

# 3차원 스트럿-타이 모델을 이용한 파일캡의 강도예측

## Strength Prediction of Concrete Pile Caps Using 3-D Strut-Tie Models

박 정 웅\*      윤 영 묵\*\*

Park, Jung Woong      Yun, Young Mook

### ABSTRACT

Deep pile caps usually contain no transverse shear reinforcement and only small percentages of longitudinal reinforcement. The current design procedures including ACI 318-02 for the pile caps do not provide engineers with a clear understanding of the physical behavior of deep pile caps. In this study, the failure strengths of nine pile cap specimens tested to failure were evaluated using 3-dimensional strut-tie models. The analysis results obtained from the present study were compared with those obtained from several design methods, and the validity of the present method implementing 3-dimensional strut-tie models was examined.

#### 1. 서론

파일캡은 기둥으로부터 전달되는 큰 수직하중을 여러 개의 말뚝으로 분포시키는 구조물이다. 말뚝으로 전달된 하중은 다시 견고한 지층이나 지반과의 마찰에 의해 지지된다. 일반적으로 파일캡에서는 균열을 제어하고 연성을 증가시키기 위한 수직, 수평방향의 충분한 양의 분포철근을 사용하지 않는 것이 보통이므로, 경사균열이나 균열 후 응력재분배 등을 허용하지 않도록 설계가 이루어진다. 따라서 전단철근을 고려하지 않고 콘크리트의 전단저항에 의해서 기둥의 하중이 지지되도록 파일캡의 두께가 결정되는 것이 일반적이다. 특히 기둥표면에서 가장 인접한 말뚝 중심까지의 거리가 파일캡의 두께보다 작은 경우를 두꺼운 파일캡이라 한다. 현재 ACI 기준<sup>(1)</sup>에서는 두꺼운 파일캡에 대한 별도의 설계기준이 없으며, 설계자들은 양방향 슬래브나 깊은 보의 설계규정을 따르고 있다. 그러나 설계방법에 따른 설계결과가 상당한 차이를 보이고 있으며, 이는 근본적으로 정확한 파일캡의 거동을 감안한 설계라 볼 수 없다. 왜냐하면 양방향 슬래브의 설계규정은 일반적인 얇은 슬래브에 대한 것이고 깊은 보의 설계규정은 단방향 거동만을 고려한 설계방법이기 때문이다. 말뚝에 의해 지지되는 두꺼운 파일캡은 기하학적으로 3차원 해석을 필요로 하는 구조물이며, 파일에 작용하는 반력들로부터 파일캡은 정역학적으로 부정정 구조물의 거동을 나타낸다는 것이 실험결과에서 밝혀졌다<sup>(2)</sup>. 본 연구에서는 3차원 스트럿-타이 모델을 이용하여 기존의 실험, 파괴된 파일캡 시험체의 파괴강도를 예측하였고, 그 결과를 실험 결과 및 기존의 설계기준에 의한 해석결과와 비교함으로써 제안된 방법의 타당성을 검증하였다. 이는 기존의 연구에서 명확하게 제시하지 못하고 있는 두꺼운 파일캡에 대한 합리적인 설계방법을 개발하기 위한 것이다. 본 연구의 강도예측 결과로부터 3차원 스트럿-타이 모델을 이용하는 방법은 파일캡의 만족스러운 정확도를 가진 합리적이고 실용적인 설계방법으로 판단된다.

