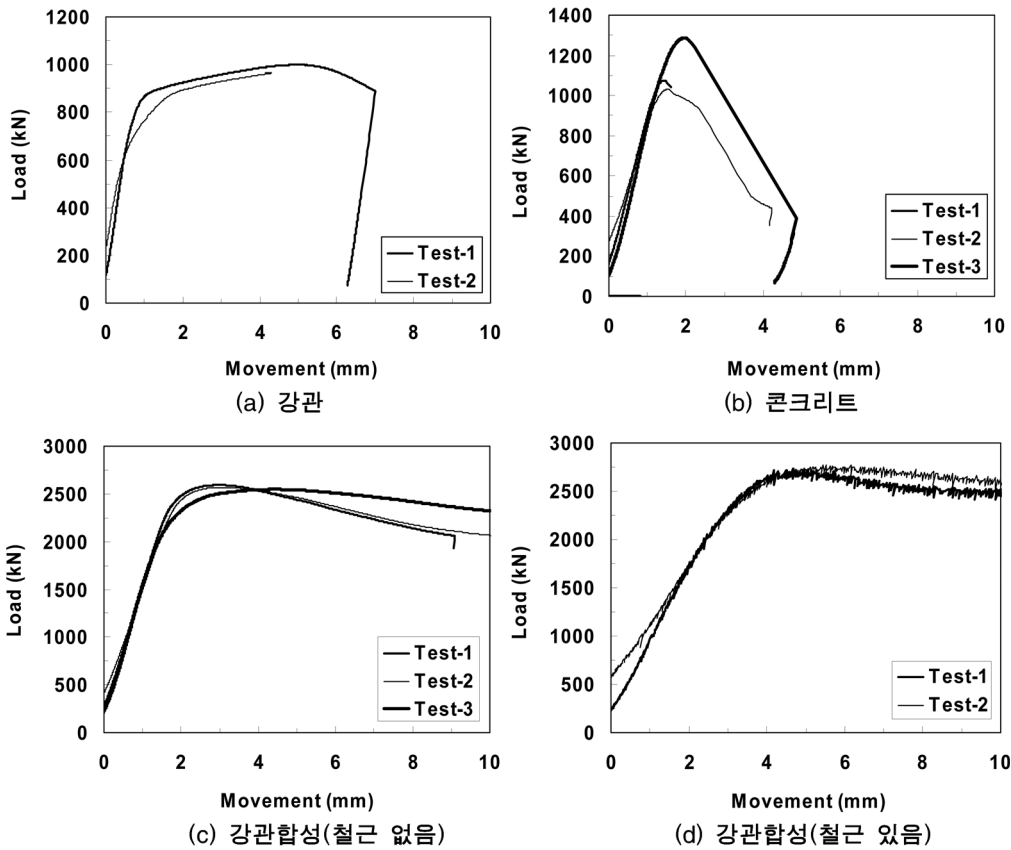


그림 3. 시험체의 압축강도 실험 결과

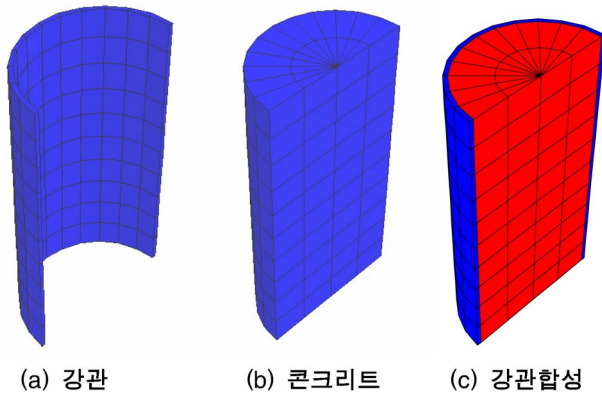


그림 4. 각 시험체의 해석 요소망

적으로 완전소성 거동을 보이며, 일반적으로 구속압의 영향을 받지 않는다. 그러므로, 강관의 거동을 모사하기 위하여 금속재료의 거동모사에 널리 이용되는 von-Mises 항복모델(von-Mises, 1913)을 적용하였다. 콘크리트 시험체(그림 3(b))는 항복 이후 변형률 연화거동(strain softening)을 보이고, 콘크리트 재료는 구속압에 비례하여 강도가 증가한다. 그러므로, 콘크리트의 구성모델은 ① 구속압에 따른 강도증가 효과를 고려할 수 있는 Mohr-Coulomb 모델과 ② Mohr-Coulomb 모델을 기반으로 항복이후의 강도정수 값을 감소시키는 변형률 연화모델의 2가지 모델을 적용하였다. 강관합성 시험체는 강관과 콘크리트 시험체에 적용된 모델을 동일하게 이용하였다. 그러므로, 강관합성 시험체의 수치해석 모사 결과가 실험결과(그림 3(c) 및 3(d))와 일치하면 강관과 콘크리트 시험체에 적용된 구성모델 및 입력물성값이 검증되는 것으로 판단할 수 있다.

