

말뚝-기둥 일체형 교각 기초의 내진해석 및 철근 상세

Seismic Analysis and Reinforcement Details of Integral Pile Shaft-Column Foundations

손혁수*

최인기**

이상희***

양종호****

Son, Hyeok-Soo

Choi, In-Ki

Lee, Sang-Hee

Yang, Jong-Ho

ABSTRACT

Integral pile shaft-column foundations are increasingly popular thanks to not only the comparative advantage of economy in constructing large cast-in-drilled-hole(CIDH) piles compared with driven piles with pile cap footings but also being free from problems associated with the critical column-footing connection. In this paper, the structural characteristics of integral pile shaft-column foundations as well as seismic analysis methodology and reinforcement details for seismic design are introduced.

1. 서론

말뚝-기둥 일체형 교각 기초는 기둥-말뚝캡-말뚝의 3가지 요소로 구성되는 일반적인 기초 형식과는 달리 말뚝캡을 설치하지 않고 말뚝과 기둥을 단일부재로 사용하는 기초를 말한다. 말뚝은 지름이 2.0~3.5m인 천공말뚝(cast-in-drilled-hole pile)으로서 대구경 현장타설 콘크리트말뚝의 경제적인 시공성으로 인해 말뚝캡이 있는 말뚝기초에 비해 경제적으로 우수한 장점을 가지고 있다. 또한 교각과 기초의 철근배근 등 연결상세에 따른 시공상의 문제점이 발생하지 않으며, 횡방향 하중에 대하여 유연한 거동을 보임으로서 내진저항능력이 우수하다. 국내에서는 시공사례가 드물지만 대구경 말뚝이므로 말뚝 1본당 횡방향 저항력이 크고, 말뚝캡이 없으므로 터파기량이 감소하고, 기초의 굴착과 동시에 지지층의 확인 가능, 주변지반의 교란 최소화 및 시공시 소음과 진동의 최소화 등의 장점으로 인해 외국의 경우 말뚝-기둥 일체형 교각 기초의 시공이 증가하는 추세에 있다. 그림 1은 말뚝-기둥 일체형 교각 기초의 대표적인 시공사례를 나타낸 것으로서 국내에서는 인천대교 고가교 구간에 처음으로 적용되어 현재 설계 및 시공이 이루어지고 있다. 본 논문에서는 말뚝-기둥 일체형 교각 기초의 형식과 구조적 특징을 소개하고 지진하중에 대한 구조해석 방법 및 내진설계를 위한 철근상세에 관한 자료를 제공하고자 한다.

* 정회원, 서영엔지니어링 구조설계실/구조2팀, 차장, 공학박사

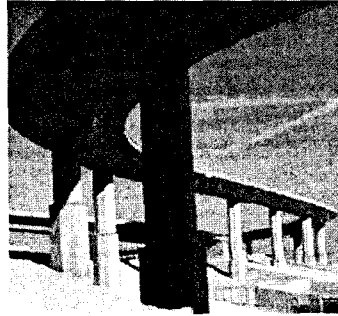
** 서영엔지니어링 구조설계실/구조1팀, 차장

*** 서영엔지니어링 구조설계실/구조3팀, 상무, 구조기술사

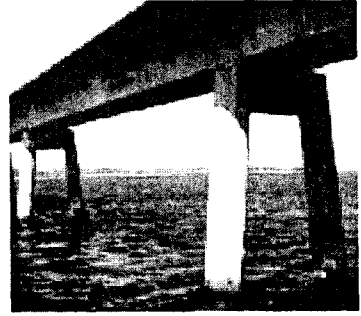
**** 삼성건설 인천대교현장 설계1팀, 차장



(a) 105/405 Interchange (미국)



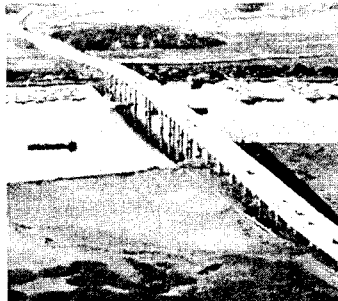
(b) I-15/US 95 Interchange (미국)



