

연직하중을 받는 소규모 무리말뚝의 거동

Behavior of Small-Scale Pile Group Under Vertical Loading

이 영 남*¹ Lee, Young-Nam

이 승 현*² Lee, Seung-Hyun

박 영 호*³ Park, Young-Ho

Abstract

Pile load tests were carried out to investigate the contribution of the pile cap to the carrying capacity of a pile group and load transfer characteristics of piles in the group. A group of 24 piles(4 × 6 array) of 92.5mm diameter steel pipe were installed to the depth of 3m from the ground surface, the top of weathered rock. A maximum load of 320ton was applied to the pile cap, 1.5m × 2.3m, in contact with the ground surface. At the maximum load of 320ton, the pile cap has carried 22% of the total load. Average ultimate capacity of pile in the pile group was estimated to be 16.4ton, substantially higher than that of single pile, installed at the corner and tested before pile cap construction. For the same magnitude of settlement, the pile in the center carried less load than the pile at the perimeter due to strain superposition effect. Piles in the group showed almost constant contribution(approx. 60%) of side friction to the total capacity for all of the loading stages, while that of single pile decreased from 82% to 65%.

요 지

무리말뚝의 하중지지능력에서 말뚝캡이 부담하는 비율을 파악하고 무리말뚝을 구성하는 개개 말뚝의 하중전이 특성을 알아보고자 재하시험을 수행하였다. 직경 92.5mm의 강관말뚝 24본(4개씩 6열)을 지표 아래 3m 깊이까지 근입시켜 풍화암 상단에 말뚝선단이 위치하도록 하였다. 최대하중 320t을 지표면에 접촉되어 있는 1.5m×2.3m 크기의 말뚝캡에 재하하였다. 최대 시험하중인 320t에서는 말뚝캡이 전체하중의 약 22%에 해당하는 하중을 부담하였다. 무리말뚝 재하시험시 말뚝의 평균 극한지지력은 16.4t이며, 이 값은 말뚝캡을 타설하기 전에 무리말뚝의 모서리에 위치한 말뚝에 대하여 수행한 단말뚝 재하시험으로부터 구한 극한지지력보다 상당히 크게 나타났다. 변위장중첩 효과로 인하여 무리말뚝 중앙에 위치한 말뚝은 작은 하중이 작용하여도 외곽부의 말뚝과 같은 침하량을 기록한 것으로 나타났다. 무리말뚝에서는 주변마찰력의 부담율이 전 하중단계에서 약 60%로 일정하나 단말뚝 시험에서는 하중이 증가함에 따라 주변마찰력의 부담율이 82%에서 65%로 감소하였다.

Keywords : Pile cap, Pile group, Pile load test, Single pile

1. 서 론

말뚝기초는 대부분 무리지어 시공되며 말뚝머리는

말뚝캡(pile cap)에 의해 연결된다. 말뚝캡과 지반이 접촉되어 있는 경우 말뚝캡에 의한 하중지지능력을 고려할 수 있다면 정확하고 경제적인 설계가 가능하다. 말

*1 정회원, 현대건설 기술연구소 소장 (Member, Research Director, Hyundai Institute of Construction Technology)

*2 정회원, 선문대학교 토목공학과 전임강사 (Member, Assistant Professor, Dept. of Civil Engrg., SunMoon Univ.)

*3 정회원, 현대건설 기술연구소 수석연구원 (Member, Principal Researcher, Hyundai Institute of Construction Technology)

