

대구경 합성강관말뚝 설계 기법에 관한 연구

Design Method of Large-Scale Concrete-Steel Composite Drilled Shafts

최 규 용* 양 중 호** 최 석 환***
 Choi, Kyu Yong Yang, Jong Ho Choi, Seok Hwan

ABSTRACT

Generally, steel-concrete composite structures are considered very useful and powerful to resist external axial and flexural load due to its elevated capacity originated from composite action. This usefulness of composite structures can be applied to the drilled shafts of marine bridges that require large-scale such as entire pile-column system. As the basic study of this application, several design codes are analyzed and compared in this research.

1. 서론

최근 증가하고 있는 연도/연륙교와 같은 해상교량의 하부기초 설계에 있어서 경제성 및 시공성의 고려는 상당히 중요한 요소이다. 이러한 측면에서 직경 2500mm 이상의 대구경 파일이 교각까지 그대로 이어지는 파일베نت 시스템의 적용이 많이 연구되고 있다. 해상교량 구조계에 있어서 풍하중 및 지진하중 등과 같은 수평력의 하부기초에 대한 영향은 대수심 하에서의 말뚝기초 위 자유장이 길기 때문에 더욱 증폭된다. 상부구조로부터 전달되는 수직, 수평 및 휨하중에 대해 효율적으로 저항하기 위하여, 해상교량과 같이 말뚝 부재에 휨모멘트 저항력이 크게 요구되는 경우는 강-콘크리트의 합성구조가 상당히 효율적인 구조가 될 수 있다. 이 논문에서는 기본적인 자료로서 합성강관 기둥의 설계기준에 대한 고찰을 통해 여러 설계기준의 특징을 비교 분석하여 일반적으로 건축물의 기둥같은 구조물에 적용되고 있는 합성강관 기둥의 해상교량 기초인 대구경 합성강관 말뚝으로의 적용성을 검토해 보고자 한다.

2. 최소 강관 두께 기준

합성강관 기둥의 시방기준에는 강관의 국부좌굴을 막기 위한 최소두께가 규정되어 있다. AASHTO¹⁾,

표 1 설계기준 강관 두께 기준 비교

설계 기준	AASHTO	ACI	EUROCODE
폭- 두께비 제한	$\frac{D}{t} \leq 2.8 \sqrt{\frac{E}{F_y}}$	$\frac{D}{t} \leq \sqrt{\frac{8E_s}{F_y}}$	$D/t \leq 90 \cdot \frac{235}{F_y}$

* 정희원, 삼성물산(주) 건설부문 기술연구소 선임연구원

** 정희원, 삼성물산(주) 건설부문 제2연육교 T/F 차장

*** 정희원, 국민대학교 건설시스템공학부 교수

ACI²⁾, EUROCODE³⁾ 기준의 최소 두께 규정 내용을 정리해 보면 표1과 같다. 여기서 E, E_s 는 강관의 탄성계수이고 F_y 는 강관의 항복응력이다. AASHTO LRFD 규정에서의 2.8이란 수를 $\sqrt{\quad}$ 안으로 집어 넣게 되면 이는 ACI, BS기준과 동일하게 된다. 만일 외경이 3000mm, 항복응력이 300MPa이고 강관의 탄성계수가 200,000MPa인 콘크리트 충전 강관을 가정하게 된다면, AASHTO, ACI, BS에서의 규정에서는 즉, $t \geq D \sqrt{\frac{F_y}{8}}$ 이 되므로 $t \geq 3000 \cdot \sqrt{\frac{300}{20000} \cdot \frac{1}{8}} = 41mm$ 가 된다. Eurocode 에서는 즉, $t \geq \frac{3000}{90 \cdot \frac{235}{300}} = 43mm$ 이 된다. 이와 같이 각 규정간의 폭-두께비 규정은 대부분 표시형식만 다를 뿐 비

슷한 규정을 적용하고 있는 것을 알 수 있다. 그러나, 3000mm 직경의 말뚝구조에 두께 40mm 정도의 강관을 사용하는 것은 시공성 및 경제성에 상당히 불리한 조건으로 작용한다. 따라서, 하부기초로의 적용을 위해서는 지반과의 영향을 고려한 국부좌굴에 대한 검토가 더욱 상세히 필요할 것으로 판단된다.

3. 합성강관의 휨-압축 강도 상관 기준

3.1 AISC-LRFD, AASHTO-LRFD, 도로교 설계기준

AISC-LRFD⁴⁾, AASHTO-LRFD 및 도로교 설계기준⁵⁾은 철근비가 총단면적의 4% 이상일 경우만 합성강관 기준을 적용한다. 그 이하일 경우는 ACI 설계기준을 적용하도록 규정하고 있다. 다시말하면 철근비가 작을 때는 철근콘크리트의 거동과 유사하게 본다는 의미가 된다. 강관의 폭-두께비에 따라서 M_n 을 M_{yc} 또는 M_{ps} 로 계산하고 강도상관도식도 다르게 계산한다. 제한규정을 만족하는 콘크리트로 채워진 강관의 공칭휨강도는 식1, 식2와 같다.