3.2 강관 시험체의 거동모사

표 2는 강관 시험체에 적용된 수치해석 입력자료이다. Drucker-Prager 모델(Drucker and Prager, 1952)에서 항복면 크기가 구속압에 영향을 받지 않고 일정해지도록 하여 결과적으로 von-Mises 모델과 동일해지도록 하였다. 탄성계수는 실험체 중앙부에 부착된 변형률계로부터 측정된 변형률과 재하응력의 관계로부터 얻어진 값을 적용하였다. 강관의 항복응력은 실험에서 얻어진 압축강도를 이용하여 산정하였다. 그 결과 그림 5와 같이 수치해석 결과가 실험에서 얻어진 하중변위 곡선을 잘 모사하는 것으로 나타났다.

3.3 콘크리트 시험체의 거동모사

콘크리트 재료는 강관합성 말뚝의 합성효과에 중요한 영향을 미치므로 구성모델 및 입력변수를 적절히 산정하는 것이 중요하다. 콘크리트 시험체의 구성모델은 기본적으로 구속압 효과를 고려할 수 있는 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다. Mohr-Coulomb 모델은 강도정수인 점착력 c 와 내부마찰각 ϕ 를 적용하여 항복강도를 모사한다. 그러나, Pott (2003)가 지적하였듯이 항복이후의 소성변형률을 산정할 때 이용되는 관련 유동법칙(associated flow rule)과 비관련 유동법칙(non-associated flow rule)의 선정이 해석결과에 큰 영향을 미치게 된다. 관련 유동법칙은 재료의 탄성과 소성상태의 경계를 정의하는 항복면(yield surface)과 소성 변형률에 관계

표 2. 강관의 수치해석 입력자료

해석모델	E (kPa)	ν	γ (kN/m ³)	σ_y (kPa)
von-Mises 모델	1.532×10^8	0.3	76.98	250,000

여기서, E=탄성계수, ν =포아송비, γ =단위중량, σ_y =항복응력

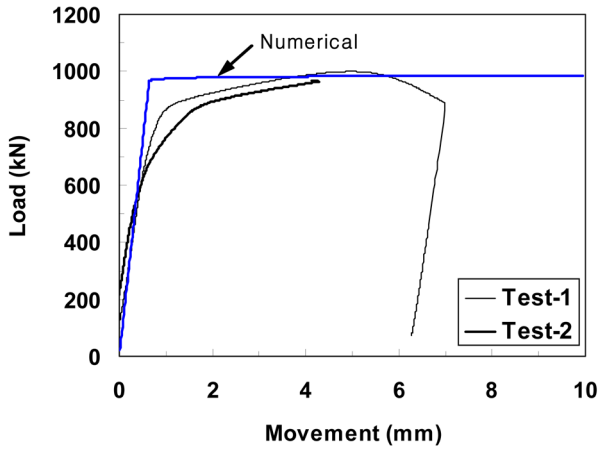


그림 5. 강관 시험체의 실험결과 모사

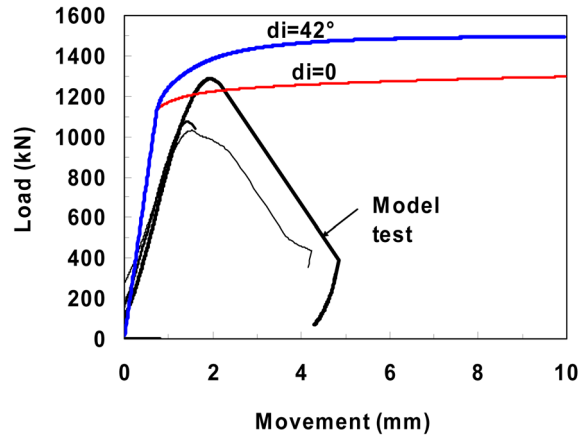


그림 6. 콘크리트 시험체의 실험결과 모사(Mohr-Coulomb모델 적용)

되는 소성 포텐셜면(plastic potential surface)을 동일하게 정의하는 법칙이며, 비관련 유동법칙은 항복면과 소성 포텐셜면을 서로 다르게 정의하는 법칙이다. 이 유동법칙은 재료 항복이후의 부피 팽창을 모사하는 팽창각(dilation angle)의 적용여부에 따라 재료의 팽창각이 내부마찰각과 동일하면 관련 유동법칙이 되며, 팽창각이 내부마찰각보다 작은 경우에는 비관련 유동법칙이 된다.

표 3은 콘크리트 시험체의 수치해석 입력자료이며 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였다. 탄성계수는 실험체 중앙부에 설치된 변형률계로부터 측정된 변형률과 재하응력의 관계로부터 결정된 값을 적용하였다. 점착력 및 마찰각은 시험에서 얻어진 콘크리트의 압축강도와 인장강도(=압축강도의 10% 적용)로부터 결정되는 2개의 Mohr원의 접선으로부터 산정하였다. 그리고, 유동법칙의 종류가 해석결과에 미치는 영향을 분석하기 위해 팽창각을 내부마찰각과 동일한 42°를 적용한 경우(관련 유동법칙의 적용)와 0를 적용한 경우(비관련 유동법칙의 적용)를 고려하였다.