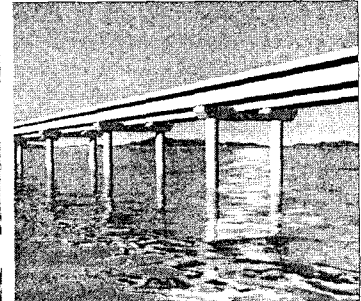
(c) Dornoch Firth Bridge (스코트랜드)



(d) San Francisco Bay Area (미국)



(e) Maybank Highway Bridge (미국)



(f) 인천대교 고가교 (한국, 건설 중)

그림 1 말뚝-기둥 일체형 교각 기초의 시공사례

2. 말뚝-기둥 일체형 교각 기초 형식

말뚝-기둥 일체형 교각 기초의 형식은 그림 2와 같이 Type I과 Type II의 두 가지 형식으로 구분할 수 있다.

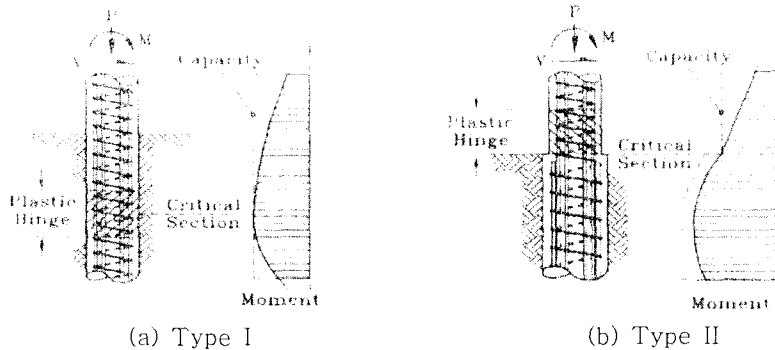


그림 2 말뚝-기둥 일체형 교각 기초 형식

Type I 형식(그림 2(a))의 특징은 1) 시공이음 이외에는 말뚝과 기둥의 구분이 없으며, 2) 교각과 기초의 연결상세에 따른 문제점을 고려할 필요가 없고, 3) 최대휨모멘트는 일반적으로 지반면 아래 말뚝직경의 1.5~2.5배 깊이에서 발생하며, 4) 단면직경이 동일한 경우, 휨모멘트의 변화가 비교적 작아서 소성힌지가 비교적 넓게 발생하며 그로인해 큰 소성변형이 발생하기 이전까지 콘크리트가 파괴되는 일은 발생하지 않으며, 5) 다만, 소성힌지가 지반내부에 생기므로 지진하중 작

용시 지반을 굴착하지 않고서는 소성힌지의 형성여부를 파악하기 곤란하다. Type II 형식(그림 2(b))의 특징은 1) 지상부 교각 하단에 소성힌지가 생기도록 지중부의 말뚝 직경을 증가시킨 것으로서 지진하중 작용시 말뚝은 탄성응답 상태에 있도록 설계하여 근본적으로 전체 교량 시스템의 지진응답 변위가 작아진다. 2) 다만, 휨모멘트의 변화로 인해 동일한 직경의 말뚝에 비해 소성힌지의 형성길이가 상대적으로 짧아지고 그로인해 콘크리트의 압축파괴가 빨리 생겨 소성회전 능력이 감소된다. 3) 즉, 과도한 지진하중 작용에 의해 소성변형이 발생하는 경우 연성능력이 감소되어 Type I 형식에 비해 상대적으로 취성적(brittle)인 거동이 예상되고, 4) 공사비가 상대적으로 증가되어 경제적으로 불리하다.