$$\frac{D}{t} < 2.0 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} \text{인 경우: } M_n = M_{ps} \text{ (식 1)} \quad 2.0 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} < \frac{D}{t} \leq 8.8 \sqrt{\frac{E}{\sigma_y}} \text{인 경우: } M_n = M_{yc} \text{ (식 2)}$$

여기서, M_{ps} : 콘크리트로 채워진 부재에서의 소성 휨강도(N·m), M_{yc} : 위에 규정된 합성단면의 항복 휨강도(N·m), D : 강관의 외경(mm), E : 강관의 탄성계수(MPa)로 정의된다. M_{ps} 의 계산에 있어서 콘크리트는 등가직사각형 응력블록을 적용하고, 강관과 축방향 철근은 각각의 항복응력을 적용하여 적분을 통해 평형방정식을 이용하여 구해낸다. M_{yc} 의 경우도 마찬가지로의 방법이나, 관 표면의 변형률이 항복변형률에 도달할 때를 기준으로 하므로 직사각형이 아닌 삼각형 분포가 되며 콘크리트의 응력은 등가직사각형 응력블록을 적용한다.

합성단면의 공칭압축강도는 다음의 식 3, 식 4로 정의되는데, 이는 세장비에 따라 영향을 받는다.

$$\lambda \leq 2.25 \text{일 경우: } P_n = 0.66 \lambda \sigma_c A_s \text{ (식 3)} \quad \lambda > 2.25 \text{일 경우: } P_n = \frac{0.88 \sigma_c A_s}{\lambda} \text{ (식 4)}$$

여기서 세장비 λ 에 대한 정의는 지면상 생략한다.

휨-압축의 강도상관 관계 또한 축력의 비율에 따라 두가지로 나뉘는데, 원형단면의 경우 식 5, 식 6으로 정리된다.

$$\frac{P_u}{P_r} < 0.2 \text{인 경우: } \frac{P_u}{2.0 P_r} + \frac{M_u}{M_r} \leq 1 \text{ (식 5)} \quad \frac{P_u}{P_r} \geq 0.2 \text{인 경우: } \frac{P_u}{P_r} + \frac{8.0 M_u}{9.0 M_r} \leq 1 \text{ (식 6)}$$

여기서, $P_r = \phi_c P_n$, $M_r = \phi_f M_n$, $\phi_c = 0.90$, $\phi_f = 1.0$ 가 된다.

3.2 ACI318 Building Code 및 콘크리트구조설계기준

콘크리트구조 설계기준⁶⁾은 전체적으로 ACI Code의 Composite compression members의 조항과 동일한데, AASHTO 규정과 같이 강도상관도의 식이 주어지는 않고 변형률 적합조건 및 힘의 평형조건을 적용하여 콘크리트의 압축파괴를 기준으로 계산한다. 파괴기준은 압축측 콘크리트의 최대변형률이 0.003이다. 다른 모든 부분은 변형률 적합조건 및 Bernoulli의 가정을 이용하여 결정한다.

3.3 일본건축학회 강콘크리트복합구조 이론 및 설계⁷⁾

강관만 있고, 축방향 철근이 없는 경우는 다음과 같은 식 7, 식 8을 이용하여 형상을 기준으로 산정한다.

$$N_u = \frac{\pi R^2 f_c}{2} \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{\sin 2\alpha}{\pi}\right) - 4Rt f_{sy} \alpha \quad (\text{식 7}) \quad M_u = \frac{2R^3 f_c}{3} \cos^3 \alpha + 4R^2 t f_{sy} \cos \alpha \quad (\text{식 8})$$

여기서, R 는 강관의 반경, t 는 강관의 두께(단, $t < R$), $f_c (= k f'_c)$ 는 콘크리트의 등가압축강도, f'_c 는 일축압축강도, k 는 등가계수, f_{sy} 는 강관의 항복강도, α 는 중립축의 위치를 표시한 각도로 축력은 압축을 (+)로 하고 있다. 식 7 및 식 8에서 α 를 소거하면 상관곡선을 만들 수 있다. 그리고, 강관 및 축방향 철근이 있는 경우는 다음과 같이 ACI의 단면해석기준을 적용하고, 강관의 두께 t 는 근사적으로 처리한다.