뚝기초 설계시 말뚝캡에 의한 지지력 증가효과를 반영하는 방법은 아직까지 국내에서 적용되고 있지 않으며 해외에서도 연구단계에 있는 부분이라 할 수 있다. 지반에 말뚝캡이 접촉되어 있는 무리말뚝에 대한 외국의 몇몇 현장 계측사례를 통해 볼 때 무리말뚝 전체 지지력 중에서 말뚝캡이 부담하는 지지력이 약 35~50%에 이르는 경우도 있다. 무리말뚝 설계시 말뚝캡의 지지력을 반영하지 못하는 이유는 무리말뚝의 거동에 영향을 미치는 말뚝캡-지반-말뚝 사이의 복잡한 상호작용 효과 및 말뚝캡의 지지력 분담효과에 대한 정확한 이해 부족에 있으며 경제적인 무리말뚝 설계를 위해서는 이들에 대한 계속적인 연구가 필요하다. 최근에는, 래프트 기초(raft foundation)를 사용할 경우 지지력은 충분하나 침하가 과다할 때 침하량 혹은 부등침하량을 줄이기 위해 말뚝을 사용하는 개념(piled raft)의 설계가 많이 연구되고 있으며(Clancy와 Randolph, 1996 : Randolph, 1994) 실제 적용한 사례(Sommer등, 1991 : Katzenbach등, 1994)가 증가 추세에 있다.

본 논문에서는 지표면에 말뚝캡이 접촉되어 있는 무리말뚝에 대한 현장 재하시험을 통하여 말뚝캡의 하중 분담율을 파악하고 무리말뚝을 구성하는 개개 말뚝의 하중-침하 특성과 하중전이특성을 단말뚝 재하시험 결과와 비교하여 봄으로써 말뚝캡의 지지력 기여효과와 개개 말뚝의 하중지지특성을 실험적으로 규명하고자 하였다.

2. 무리말뚝의 극한지지력과 침하

전통적으로 말뚝캡이 지표면에 접촉되어 있는 무리말뚝의 경우 모든 하중을 말뚝이 분담하고 말뚝캡의 하중지지효과는 무시하여 설계되어왔다. 그러나 말뚝기초는 말뚝캡-지반-말뚝사이의 복잡한 상호작용에 의해 영향을 받는다. 이러한 상호작용을 단순하게 분류하면 1) 말뚝설치시 주변지반의 응력상태, 밀도, 때로는 입도분포 등이 변화하는 것과 2) 말뚝기초에 하중이 작용할 때 근접되어 있는 말뚝간 혹은 말뚝캡에 의한 응력 또는 변위 중첩과 파괴영역이 변화하는 것으로 나눌 수 있다(Hansbo, 1993). 무리말뚝에 관한 연구는 무리말뚝의 지지력(무리효율)과 무리말뚝의 침하량비(group settlement ratio) 및 말뚝캡-지반-말뚝의 상호작용이 주 연구내용이 된다.

Akinmusuru(1980)는 지표면과 접하고 있는 무리말뚝

의 지지력이 자립식 무리말뚝(free-standing pile group)의 지지력과 말뚝캡 지지력의 산술합이 아니라는 것을 보여 주었다. 사질토지반에 설치한 무리말뚝의 지지력은 자립식 무리말뚝과 말뚝캡의 지지력 합을 능가하는 것으로 밝혀졌는데 이것은 말뚝캡과 자립식 무리말뚝 사이의 상호작용에 의한 지지력 증가 때문으로 판단된다.

Phung(1992)은 주면과 선단의 효율을 분리하여 말뚝캡이 지반에 접촉되어 있는 무리말뚝의 지지력을 다음과 같은 식으로 표현하였다.

$$Q_{fbc} = m(\eta_s Q_{sfs} + \eta_b Q_{sfb}) + C_c Q_{fc} \quad (1)$$

여기서, Q_{fbc} 는 말뚝캡이 지표면에 접촉되어 있는 무리말뚝의 지지력

Q_{sfs} , Q_{sfb} 는 단말뚝의 주면마찰력 및 선단지지력
 Q_{fc} 캡만 있을 경우의 지지력

m 은 무리말뚝의 말뚝수

η_s 는 주면마찰력의 무리효율(group efficiency for pile shaft)

η_b 는 선단지지력의 무리효율(group efficiency for pile base)

C_c 는 말뚝캡의 효율

Phung(1993)은 사질토 지반에서 말뚝이 설치되지 않은 캡, 단말뚝, 자립식 무리말뚝 및 지표면과 접하고 있는 무리말뚝에 대해 재하시험을 수행하였으며, 이 결과 지표면과 접하고 있는 무리말뚝의 지지력이 자립식 무리말뚝의 지지력보다 크다는 것을 증명하였다. 이 때, 말뚝의 선단지지력은 거의 비슷하였으나 말뚝캡에 의한 수평 유효응력의 증가로 지표면과 접하고 있는 무리말뚝의 주면마찰력이 현저하게 증가한 것으로 나타났다. 그러나, 말뚝캡의 효율은 0.8 ~ 1.2로 나타나 말뚝캡만 있을 경우의 지지력과 큰 차이가 없었다.