3. 설계기준

말뚝-기둥 일체형 교각 기초의 설계에 관한 도로교설계기준 및 AASHTO LRFD Bridge Design Specifications의 주요내용을 정리하면 표 1~2와 같다. 도로교설계기준과 AASHTO LRFD의 관련규정은 근본적으로 동일하거나 유사하지만, 내진설계 규정의 경우 표 2에 나타낸 것과 같이 AASHTO LRFD에서는 내진설계시 적용하는 응답수정계수가 교량의 중요도에 따라 3가지로 구분되며, 특히 말뚝/기초 및 기둥/코빙 연결부에 대한 철근상세를 규정하고 있고 내진설계에 대한 철근상세가 도로교설계기준에 비해 보다 구체적이고 엄격하게 규정되어 있음을 알 수 있다. 또한 말뚝의 근입 및 말뚝철근의 정착에 관한 규정이 도로교설계기준의 경우 내진설계편에 기술(표 2)되어 있는 반면 AASHTO LRFD의 경우 일반편에 기술(표 1)되어 있고 도로교설계기준에 비해 보다 구체적으로 기술되어 있음을 알 수 있다.

표 1 말뚝-기둥 일체형 교각 기초의 설계 관련규정 - 일반사항

규정	내용
4.4.5, 4.5.4 압축부재	4.4.5 강도설계법에 따른 압축부재 설계 4.5.4 허용응력설계법에 따른 압축부재 설계
5.5.5 설계지반면	· 평상시 : 세굴 및 지반면의 저하, 압밀침하, 동결융해, 시공에 의한 지반교란 영향 고려. · 내진설계 : 내진설계편에 따름.
5.8.10 특수조건에 있는 말뚝 기초의 설계	특수한 조건에 있는 말뚝기초를 설계할때는 지반의 성질, 하중조건, 말뚝기초의 안전성 등에 대해 종합적으로 검토하여야 한다. (2) 지반면 위에 돌출된 말뚝 본체에 수평력이 작용되는 말뚝기초. (7) 단일현장타설말뚝기초.
5.8.12.3 현장타설말뚝	(1) 설계지름 : 800mm 이상, 100mm 단위로 한다. (2) 주철근 최소덮개두께 : 150mm (주철근 중심까지) (3) 주철근 : 이형철근 사용, 철근량 0.4~0.6%, 지름 22mm 이상, 순간격(철근지름 2배 또는 골재최대치수 2배 이상) (4) 띠철근 : 이형철근을 기준으로 하되 상세내용은 콘크리트구조설계기준 기둥부분 참고 (지름 13mm 이상, 중심간격 500mm 이하), 확대기초 저면~말뚝지름의 2배 범위(중심간격 150mm 이하), 철근량은 측단면적의 0.2% 이상.
AASHTO LRFD	5.13.4.1 Concrete piles (General) (1) 콘크리트 말뚝은 기초 또는 파일캡에 근입되어야 한다. (최소 300mm 이상, 단 철근 또는 강봉으로 연결되어 있는 경우 최소 150mm 이상) (2) 말뚝의 주철근은 $1.25f_c A_c$ 에 충분히 저항할 수 있도록 정착되어야 한다. 5.13.4.5 Cast-in-place piles (1) 주철근 : 0.8% 이상 (2) 나선철근 : MW25 이상, pitch 150mm (3) 철근은 적절한 횡구속을 지지하는 지반면으로부터 3,000mm 이하까지 연장.