4. 각 시방기준의 강도상관 관계 비교

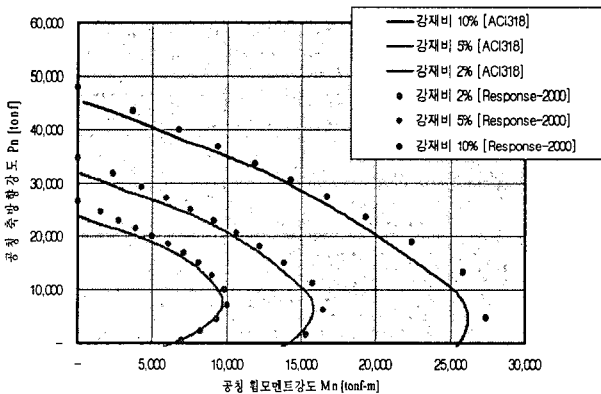


그림1. 강관두께가 0인경우의 비교

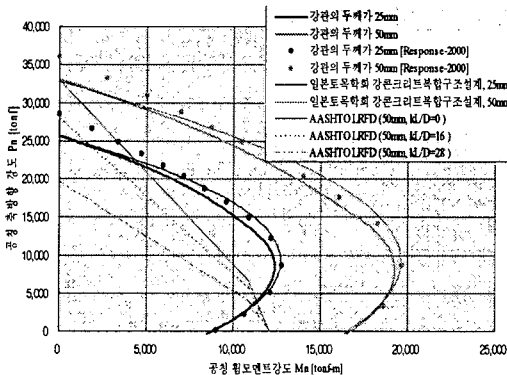


그림2. 강관만 있는 경우의 시방기준 비교

각 시방기준의 수치적 비교를 위해 위에 서 기술한 각 설계기준에 따라 강도상관 관계를 구하여 강재비별, 강관 두께별로 비교해 보았다. 계산의 검증은 위해 Response-2000 소프트웨어⁸⁾에서 나온 결과와도 비교하였다. 내경 3000mm의 강관에 콘크리트가 충전된 경우를 가정하였으며, 강관의 두께는 0mm, 25mm, 50mm 세 가지를 선정하였다. 강재비는 철근이 있는 경우엔 2%, 5%, 10%를 선택하였고, 철근이 없는 경우엔 강관만의 강재비인 3.3%, 6.3%이 된다. 여기서 강재비(Steel ratio)는 강관과 철근을 모두 포함한 값이다. 강관 및 철근의 탄성계수는 200,000MPa이며, 철근이 배근된 중심선 지름은 2600mm를 선택하였다. 항복강도는 철근은 400MPa, 강관은 300MPa를 상정하였으며, 콘크리트의 설계기준 강도는 30MPa이다.

그림 1은 선정된 3가지 강재비 2%, 5%, 10%에 대해서 ACI318기준의 계산값과 Response-2000의 결과와 비교한 것이다. Response-2000과 ACI기준은 구성방정식에 있어서 약간의 차이가 있으므로 직접적인 비교는 어렵지만, 결과는 상당히 유사하다.

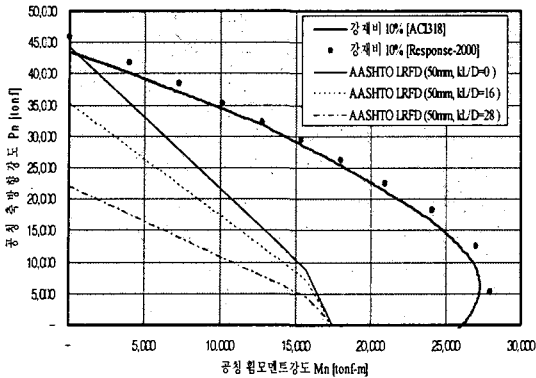


그림3. 축방향 철근이 배근된 경우의 비교

찬가지의 경향을 나타내고 있다. 결국, 각 시방기준마다 동일한 단면의 강도상관 관계를 나타냄에 있어 상당한 차이를 유발시키고 있음을 알 수 있고, 따라서 설계에 있어서는 시방기준에 따라 상당히 다른 결과를 나타낼 수도 있을 것으로 생각된다.

5. 결론

해상교량의 하부기초에서 종종 적용되는 교각-파일 일체형 파일벤트 시스템과 같은 구조물에 적용되기 위한 대구경 합성강관말뚝의 기초적 자료로서 여러 설계기준의 합성기둥 설계를 비교하여 보았다. 우선, 강관이 합성구조체로서 설계에 반영되기 위해서는 최소두께규정을 만족하여야 하는데, 현재 시방규정들을 대구경에 적용하기에는 경제성 및 시공성에 상당히 제약이 따를 것으로 보인다. 또한 휨-압축 강도 상관관계를 살펴본 결과, 시방규정에 따라 무시할 수 없을 정도의 차이를 보이고 있으므로, 적용되는 시방기준에 따라서도 설계의 결과가 상당히 달라질 수 있는 가능성을 내포하고 있다. 따라서, 좀 더 합리적인 설계로 대구경 합성강관 말뚝에 적용하기 위해서는 하중 및 경계조건에 따른 국부 좌굴 현상 및 내력 특성과 같은 점들에 대해 추가적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS Customary U.S. Units Second Edition 1998
2. ACI318 Building Code and Commentary, ACI, 2002
3. Eurocode 4, Design of Composite Steel and Concrete Structures, 1994
4. AISC-LRFD Manual of steel Construction, 3rd Edition, American Institute of Steel Construction, 2001
5. 도로교표준시방서 부록 하중-저항계수 설계편, 대한토목학회, 1996
6. 콘크리트구조설계기준, 한국콘크리트학회, 1999
7. 鋼管コンクリート構造 規準, 同解説, 日本建築學會, 1967년 지정, 1981년 改定
8. <http://www.ecf.utoronto.ca/~bentz/r2k.htm>