무리말뚝의 평균 침하량 \bar{s}_g 와 단말뚝의 침하량 s_s 와의 비를 침하량비라 하며 식 (2)와 같이 정의한다.

$$\xi = \frac{\bar{s}_g}{s_s} \quad (2)$$

단말뚝에 대한 무리말뚝 침하량의 비(ξ)에 대해서는, 무리말뚝의 개당 평균하중과 동일한 하중에서의 단말뚝 침하량에 대한 무리말뚝의 침하량비 혹은 단말뚝의 하중-침하 곡선의 기울기에 대한 무리말뚝의 하중-침하

곡선의 기울기비 등이 사용된다.

자립식 무리말뚝 또는 지표면에 말뚝캡이 접촉되어 있는 무리말뚝에 상관없이 현재까지 모래지반에 설치한 무리말뚝에 대한 침하량비에 대해서는 일치된 견해가 없다. 기존의 모형시험 결과를 분석해보면 침하량비는 1보다 크거나 작게 나타나 일정한 경향을 찾기가 어렵다(Hansbo, 1993 : O'Neil, 1983). 침하량비에 영향을 주는 것에는 여러 가지 요인이 있으나, 말뚝설치시의 주변지반 다짐효과가 좌우할 때는 1보다 작아지며 변위장 중첩 효과가 지배적일 때는 1보다 커지는 것으로 보고되었다(Phung, 1993).

3. 현장시험

3.1 시험지반

현장시험에서 구해진 원지반의 지층분포는 그림 1과 같다.

그림 1을 통해 알 수 있듯이 원지반 지층은 지표면에서 2.5m 깊이에서부터 풍화암이 시작되며 풍화암층의 두께는 약 6.5m이다. 풍화암층은 모암의 풍화대로서 실트 섞인 모래로 분해되며 매우 조밀하고 습한 상태이다. 풍화암층의 아래로는 연암층이 나타나고 있다.

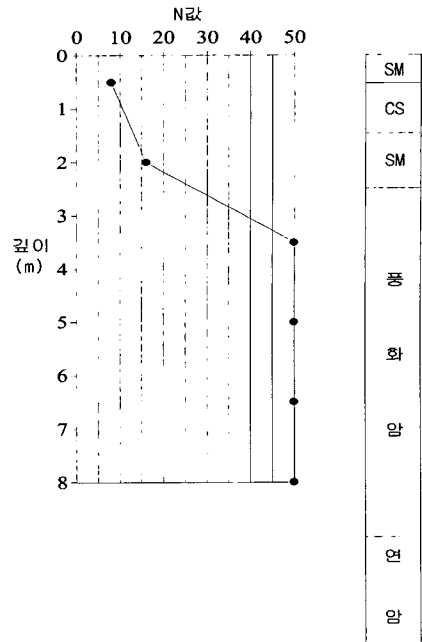


그림 1. 원지반 지층분포

무리말뚝에 대한 재하시험을 위하여 풍화암 상부층까지 균질한 모래로 치환하고 시험말뚝의 선단은 N치가 50 이상인 풍화암층에 근접시켰다. 시험지반으로 사용된 모래의 유효경(D_{10})은 0.32mm이고 균등계수(c_u)가 3이며 곡률계수(c_g)가 0.87로서 균등한 입도분포를 갖는다. 모래의 200번체 통과량은 극히 소량이며 통일분류