그림 6은 유동법칙의 종류가 해석결과에 미치는 영향을 보여준다. 그림에서 'di=42°' 곡선은 팽창각 42°를 적용한 경우, 'di=0' 곡선은 팽창각 0을 적용한 경우의 해석결과이다. 실험결과는 변형률 연화거동을 보이는 반면 수치해석 결과는 변위에 따라 강도가 계속 증가하는 변형률 경화거동을 보인다. 팽창각이 42°인 경우에는 항복 이후의 콘크리트 부피팽창이 항복되지 않은 부분에 의해 억제되면서 콘크리트의 구속압이 증가하고 이에 따라 항복강도가 증가하게 된다. 팽창각이 0인 경우에는 항복 이후에 부피팽창이 발생하지 않으므로 강도증가 효과가 나타나지 않는다.

콘크리트 재료에 대한 변형률 연화거동을 실제적으로 모사하기 위하여 변형률 연화모델을 적용하였다. 변형률 연화모델은 표 3의 입력값을 가지는 Mohr-Coulomb모델에서 재료의 항복 이후 점착력, 내부마찰각, 팽창각 등을 소성변형률에 대하여 감소/증가시킴으로써 그림 7과 같이 항복 이후의 변형률 연화/경화 거동을 모사할 수 있다.

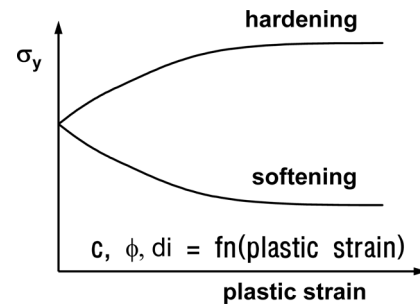


그림 7. 변형률 연화/경화 모델

그러므로, 실험에서 얻어진 하중-변위 곡선을 모사하기 위하여 여러 번의 시행착오를 통해 그림 8과 같이 소성변형률에 따른 점착력과 팽창각 감소곡선을 결정하였다. 처음에는 철근이 없는 경우에 대하여 'no beam'으로 표시한 점착력과 팽창각 감소곡선을 적용하였으며, 이 후 콘크리트 내부에 보요소를 이용하여 철근을 설치한 경우에는 'beam'으로 표시한 점착력과 팽창각 곡선을 적용하여 실험결과를 모사하였다.

콘크리트 내부의 철근은 표 4의 입력변수값을 적용하여 모사하였다. 철근 해석모델은 구조요소 중 보요소(bean)를 적용하였는데 보요소는 기본적으로 축력과 휨모멘트에 대하여 탄성거동을 하게 된다. 그러나, 철근이 큰 변형에서도 탄성거동을 지속할 경우 실제보다 큰 저항력이 발생하므로 축력과 휨모멘트의 항복거동을 모사하는 것이 필요하다. 휨에 대한 항복은 항복모멘트를 적용하여 모사하였다. 이 때 항복모멘트값(P_{moment})은 항복응력이 전체 단면에서 발생한 후 최종 힘이 반단면의 무게중심에 작용하는 것을 고려하여 식 (1)과 같이 산정하였다.

$$P_{moment} = \sigma_t \times \left(\frac{2d^2}{4}\right) \times \left(\frac{2d}{3\pi}\right) = \sigma_t \times \left(\frac{d^3}{6}\right) \quad (1)$$

여기서, d =철근 직경

σ_t =철근 항복응력

표 3. 콘크리트의 수치해석 입력자료

해석모델	E (kPa)	ν	γ (kN/m ³)	c (kPa)	ϕ (°)	팽창각(°)
M-C 모델	1.84×10^7	0.2	22.75	7.63×10^3	42	42(관련 유동법칙) 0(비관련 유동법칙)

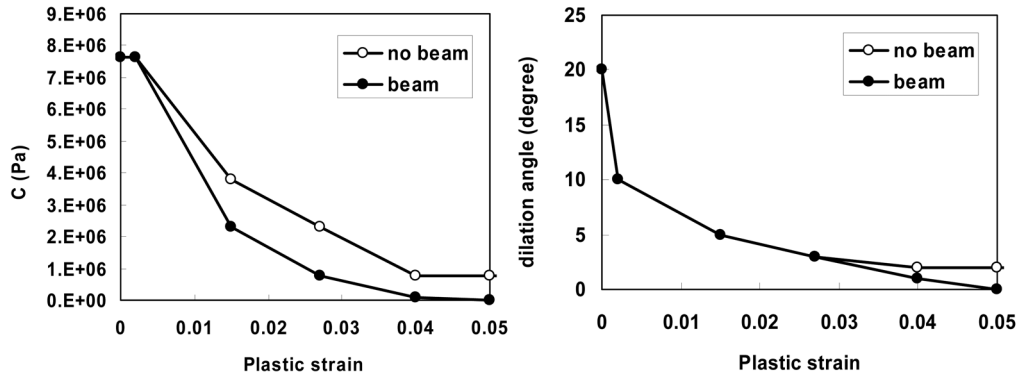


그림 8. 소성변형률에 따른 접촉력과 팽창각 감소관계

표 4. 철근의 수치해석 입력자료

해석모델	E (kPa)	ν	단면적(m^2)	$I_x, I_y(m^4)$	σ (kPa)	P_{moment} (Pa · m)
beam 모델	1.532×10^8	0.3	실단면적의 1-1/100	4.908×10^{-10}	392,265	65.37