표 2 말뚝-기둥 일체형 교각 기초의 설계 관련규정 - 내진설계

규정	내용
6.3.4 응답수정계수	철근콘크리트 말뚝기둥(Bent) - 수직말뚝만 사용한 경우 : $R=3.0$, - 한 개 이상의 경사말뚝을 사용한 경우 : $R=2.0$
6.6.2.2 기초설계	(3) 말뚝의 횡하중 : 수평방향의 강성을 계산할 때는 말뚝을 탄성체로 간주하고, Winkler의 탄성기초 해석법 또는 탄성연속체 해석방법 및 등가캔틸레버 개념을 이용한다. 그러나 연약점토와 사질토에서 큰 수평력이 발생하는 경우에는 지반의 비선형반력을 고려할 수 있는 말뚝의 p-y 곡선을 사용한 설계를 하여야 한다.
6.6.2.3 말뚝설계시 특별히 요구되는 사항	(1) 모든 말뚝은 기초의 바닥 콘크리트 캡에 적절히 정착되어야 한다. (2) 콘크리트로 채운 말뚝은 특별한 결합부가 없다면, 기초의 바닥 콘크리트로부터 말뚝으로 상승력이 전달될 수 있도록 충분한 길이의 철근을 매설하여 정착하여야 한다. (3) 보강철근은 말뚝과 바닥판 콘크리트를 일체로 하기 위해서 그리고 말뚝에서 말뚝캡으로 하중전달을 용이하게 하기 위해서 콘크리트 바닥판까지 연장되어야 한다. (4) 기초 콘크리트 바닥판 바로 밑의 말뚝머리가 완전히 부서지거나 힌지와 같은 거동을 방지하기 위해서, 띠철근 간격을 줄이는 것이 좋다.
6.8.2.1 심부구속을 위한 횡방향철근	(1) 기둥과 말뚝기둥에서 소성영역이 예상되는 상부와 하부의 심부는 횡방향철근으로 구속해야 한다. - 나선철근비 : $\rho_s = 0.45 \left[\frac{A_c}{A_c} - 1 \right] \frac{f_{ck}}{f_y}$ 또는 $\rho_s = 0.12 \frac{f_{ck}}{f_y}$ - 원형후프띠철근을 용접 또는 기계적 연결장치 등으로 연결하거나, 보강띠철근을 추가하여 정착단에서 슬립이 발생하지 않게 함으로써 나선철근과 동등한 심부구속효과를 발휘할 수 있다면, 원형띠철근량의 계산은 나선철근식을 사용할 수 있다. (2) 횡방향철근 : 하나 또는 중복된 후프띠철근 사용 가능. 후프띠철근과 같은 크기의 보강띠철근 사용. 보강띠철근은 양단에 축방향철근에 걸리게 해야 함. (3) 보강띠철근 : $90^\circ + 135^\circ$ 갈고리, 90° 갈고리가 연달아 걸리지 않도록 해야 한다. (4) 후프띠철근 ① 폐합띠철근 : 양단에 띠철근 지름의 6배와 80mm 중 큰 값 이상의 연장길이를 갖는 135° 갈고리를 가져야 한다. ② 연속띠철근형태 : ① 폐합띠철근 규정과 동일하나, 갈고리는 축방향철근에 걸리게 하여야 한다.
6.8.2.1 심부구속을 위한 횡방향철근의 간격	(1) 기둥 기둥의 상부와 하부에 설치하며, 설치구간은 기둥의 최대단면치수, 기둥 순 높이의 1/6, 450mm 중 가장 큰 값 이상. (2) 말뚝기둥 말뚝상단 : 기둥 규정에 따른. 말뚝하단 : 모멘트 고정점에서 말뚝지름의 3배 길이만큼 내려간 위치로부터 진흙선에서 말뚝지름과 450mm 중 큰 값 이상의 길이만큼 올라간 위치까지의 구간. (3) 최대 중심간격 : 최소 단면치수의 1/4 또는 축방향철근 지름의 6배 중 작은 값 이하. (4) 나선철근의 결첩이음은 허용하지 않음. (완전용접 또는 기계적 연결)
AASHTO LRFD (Seismic Requirements Zone 2)	근본적으로 도로교설계기준과 동일하지만, - 응답수정계수 : 중요도(importance category)에 따라 구분 (RC Pile Bents-Verticla Piles Only : Critical (R=1.5), Essential (R=2.0), Other (R=3.0) - 원형후프띠철근에 관한 규정 없음. (나선철근 사용을 기본전제로 함.) - 횡방향철근의 연장길이 : 철근 지름의 6배와 75mm 중 큰 값 이상 (철근지름이 13mm를 초과하는 경우 철근 지름의 6배 규정이 지배) - 최대 중심간격 : 최소 단면치수의 1/4 또는 100mm 중 작은 값 이하 - Column Connections : 기둥의 심부구속을 위한 횡방향철근은 기둥 연결부에서 인접부 재료 기둥단면 최대치수의 1/2 또는 380mm 중 큰 값 이상의 구간에 연속하여 배근해야 한다. - 파일캡 하단 600mm 또는 말뚝직경의 1.5배 중 큰 값 이상인 구간의 나선철근 pitch는 75mm 이하.