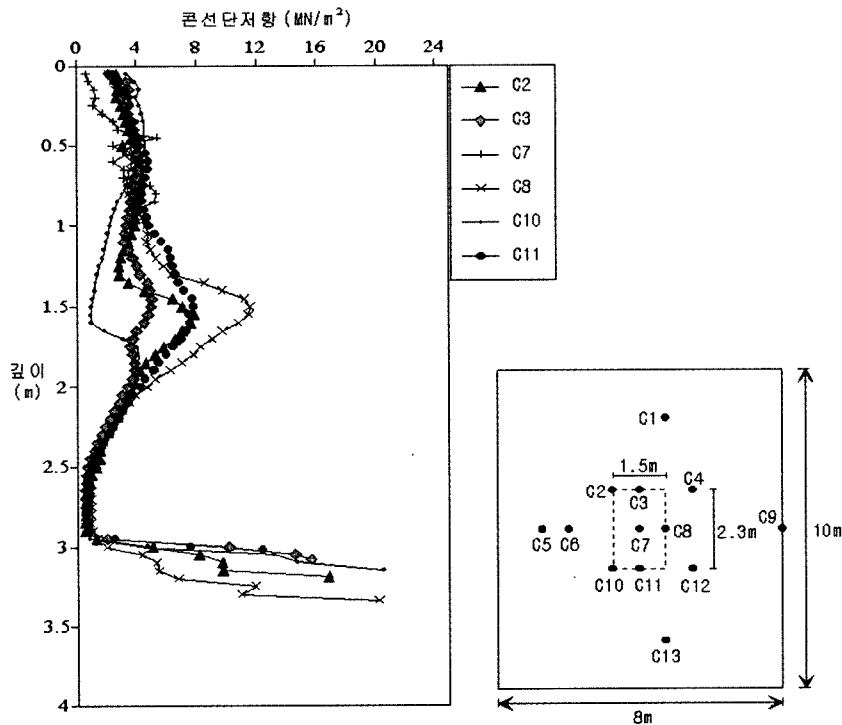


그림 2. 콘관입시험 결과

에 의하면 입도분포가 균등한 모래(SP)로 분류되었다.

원지반을 8m × 10m 넓이로 3m 깊이까지 굴착하였는데 굴착면의 경사는 거의 수직이었다. 약 3m 깊이까지 굴착이 완료된 후에는 말뚝선단이 근입될 풍화암층에 대하여 평판재하시험을 실시하였으며 시험결과로 구한 탄성계수는 $6,123 \text{ t/m}^2$ 로 산정되었다(윤지선 역, 2000). 굴착완료 후에는 모래를 채우고 새로 조성된 모래지반 13곳에 대해 콘관입시험을 실시하였다. 시험지반 모래의 단위중량은 1.65 t/m^3 이며 상대밀도는 22%로서 느슨한 상태이다.

모래지반에 대한 콘관입시험 결과는 그림 2와 같다. 그림 2에서 깊이에 따른 콘 선단저항값(q_c)의 분포도 오른쪽에는 콘관입시험 위치가 나타나 있으며 말뚝캡의 크기를 점선으로 표시하였다.

그림 2에 나타낸 콘 선단저항값의 분포를 살펴 볼 때,

지표면으로부터 약 2.0m 깊이까지는 시험위치에 따라 콘 선단저항값의 편차가 크나 평균값은 대체로 일정하고 2m이하의 깊이에서는 시험위치에 상관없이 콘 선단저항값이 거의 비슷함을 알 수 있다. 또한, 지층은 약 3m 이하의 깊이에 존재함을 알 수 있다. 전반적으로 시험지반의 콘 선단저항값이 불균질하게 분포하는 것은, 외부로부터 운반된 모래를 굴착기로 포설하여 지반이 정밀하게 조성되지 못하였기 때문으로 판단된다. 콘 선단저항값을 이용하여 모래지반의 탄성계수($E_s = 2.75q_c$)를 계산하면 지표면에서 1.5m 깊이까지는 $1,080 \text{ t/m}^2$ 이고 1.5m 깊이에서 3m깊이까지는 790 t/m^2 이며 평균값은 약 940 t/m^2 로 산정되었다(Bowles, 1988).