여기서, I_x, I_y = 철근단면의 단면2차 모멘트

보의 축방향 항복은 해석 모델에서 고려할 수 없었기 때문에 철근의 단면적을 실제 단면적의 1~1/100로 감소시키면서 축방향 항복을 모사하고자 하였다. 그림 9의 해석결과를 보면 철근의 실제단면적을 입력한 경우(1xArea)에는 철근의 축방향 저항력이 과도하게 나타나 저항력이 계속 증가하는 결과가 얻어졌으며, 실제단면적의 1/5 이하를 입력한 경우에는 콘크리트의 변형률 연화거동이 모사되는 것으로 나타났다. 본 해석에서는 재료의 항복강도를 모사하는 것이 중요하였기 때문에 이후의 해석에서는 보의 단면적을 1/5로 감소시킨 값을 입력하였다.

철근단면적을 1/5로 감소시킨 후 실험의 하중-변위 곡선이 모사되도록 시행착오를 통해 변형률 연화모델의 접촉력과 팽창각 감소곡선을 변화시켰으며, 그 결과 그림 8에서 'beam'으로 나타난 접촉력과 팽창각 감소곡선을 최종적으로 결정하였다. 이후의 모든 해석에서는 그림 8의 'beam'의 접촉력과 팽창각 감소 곡선을 적용하였다. 그림 10은 최종적으로 얻어진 콘크리트의 해석결과로서 실험의 항복강도 및 파괴 이후의 거동을 적절히 모사할 수 있었다. 그림에서 실험의 하중-변위 곡선의 초기 강성이 수치해석의 강성보다 작은 이유는 실험체와 재하관의 초기 접촉 불량 등의 영향으로 변위가 크게 발생하였기 때문으로 판단된다. 또한, 수치해석 결

과에서 항복 이후 약 2.5mm변위에서부터 저항력의 감소폭이 작아지는 것은 철근이 축방향에 대해 탄성거동을 하여 큰 변위에서 철근의 축방향 저항력이 실제보다 크게 발휘되었기 때문이다.

3.4 강관합성 시험체의 거동모사

강관 합성 시험체의 수치해석 모델은 3.2절과 3.3절에서 얻어진 강관과 콘크리트의 입력 물성값 및 구성모델을 동일하게 적용하였다. 즉, 강관은 von-Mises모델, 콘크리트는 변형률 연화모델, 내부 철근은 보요소를 적용하였다. 그리고, 강관과 내부 콘크리트는 서로 절점을 공유하여 완전 부착된 것으로 모사하였다. 이것은 강관과 콘크리트 사이에 콘크리트의 항복강도를 가지는 인터페이스를 설치하여 전단방향의 미끄러짐을 모사한 결과 인터페이스가 없이 완전 부착된 경우와 동일한 하중-변위 곡선결과가 나타났기 때문이다.

그림 11은 강관합성 시험체의 수치해석 모사결과로서 콘크리트 내부에 철근이 없는 경우와 있는 경우의 결과이다. 항복이후에 수치해석의 저항력이 조금 작게 산정되었지만 시험체의 항복강도 및 연성 파괴 거동은 잘 모사되는 것으로 나타났다. 특히, 실험에서 철근이 없는 경우에 2,500kN, 철

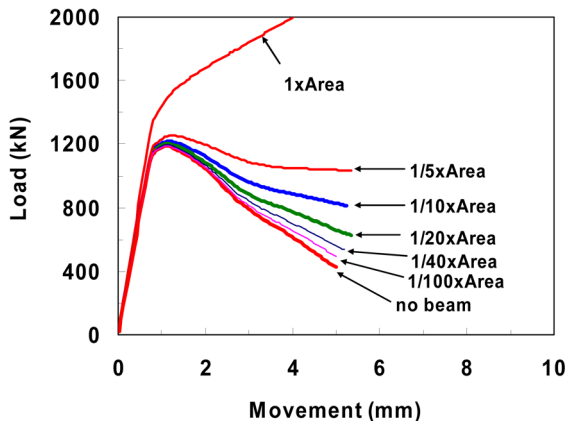


그림 9. 철근 축방향 강성의 영향(변형률 연화 모델, 그림 8의 'no beam'곡선 적용)