\* 정회원, 경북대학교 토목공학과 post-doc. 연구원

\*\* 정회원, 경북대학교 토목공학과 부교수

## 2. 3차원 스트럿-타이 모델을 이용한 강도해석

본 연구의 해석대상 구조물은 Sabnis & Gogate<sup>(3)</sup>에 의해 실험, 파괴된 9개의 파일캡 시험체이다. 실물 크기의 실험이 어려운 점을 감안하여 시험체는 약 1/5로 축소되었다. 그림 1은 실험된 시험체의 치수를 보여주고 있으며, 표 1은 시험체의 유효깊이, 콘크리트 강도, 그리고 시험체에 배근된 철근량을 나타내고 있다. ACI 318-77<sup>(10)</sup>, CRSI Handbook<sup>(11)</sup>, Blevot & Fremy<sup>(4)</sup> 및 Sabnis & Gogate<sup>(5)</sup>의 트러스 모델 방법, 그리고 선형유한요소해석법 등에 의한 실험된 파일캡 시험체의 파괴강도 예측결과는 표 2에 나타나 있다. 그림 2는 기존의 여러 연구문헌<sup>(4-9)</sup>에서 파일캡의 해석 및 설계에 사용된 이상화된 트러스 모델을 보여주고 있다. 선형유한요소해석에 의한 압축 파괴하중은 기둥단면과 접해있는 유한요소들의 평균 압축응력이 허용압축강도  $0.7f_{ck}$ 에 도달한 경우로 정의하였고, 인장 파괴하중은 중립축을 중심으로 하단 중앙단면에 위치한 콘크리트 유한요소들의 인장력의 합이 콘크리트와 하단부에 배근된 철근이 발휘할 수 있는 인장력에 도달한 경우로 정의하였다.

표 1. 시험체의 유효깊이, 콘크리트 강도, 배근철근량

시험체	SS1	SS2	SS3	SS4	SS5	SS6	SG1	SG2	SG3
$d$ (cm)	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	10.7	15.2	11.7	11.7
$f_{ck}$ (MPa)	31.27	31.27	31.27	31.27	41.02	41.02	17.93	17.93	17.93
$A_s$ (cm <sup>2</sup> )	0.7695	0.5026	0.6463	0.9387	1.9252	2.8217	-	2.1290	4.9677
$\rho$	0.0021	0.0014	0.00177	0.0028	0.0054	0.0079	0	0.0055	0.0133

$d$ : effective depth;  $f_{ck}$ : concrete strength;  $A_s$ : cross-sectional area of steel;  $\rho$ : steel ratio

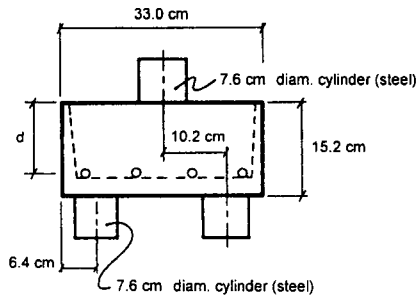


그림 1. 시험체의 치수

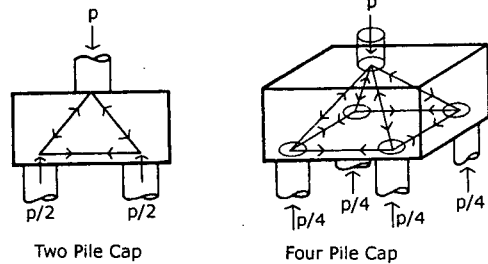


그림 2. 파일캡에 대한 트러스 모델

본 연구에서는 비선형 스트럿-타이 모델 방법<sup>(12)</sup>을 이용하여 실험된 파일캡 시험체의 강도를 예측하였으며, 그 결과는 표 2와 같다. 이를 위한 파일캡 시험체의 유한요소해석 모델 및 3차원 스트럿-타이 모델은 그림 3과 같다. 비선형 스트럿-타이 모델 방법에서는 기하학적 적합조건을 만족하는 최대의 하중범위 안에서 철근이 항복되는 단계의 하중을 파괴하중으로 보았다. 무근콘크리트 시험체 SG1의 파괴하중은 주압축부재와 나란한 방향의 균열이나 주인장부재인 콘크리트 타이에 균열이 발생하는 하중 단계로부터 결정하였다. 시험체 SG2, SS2, SS4, SS5, SS6에서는 철근의 항복에 의해 강도가 결정되었고, 시험체 SG3, SS1, SS3 등은 기하학적 적합조건으로부터 강도가 결정되었다. 그림 4는 시험체 SG1과 SS6의 차원화된 압축스트럿을 보인 것이다. 그림 4(c)는 SG1 시험체 스트럿-타이 모델 경사콘크리트 스트럿의 단면적이 이 스트럿의 최대허용면적에 도달한 것을 보여주는 것으로, 더 이상의 하중하에서는 스트럿-타이 모델의 기하학적 적합조건이 이 경사스트럿 때문에 의해 만족될 수 없다. 그림 5는 시험체 SG1과 SS6 스트럿-타이 모델의 차원화된 콘크리트 타이를 보여주는 것이다.