3.2 말뚝시공

시험지반 조성이 완료된 후에는 말뚝을 설치하였는

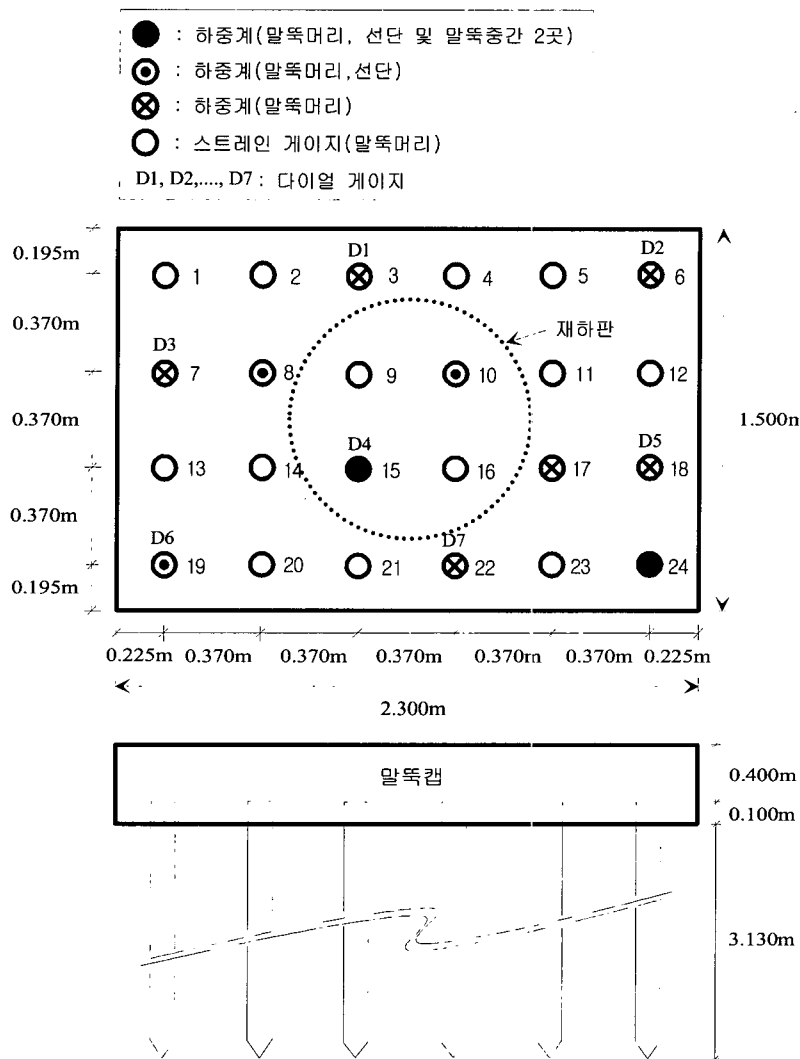
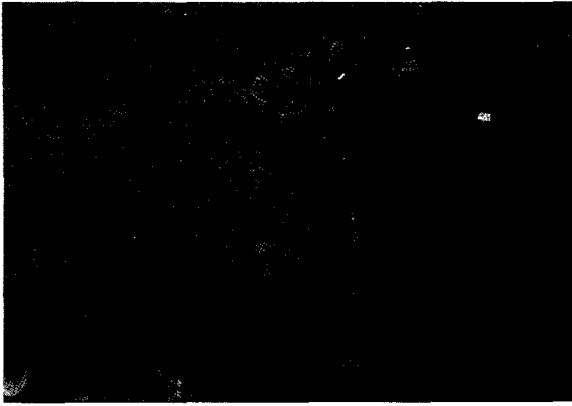


그림 3. 말뚝 설치 평면도



(a) 말뚝 설치상황



(b) 무리말뚝 재하시험 전경

그림 4. 말뚝 재하시험

데 말뚝 설치 평면도는 그림 3과 같다.

그림 3에 나타나 있듯이 현장시험에 사용된 총 말뚝 개수는 24개인데 4개씩 6열로 설치하였으며 각각의 말뚝에 번호를 부여하였다. 그림 3의 말뚝설치 평면도에서 말뚝 위에 표시된 D1 ~ D7은 무리말뚝에 대한 재하시험시 말뚝캡의 변형량을 측정하기 위한 다이얼 게이지 번호를 나타내며 점선으로 표시된 부분은 재하판의 크기를 나타낸다.