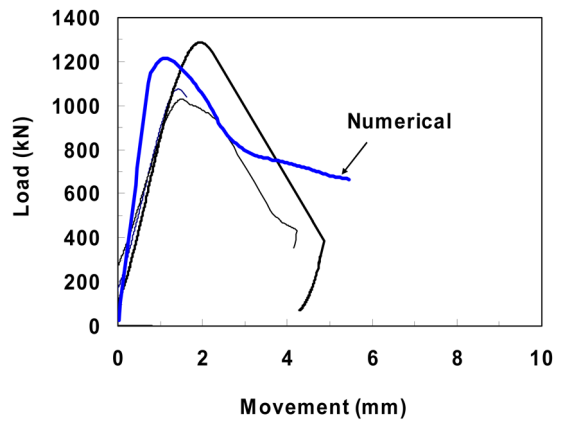
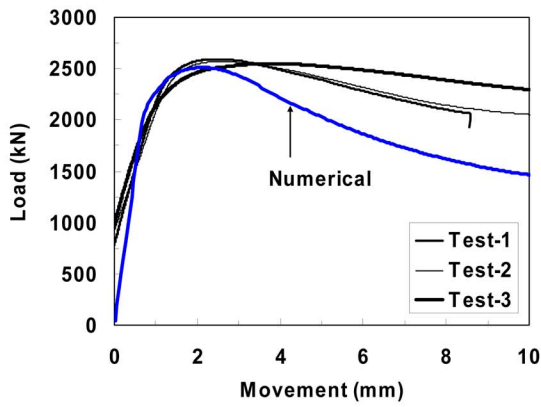
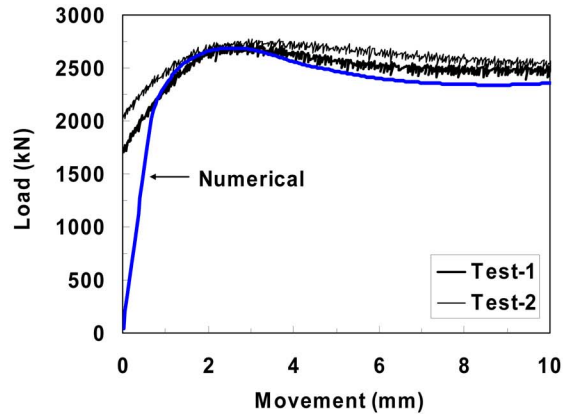


그림 10. 콘크리트 시험체의 실험결과 모사(변형률 연화 모델, 그림 8의 'beam'곡선 적용)



(a) 강관합성(철근 없음)



(b) 강관합성(철근 있음)

그림 11. 강관합성 시험체의 실험결과 모사(변형률 연화모델 적용)

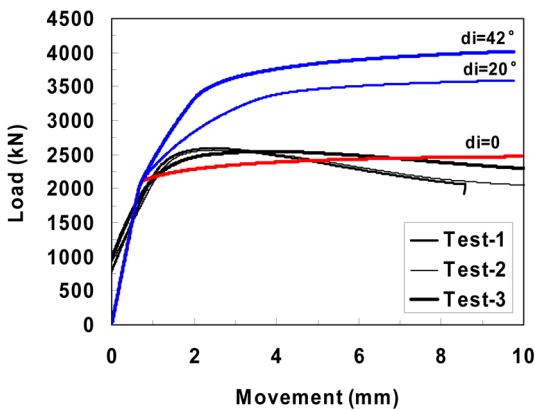


그림 12. 강관합성 시험체의 실험결과 모사(Mohr-Coulomb모델 적용)

근이 있는 경우에 2,700kN의 항복강도를 나타내었는데, 수치해석에서도 동일한 항복강도가 예측되어 강관과 콘크리트에 적용된 구성모델 및 입력값이 적절히 결정된 것을 알 수 있다.

그림 12는 해석결과와의 비교를 위하여 콘크리트에 Mohr-Coulomb모델을 적용하고, 이 때 콘크리트의 팽창각 값을 0, 20°, 42°로 일정한 값이 되도록 입력하였다. 그 결과 하중-변위 곡선은 변형률 경화거동을 보여주었으며, 경화정도는 콘크리트의 팽창각 값에 영향을 받았다. 팽창각이 0인 경우에는 항복이후 소성부피 변형률이 발생하지 않으므로 강도가 증가하지 않는 완전소성거동이 나타나는데 반하여 팽창각이 콘크리트 내부마찰각과 동일한 42°를 적용한 경우에는 초기 항복강도의 약 2배까지 강도가 증가하였다. 그러므로, 강관합성 모형체의 거동을 모사할 때 팽창각 값의 결정과 콘크리트의 변형률 연화거동을 모사하는 것이 중요한 것을 알 수 있다.

4. 실물크기 말뚝의 거동모사

4.1 해석조건

앞서 결정된 각 재료의 구성모델 및 입력물성값을 실물크기 말뚝에 적용하여 재료거동 및 강관합성말뚝의 보강효과를 분석하였다. 말뚝길이는 모든 직경에 대하여 20m를 동일하게 적용하였다. 말뚝의 외경, 강관두께, 그리고 콘크리트

직경은 표 5에 나타내었다. 말뚝재료는 강관, 콘크리트, 강관합성의 3가지, 말뚝외경은 1.0m~4.0m의 7가지, 그리고 각각에 대하여 수직과 수평방향의 재하조건 2가지 등 총 42가지 조건에 대한 해석을 수행하였다. 수평방향 재하시에는 수직방향 해석결과에서 얻어진 수직방향 재료항복하중의 50% 하중을 재하한 후, 수평방향으로 하중을 가하였다.

표 6은 각 재료에 대하여 수치해석에 이용된 기본적인 해석 입력값을 보여준다. 각 재료물성값은 앞서 결정된 값을 기본적으로 적용하였다. 콘크리트 단면내 철근은 피복두께 10cm, 철근면적비 2%, 철근개수 14개가 설치되도록 하였다.