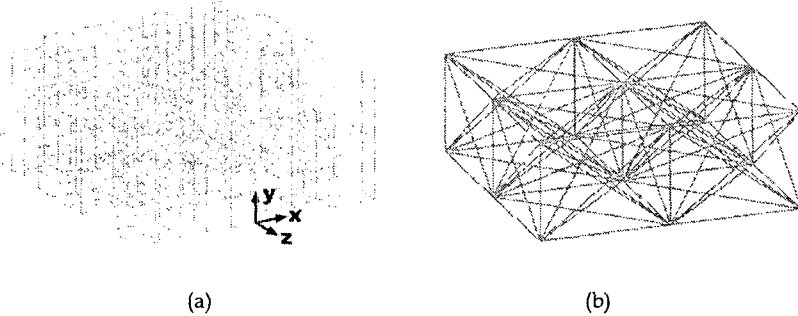


그림 3. 파일캡의 유한요소모델 및 스트럿-타이 모델

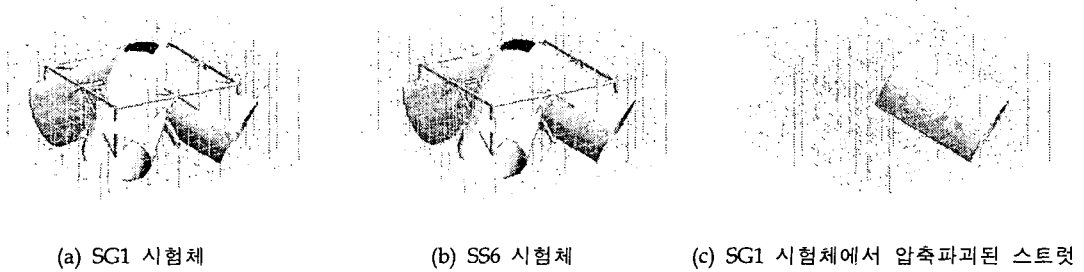


그림 4. 차원화시킨 압축스트럿

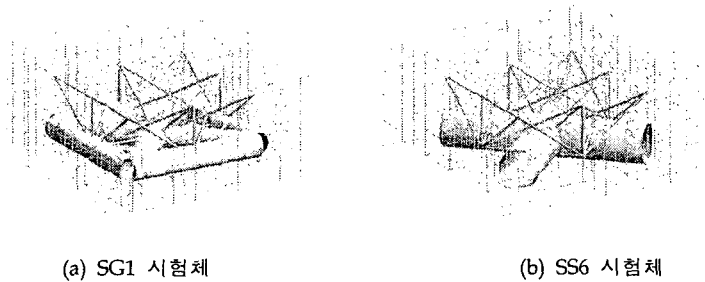


그림 5. 차원화된 콘크리트 타이

### 3. 결론

ACI 318-77에 따른 파일캡의 파괴강도는 대체적으로 보수적인 경향을 나타내며 고강도 콘크리트에 가까울수록 이러한 경향이 더 짙게 나타났다. CRSI 기준은 ACI 기준에 비해 콘크리트의 전단내력을 크게 평가하고 있지만, 여전히 고강도 콘크리트에 가까울수록 보수적인 설계가 되는 것으로 나타났다. 현재의 ACI 318-02 설계기준서에 두꺼운 파일캡에 대한 별도의 설계기준이 없다고 해서 양방향 슬래브나 깊은 보의 설계에 적용되는 설계기준을 두꺼운 파일캡에 적용하는 것은 적절하지 않다. 본 연구에서 제안하는 3차원 스트럿-타이 모델을 이용하는 방법은 설계기준서에서 제시하는 설계방법보다 더 정확한 결과를 줄 수 있을 것으로 판단되며, 파일캡의 3차원 거동을 합리적으로 반영한 설계방법이 될 수 있을 것으로 기대된다.

표 2. 예측된 파괴강도

파일캡	파괴하중 (kN)	Ratio of theoretical to experimental failure loads					
		CRSI Handbook	ACI 318-77	Gogate & Sabnis	Blevot & Fremy	선형 유한요소해석	비선형 STM방법
SS1	250.43	0.81	0.71	0.65	0.53	0.85	0.83
SS2	244.65	0.79	0.73	0.67	0.50	0.87	0.83
SS3	247.99	0.77	0.71	0.80	0.49	0.86	0.92
SS4	225.75	0.75	0.69	-	0.84	0.95	1.07
SS5	263.56	0.61	0.57	0.64	0.93	1.04	1.07
SS6	280.24	0.58	0.53	0.53	0.83	0.98	0.96
SG1	50.04	-	-	-	-	2.55	0.97
SG2	173.48	0.85	0.82	0.83	1.25	0.73	1.12
SG3	176.82	0.84	0.77	0.81	(∞)	0.72	1.15
평균		0.75	0.69	0.70	0.77	1.06	0.99
표준편차		0.102	0.097	0.112	0.281	0.568	0.119

STM: 스트럿-타이 모델

참고문헌

1. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-02) and Commentary (ACI 318R-02), American Concrete Institute, 2002.
2. Adebar, P., Kuchma, D., and Collins, M.P., "Strut-and-Tie Models for the Design of Pile Caps: An Experimental Study", ACI Structural Journal, Vol. 87, No. 1, pp. 81-92, 1990.