모형말뚝으로는 바깥지름 92.5mm, 두께 6mm, 길이 3,230mm인 강관을 사용하였다. 말뚝 선단부는 끝단의 각도가 60°인 슈우(shoe)를 장착하였다. 말뚝 중심간 간격은 370mm로서 말뚝지름의 4배에 해당한다.

시험에 사용한 각각의 말뚝에는 하중계 또는 스트레인 게이지를 설치하여 말뚝에 작용하는 하중을 측정하도록 하였다. 그림 3에 나타나 있는 바와 같이, 계측기를 설치한 방식에 따라 말뚝을 크게 4종류로 분류할 수 있다. 축하중 전이측정을 위해 말뚝머리, 선단 및 말뚝 중간 2곳에 하중계를 설치한 말뚝 2개, 말뚝머리와 선단에 하중계를 설치한 말뚝 3개, 말뚝머리에 하중계를 설치한 말뚝 6개 그리고 말뚝머리에 스트레인 게이지를 설치한 말뚝 13개등 총 24개 말뚝 전부에 계측기를 설치하였다.

말뚝설치는 콘관입시험기가 장착된 특장차를 이용해

수행하였는데 콘압입기를 이용하여 말뚝을 압입하여 설치하였다. 말뚝캡 콘크리트를 타설하기 직전 모든 말뚝이 시공된 상황이 그림 4(a)에 나타나 있다. 24개의 말뚝이 시공된 후에 무리말뚝 중앙부에 설치된 15번 말뚝과 무리말뚝 최 외각에 설치된 24번 말뚝에 대하여 단말뚝 재하시험을 실시하였다. 2개의 단말뚝에 대한 재하시험 완료 후에는 500mm 두께의 말뚝캡 콘크리트를 타설하였는데, Hain과 Lee(1978)의 기준에 의하면, 말뚝캡의 강성이 매우 큰(very stiff) 것으로 분류된다. 말뚝캡 콘크리트가 완성된 후에는 그림 4(b)와 같이 재하판을 놓고 무리말뚝에 대한 재하시험을 실시하였으며, 말뚝캡에 가해지는 전체하중은 하중계를 이용하여 측정하였고 말뚝캡의 침하량은 다이얼 게이지를 이용하여 측정하였다. 개개 말뚝에 작용하는 하중은 말뚝에 설치한 계측기를 자동계측 장비에 연결하여 시간에 따른 하중 값이 자동으로 측정되도록 하였다.

4. 재하시험 결과 및 분석

4.1 시험하중

2개의 단말뚝과 무리말뚝의 재하시험에 적용한 하중 단계를 요약하면 표 1과 같다.

표 1. 하중단계

시험종류	하중단계		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	단말뚝에 대한 시험하중(t)	No.15		0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	1.5	0	1.5	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0	5.5
No.24			0.5	1.0	0.5	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	2.0	1.0	0	-	-	-	-
무리말뚝에 대한 시험하중(t)			20	40	60	100	150	200	250	300	320	-	-	-	-	-	-	-

각각의 하중 단계별 재하시간은 ASTM D1143-81 (1989)규정에 따라 단위 시간당 침하량이 0.25mm 이내 일 때까지 하였으며, 표 1에 나타난 단계별 하중값은 말뚝이 급격히 파괴에 이르지 않도록 하중단계를 적절히 조정한 것이다.

4.2 단말뚝 시험결과

그림 3에 나타나 있는 15번 말뚝과 24번 말뚝에 대하여 재하시험을 통해 구한 말뚝머리 하중-침하량 관계는 그림 5과 같다.

그림 5에서 알 수 있듯이 무리말뚝 중앙부에 설치한 15번 말뚝의 지지력이 무리말뚝의 가장자리에 설치한 24번 말뚝의 지지력보다 크다. 이 것은 15번 말뚝이 24번 말뚝에 비해 인접 말뚝의 설치에 의한 다짐의 영향이 컸기 때문으로 판단된다. 15번 말뚝의 하중-침하량 곡선으로부터 Chin의 방법(Prakash and Sharma, 1990)을 이용하여 말뚝의 극한지지력을 구하면 5.2t이다. 24번 말뚝의 극한지지력을 Chin의 방법을 써서 결정하면 2.6t으로서, 15번 말뚝 극한지지력의 1/2이다.