해석 요소망은 시험체에서의 모사방법과 같이 반단면을 모델링하였다. 그리고, 경계조건의 경우 바닥면에 대하여 x, y, z의 3방향 변위를 모두 고정하였으며, 말뚝두부 상단면은 수직재하의 경우 z방향으로, 수평재하의 경우 x방향으로 변위를 제어하면서 하중을 가하였으며 나머지 방향의 변위발생을 고정하였다.

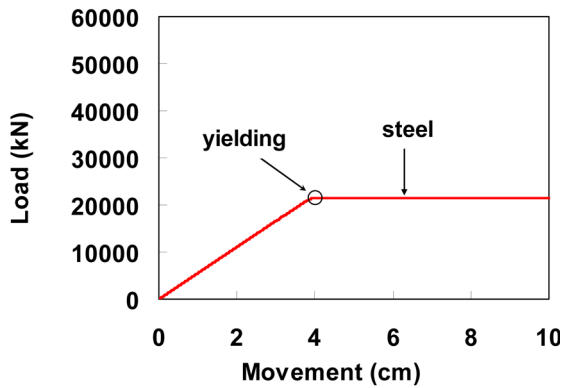
표 5. 해석말뚝의 제원(말뚝길이=20m)

말뚝외경(m)	강관두께(m)	콘크리트직경(m)
1.0	0.018	0.964
1.5	0.020	1.460
2.0	0.022	1.956
2.5	0.024	2.452
3.0	0.026	2.948
3.5	0.028	3.444
4.0	0.030	3.940

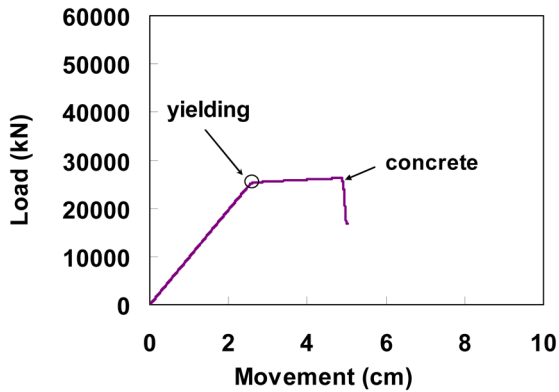
표 6. 말뚝재료의 해석입력자료

해석모델	콘크리트	강관	철근 ¹⁾
	변형률 연화모델	von-Mises	beam모델
E (kN/m ²)	26,300,000	200,000,000	200,000,000
ν	0.2	0.3	0.3
γ (kN/m ³)	22.75	76.98	76.98
c (kN/m ²)	그림 8. 'beam'곡선	196,132	-
ϕ (°)	42	-	-
팽창각 (°)	그림 8. 'beam'곡선	-	-

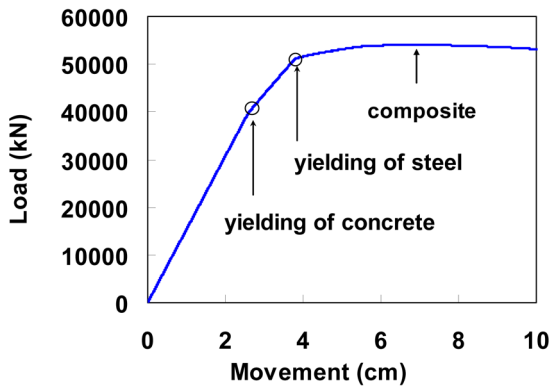
¹⁾(해석에 이용된 철근단면적) = 1/5 × (실제 철근단면적), P_{moment} 적용



(a) 강관



(b) 콘크리트



(c) 강관합성

그림 13. 각 재료의 하중-변위곡선 및 항복발생(말뚝직경=1m)

4.2 해석결과 - 수직방향 재하

그림 13은 수직방향 재하시 말뚝재료별 수직하중-변위 곡선을 보여준다. 강관말뚝은 약 4mm 수직변위, 그리고 콘크리트 말뚝은 약 2.6mm의 수직변위에서 항복이 발생하였다. 강관합성 말뚝은 콘크리트가 파괴된 시점에 강성이 약간 감소하였으나 강관의 보강효과에 의해 강도가 계속 증가하다 강관이 항복되는 시점에서 완전항복이 발생하였다.

그림 14는 수직방향 재료 항복하중을 말뚝재료와 말뚝직경에 대하여 정리하였다. 말뚝직경이 증가함에 따라 각 말뚝의 항복하중은 면적에 비례하여 증가하는 것으로 나타났다. 강관합성말뚝의 보강성능을 분석하기 위해 그림 15와 같이 강관합성말뚝의 항복하중을 강관과 콘크리트 말뚝의 항복하중의 합으로 나누어 그 비율을 산정하였다. 그 결과, 비율이 말뚝직경에 관계없이 약 1.1정도로 나타나 약 10% 정도의 보강효과가 발생하는 것으로 나타났다.