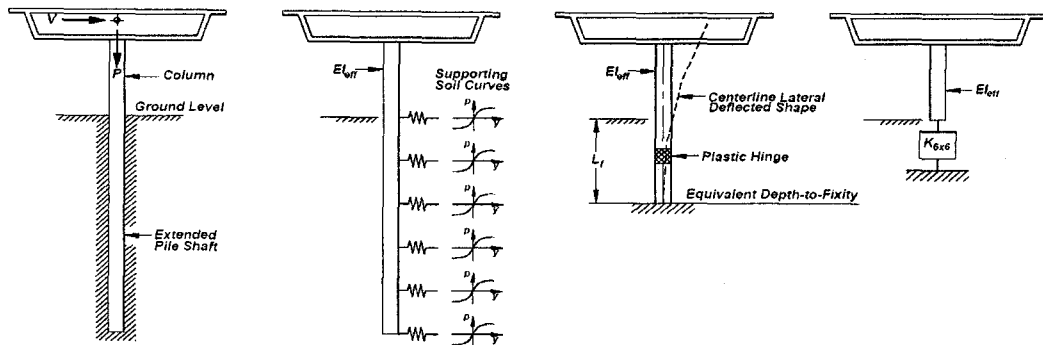
말뚝-기둥 일체형 교각 기초의 설계시 지중부 말뚝에 대해서는 말뚝에 관한 설계기준을 지상부 교각에 대해서는 기둥에 관한 규정을 적용하는 것이 일반적인데, 이때 말뚝과 기둥을 구분하는 기준이 설계기준에 명확히 규정되어 있지 않은 현실이다. 즉, 물리적(형상적)인 관점에서 지반면을

기준으로 구분할 수도 있으며, 구조공학적 관점에서는 모멘트 분포를 기준으로 또는 지반공학적 관점에서는 지반의 수평변위 또는 횡방향지지(lateral support)에 관한 특성을 기준으로 분류할 수 있는데 기준에 따라 철근상세가 달라질 수 있어 설계기준에 명확하게 기준이 정립되기까지는 구조공학 및 지반공학 지식을 바탕으로 한 설계자의 합리적인 판단이 요구된다고 할 수 있다.

4. 말뚝-기둥 일체형 교각 기초의 설계

4.1 내진해석

말뚝-기둥 일체형 교각의 내진설계를 위한 구조해석은 지반의 특성 및 말뚝의 단면 특성 등을 합리적으로 고려하여 말뚝과 지반 비선형성의 상호관계를 비교적 잘 예측하는 것이 무엇보다 중요하다 할 수 있다. 물론 지반-말뚝 동적 상호작용을 엄격히 고려할 수 있는 SSI 모델(soil-structure interaction model)을 이용한 해석을 수행하는 것이 가장 합리적이며 신뢰성이 높은 결과를 제공하지만 실무설계에서 SSI 모델을 사용하는 것은 많은 어려움이 따른다. 그림 3은 말뚝-기둥 일체형 교각의 내진설계를 위한 구조해석 모델링 방법의 예를 나타낸 것으로서 그림 3(c)의 등가고정단 모델이 가장 간단한 모델링이지만 실제 지반의 비선형 특성을 고려하지 못하므로 일반적으로 구조물 변위는 과소평가하고 부재력은 과대평가하는 경향을 나타낸다.