3. Sabnis, G.M. and Gogate, A.B., "Investigation of Thick Slab (Pile Cap) Behavior", Journal of ACI, Vol. 81, No. 1, pp. 35-39, 1984.
4. Blevot, J. and Fremy, R., "Semelles sur Pieux", Annales, Institut Technique du Batiment et des Travaux Publics (Paris), Vol. 20, No. 230, pp. 223-295, 1967.
5. Gogate, A.B. and Sabnis, G.M., "Design of Thick Pile Caps", Journal of ACI, Vol. 77, No. 1, pp. 18-24, 1980.
6. Clarke, J.L., "Behavior and Design of Pile Caps with Four Piles", Technical Report No. 42.489, Cement and Concrete Association, London, 1973.
7. Siao, W.B., "Strut-and-Tie Model for Shear Behavior in Deep Beams and Pile Caps Failing in Diagonal Splitting", ACI Structural Journal, Vol. 90, No. 4, pp. 356-363, 1993.
8. Adebar, P. and Zhou L., "Design of Deep Pile Caps by Strut-and-Tie Models, ACI Structural Journal, Vol. 93, No. 4, pp. 437-448, 1996.
9. Adebar, P. and Zhou, Z., "Bearing Strength of Compressive Struts Confined by Plain Concrete" ACI Structural Journal, Vol. 90, No. 5, pp. 534-541, 1993.
10. ACI Committee 318, Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-77) and Commentary (ACI 318R-77), American Concrete Institute, 1977.
11. CRSI Handbook, Concrete Reinforcing Steel Institute, Chicago, 1984.
12. Yun, Y. M., "Nonlinear Strut-Tie Model Approach for Structural Concrete", ACI Structural Journal, Vol. 97, No. 4, 2000.