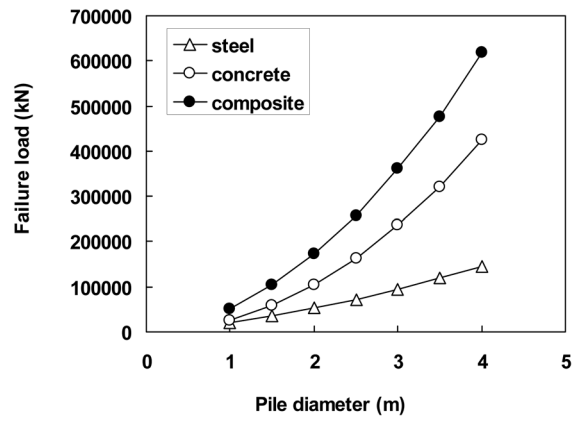


그림 14. 각 재료의 말뚝직경에 따른 수직방향 재료항복 하중

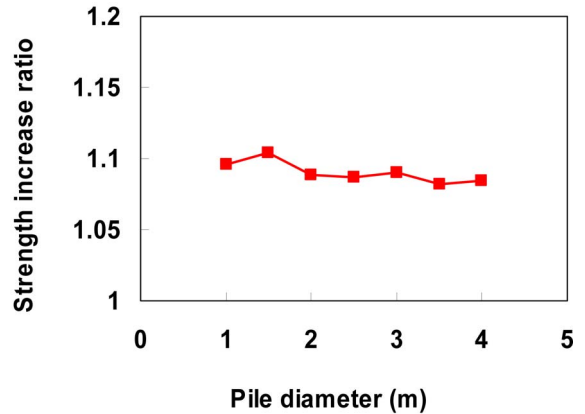


그림 15. 말뚝직경에 따른 강관합성말뚝의 수직방향 보강효과
[보강효과 = (강관합성말뚝 항복하중)/(강관 항복하중 + 콘크리트 항복하중)]

4.3 해석결과 - 수평방향 재하

그림 16은 수평방향 재하시 수평방향 하중-변위 곡선을 보여준다. 그림을 보면 수평방향 저항력이 계속적으로 증가하므로 수평방향 항복하중은 하중-변위 곡선의 초기부분의 접선과 소성과괴부분의 접선의 교차점에서의 하중으로 결정하였다.

그림 17은 말뚝직경 및 재료에 따른 항복하중을 보여준다. 말뚝직경이 증가함에 따라 항복하중이 말뚝 단면적에 비례하여 포물선 형태로 증가하는 것으로 나타났다.

그림 18은 수평방향 항복하중에 대한 강관합성말뚝의 보강성능을 분석하기 위해 강관합성말뚝의 항복하중을 강관과 콘크리트 말뚝의 항복하중의 합으로 나누어 그 비율을 산정하였다. 그 결과, 비율이 1.2~1.45로서 약 20%~45%의 보

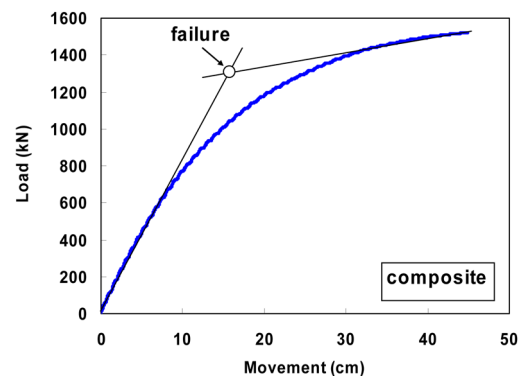


그림 16. 수평방향 항복하중의 결정(말뚝직경=1m, 강관합성말뚝, 수직구속압=수직방향 재료 항복하중의 50%)

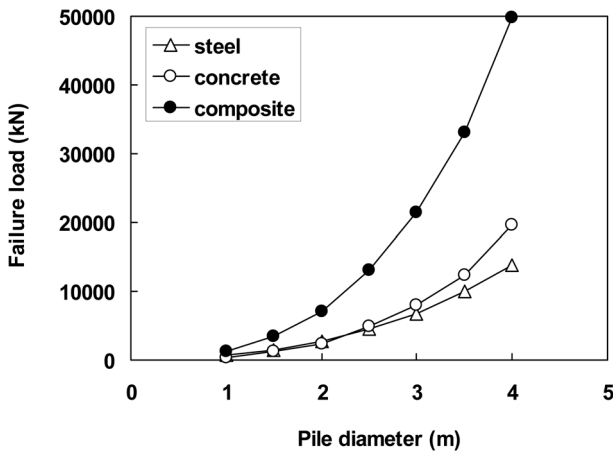


그림 17. 말뚝직경 및 재료에 따른 수평방향 재료항복하중

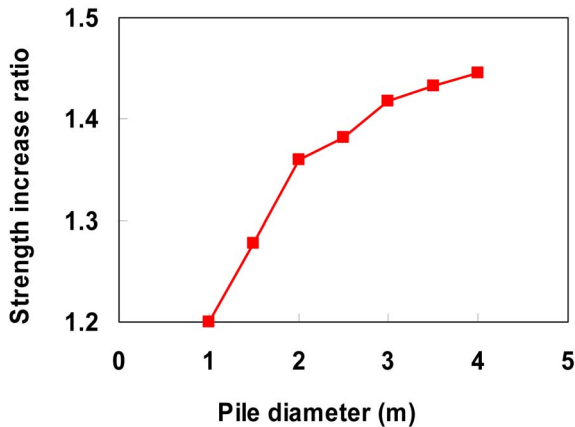


그림 18. 말뚝직경에 따른 강관합성말뚝의 수평방향 보강효과
 $(\text{보강효과} = (\text{강관합성말뚝 항복하중}) / (\text{강관 항복하중} + \text{콘크리트 항복하중}))$