(a) 말뚝-기둥 일체형 교각 (b) p-y 스프링 모델 (c) 등가고정단 모델 (d) 6x6 스프링 모델

그림 3 말뚝-기둥 일체형 교각 기초의 모델링 방법

본 연구에서는 해석결과의 합리성 도모와 상용 프로그램(MIDAS/CIVIL, SAP2000 등)을 이용한 해석의 편의성을 고려하기 위해 지반의 비선형특성(그림 3(b))을 고려한 6x6 스프링 모델(그림 3(d))을 적용하였다. 즉, 그림 4에 나타낸 것과 같이 지반면(seabed/ground level)을 기준으로 지중부 말뚝과 지상부 기둥으로 구분하여 지상부 기둥설계는 범용 구조해석 프로그램인 MIDAS/CIVIL을 지중부 말뚝은 말뚝-지반 비선형 상호영향을 고려할 수 있는 말뚝 비선형해석 전용 프로그램인 FB-PIER 프로그램을 이용하여 해석을 수행하였으며 해석순서는 다음과 같다.

- ① 전체계모델 지반면의 경계조건을 고정단으로 하여 구조해석을 수행.
- ② 지반면에서의 반력(R1)산정.
- ③ 지반면에서의 반력(R1)을 말뚝-지반 비선형해석 프로그램인 FB-PIER에 하중으로 입력.
- ④ 말뚝-지반의 비선형성이 고려된 대표 6x6 강성행렬을 통한 스프링 상수(K1) 산정.

- ⑤ 전체계모델 지반면의 경계조건을 스프링상수(K1)로 하고, 지반면에서의 반력(R2) 산정.
- ⑥ ②~⑤의 과정을 반복하여, 하중 또는 변위가 수렴되는 등가선형스프링상수(K)를 결정.

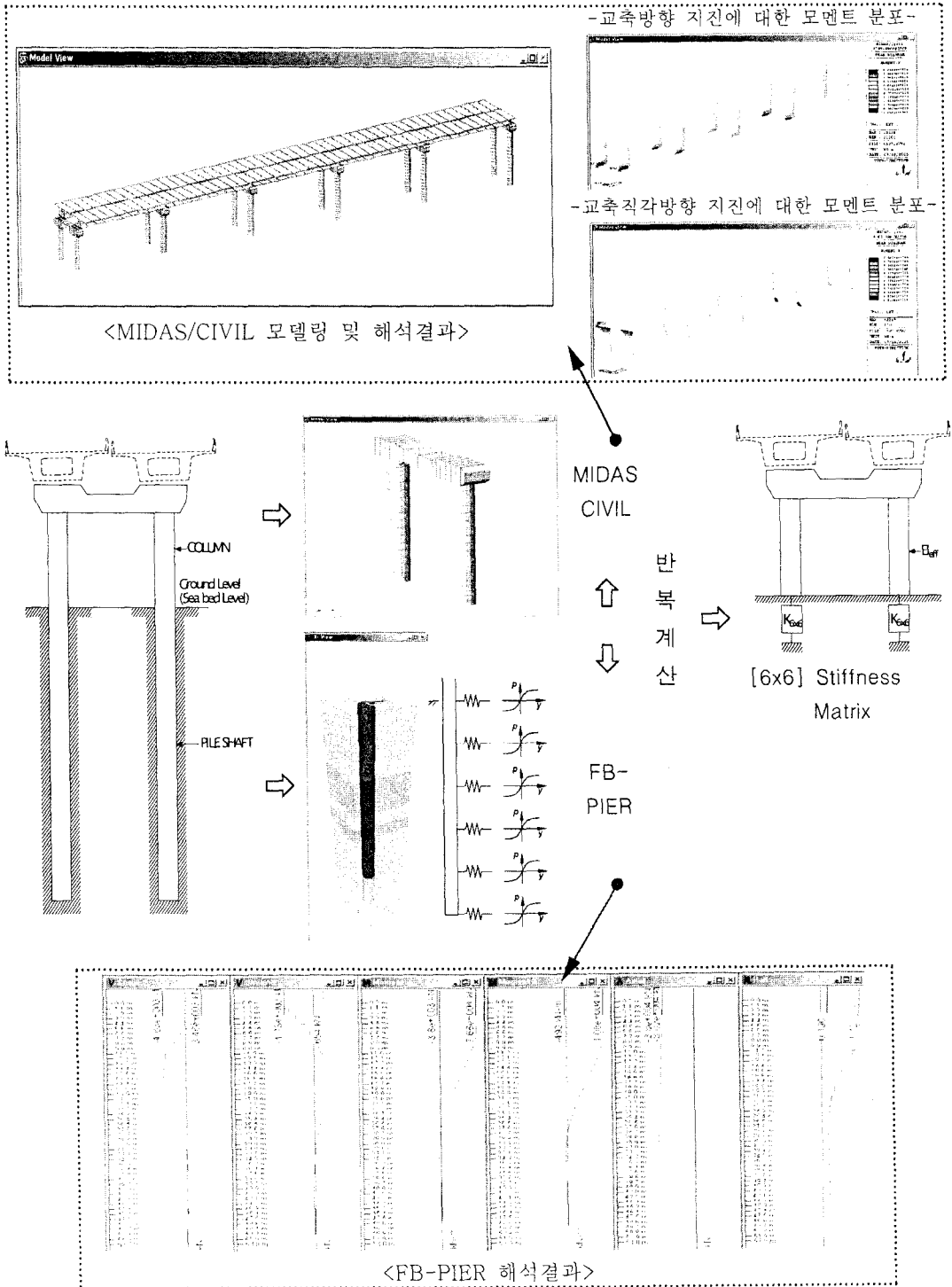
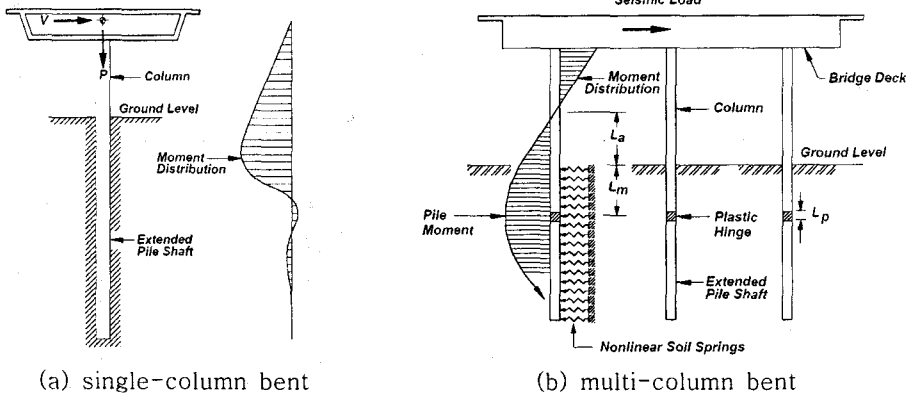


그림 4 말뚝-기둥 일체형 교각의 구조해석

4.2 철근상세

표 3은 말뚝-기둥 일체형 교각 기초의 철근 상세 예를 나타낸 것으로서 기초의 형식은 직경 2,400mm의 π 형 말뚝-기둥 일체형 교각 기초로 지진하중 작용시 교축방향으로는 그림 5(a)와 같은 캔틸레버 구조형식의 모멘트 분포를, 교축직각방향에 대해서는 그림 5(b)와 같은 프레임 구조형식의 모멘트 분포를 나타낸다. 축방향철근은 응답수정계수를 적용한 소성지진모멘트에 대해 축력-모멘트 상관도를 만족하도록 설계하였으며, 횡방향철근의 상세는 AASHTO LRFD Bridge Design Specifications에 따라 소성힌지 영역, 기둥/코뿔 연결부 등으로 구분하여 표 3과 같이 4가지 형태로 설계하였다.