강효과가 있었다. 보강효과는 말뚝직경이 증가함에 따라 초기에 급격히 증가하며 이후 점차 수렴되는 것으로 나타났는데 이는 본 해석조건에서 전체단면적 중 강관이 차지하는 단면적 비율이 점차 작아졌기 때문으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 말뚝재료들의 탄소성 거동 및 강관합성 말뚝의 보강효과를 분석하기 위하여 지반공학 분야에서 널리 이용되는 수치해석 모델들을 적용하여 압축강도 시험결과 모사 및 변수연구를 수행하였으며, 그 결과 다음의 결론을 도출하였다.

1. 콘크리트 재료는 구속압에 따라 강도가 증가하고 항복 이후 변형을 연화거동을 보이므로 강관합성말뚝의 거동을 잘 예측하기 위해서는 이러한 거동을 수치해석에서 적절히 모사하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 항복이후 점착력과 팽창각 값을 감소시키는 변형을 연화모델을 적용하여 변형을 연화거동을 모사하였다. 또한, 콘크리트 내부 철근의 항복은 모멘트 적용 및 철근의 단면적을 감소시켜 모사하였으며 그 결과 콘크리트 시험체의 하중-변위 곡선을 잘 모사할 수 있었다.
2. 강관 재료는 von-Mises 모델, 콘크리트 재료는 변형을 연

화모델, 철근은 항복모멘트를 적용한 보모델을 적용하여 강관과 콘크리트 시험체의 하중-변위 곡선을 모사하였다. 그 후 강관과 콘크리트에 적용된 동일한 해석모델로 강관 합성 시험체의 실험결과를 모사한 결과 본 연구의 해석기법이 강관합성 시험체의 항복거동 및 보강효과를 잘 모사하는 것으로 나타났다.

3. 실험크기 말뚝에 대하여 수직 및 수평하중을 가하여 강관 합성말뚝의 보강효과를 분석하였다. 그 결과, 강관합성말뚝의 항복하중은 축방향의 경우 말뚝직경에 관계없이 강관과 콘크리트 항복하중 합치의 약 1.1배, 수평방향의 경우 강관과 콘크리트 항복하중 합치의 1.2~1.45배로 나타났다. 즉, 재료강도 측면에서 강관합성말뚝이 동일한 직경의 강관과 콘크리트 말뚝에 비하여 수평방향의 보강효과가 뛰어난 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원의 기관고유사업인 ‘고효율 하이브리드 대형 기초 공법 개발(II)’ 과제의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

방춘석, 이준석, 송하원(2002) 연화 거동을 갖는 콘크리트의 3차원 탄소성 해석, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제22권 제6A호, pp. 1449-1457.

방춘석, 송하원, 변근주(2003) 다축 압축응력을 받는 콘크리트의 파괴거동 해석에 관한 연구, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제23권 제4A호, pp. 785-793.

송준엽, 권영봉, 김성근(2000) 콘크리트충전 강합성교각의 구조적 거동에 관한 연구, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제20권 제5A호, pp. 737-746.

엄진호, 송준엽, 윤석구, 권영봉(2000) 콘크리트 충전 합성기둥의 거동에 대한 실험적 연구, **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제20권 제1A호, pp. 107-114.

한국건설기술연구원(2008) **고효율 하이브리드 대형 기초공법 개발(II)**.

AASHTO (2004) **AASHTO LRFD Bridge Design Specifications**.

Drucker, D.C. and Prager, W. (1952) Soil mechanics and plastic analysis for limit design, *Quart. Appl. Math.*, Vol. 10, pp. 157-165.

Itasca (2006) **FLAC 3D ver. 3.1 User's Guide**

Kilpatrick, E. and Rangan, B.V. (1999) Influence of interfacial shear transfer on behavior of concrete filled steel tubular columns, *ACI Journal*, Vol. 96, No. 4, pp. 642-648.

Kwon, M. and Spacone, E. (2002) Three-dimensional finite element analyses of reinforced concrete columns, *Computers and Structures*, Vol. 80, pp. 199-212

Mirmiran, A., Zagers, K., and Yuan, W. (2000) Nonlinear finite element modeling of concrete confined by fiber composites, *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 35, pp. 79-96.

Pott, D.M. (2003) Numerical analysis: a virtual dream or practical reality?, *Geotechnique*, Vol. 53, No. 6, pp. 535-573.

Von Mises, R. (1913) *Mechanik der festen Körper im plastisch deformation*, *Zustand. Nachr. Ges. Wiss. Göttingen*, 582.

(접수일: 2009.6.3/심사일: 2009.8.3/심사완료일: 2009.9.20)