(a) single-column bent (b) multi-column bent
그림 5 말뚝-기둥 일체형 교각 기초의 횡하중(지진력) 작용시의 모멘트 분포

표 3 말뚝-기둥 일체형 교각 기초의 철근 상세 예 (D=2,400mm, $f_{ck}=30\text{MPa}$, $f_y=400\text{MPa}$)

구 분	축방향철근	횡방향철근(나선철근)	비 고
	① 2-D38, 34EA (1.71%)	$\rho_s = 0.12 \frac{f_{ck}}{f_{yh}}$ (2-D19@90mm)	· 심부구속 횡방향철근 (기둥, 소성힌지영역) · 기둥 연결부
	② 2-D38, 34EA (1.71%)	$\rho_s = 0.45 \left[\frac{A_g}{A_c} - 1 \right] \frac{f_{ck}}{f_{yh}}$ (2-D19@120mm)	· 횡방향철근 (소성힌지 이외 구간) · 최소횡방향철근 규정
	③ 2-D38, 34EA (1.71%)	$\rho_s = 0.12 \frac{f_{ck}}{f_{yh}}$ (2-D19@110mm)	· 심부구속 횡방향철근 (말뚝가구, 소성힌지영역)
	④ D38, 34EA (0.86%)	· $\phi V_n \geq V_u$ · 최소철근 규정 (D19@150mm)	· 현장타설말뚝 규정 · 최소횡방향철근 규정
	⑤ D38, 34EA (0.86%)	· $\phi V_n \geq V_u$ · 최소철근 규정 (D16@225mm)	· 현장타설말뚝 규정 · 최소횡방향철근 규정

5. 결 론

본 논문에서는 말뚝-기둥 일체형 교각 기초형식의 구조적 특징, 설계 및 시공사례와 말뚝-기둥 일체형 교각 기초 설계에 적용한 구조해석 방법 및 철근상세에 대해 기술하였다. 본 논문에서 제시한 말뚝-기둥 일체형 교각 기초의 구조해석 방법은 구조물과 지반의 비선형성을 비교적 정확하게 합리적으로 예측할 수 있는 방법으로 실무 설계에서 충분히 적용이 가능하며 향후 말뚝-기둥 일체형 교각 기초의 해석 및 설계기준 정립을 위한 참고자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

말뚝-기둥 일체형 교각 기초의 내진설계를 위한 철근상세 규정의 경우 AASHTO LRFD 설계기준이 현행 국내 도로교설계기준에 비해 보다 구체적으로 규정되어 있으나 일부 규정의 경우 국내와 같은 중/약진 지역에 그대로 적용하는 경우 과도한 철근량 산정 등으로 인해 실무 설계 및 시공시 무리가 따를 수도 있을 것으로 판단된다. 따라서 현행 설계기준에 명확히 규정되어 있지 않거나 기준 해석의 모호성으로 인해 설계시 혼돈을 야기할 수 있는 부분에 대해서는 AASHTO LRFD 등의 선진 외국 설계기준들과 국내에서 수행된 연구결과들을 충분히 반영할 수 있는 합리적인 설계기준의 개정이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국도로교통협회, 건설교통부 제정, *도로교설계기준*, 2005.
2. 이재훈, 양종호, "콘크리트 교각의 새로운 형식," 콘크리트학회지, 제16권, 2호, 2004년 3월, pp. 24-30.
3. *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications*, American Association of State Highway and Transportation Officials, 3rd edition, Washington, D.C., USA, 2004.
4. Caltrans, *Seismic Design Criteria Version 1.3*, California Department of Transportation, Sacramento, February, 2004.
5. Priestley, M. J. N., Seible, F., and Calvi, G. M., "Seismic Design and Retrofit of Bridges," John Wiley & Sons, New York, USA, 1996.
6. T. C. Hutchinson, R. W. Boulanger, Y. H. Chai, and I. M. Idriss, "Inelastic Seismic Response of Extended Pile Shaft Supported Bridge Structures," PEER Report, December 2002.