15번 말뚝에 있어서 말뚝머리에 작용하는 하중을 말뚝주면이 부담하는 하중과 말뚝선단이 부담하는 하중으로 분리하여 말뚝머리 침하량에 대하여 나타내면 그림 6(a)와 같다. 그림 6(b)에는 말뚝머리하중에 대한 주면마찰력 분담률을 침하량에 대하여 도시하였다.

그림 6에서 보면 말뚝머리하중에 대한 주면마찰력의 분담비율이, 말뚝머리하중이 0.5t일 때 약 82%에서 5t일 때는 약 64%로 감소하여 침하량이 커짐에 따라 말뚝 선단이 부담하는 하중의 비율이 증가함을 알 수 있다.

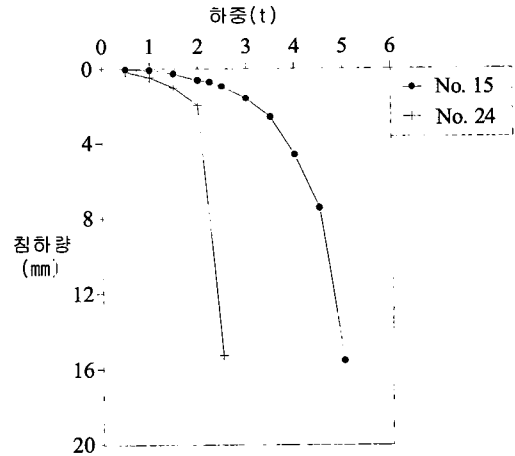
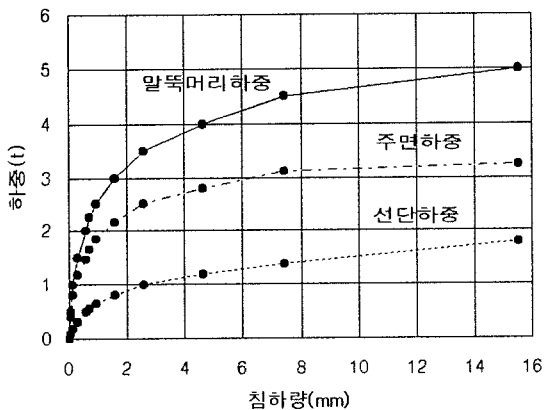


그림 5. 말뚝머리 하중-침하량 곡선(단말뚝 시험)

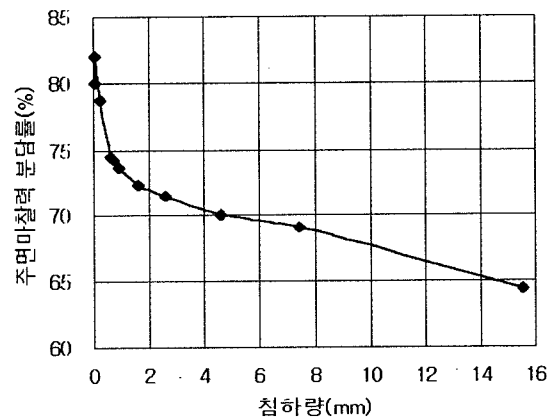
4.3 무리말뚝 시험결과

무리말뚝에 대한 재하시험 계획에 따라 말뚝캡에 320t까지 하중을 가하여 하중-침하량 곡선을 얻었다. 재하시험시 적용한 하중과 7개의 다이얼 게이지에 의해 측정된 말뚝캡의 평균침하량 사이의 관계를 그래프로 나타내면 그림 7(a)와 같다. 이 그림에는 말뚝캡에 가해진 전체하중을 말뚝이 부담하는 하중과 말뚝캡이 부담하는 하중으로 분리한 결과도 같이 나타나 있다. 그림 7(b)에는 이것을 캡하중 분담률과 평균침하량과의 관계로 나타내었다.

그림 7(a)의 하중-침하량 곡선의 형상을 그림 5에 나타난 단말뚝 시험시의 하중-침하량 곡선과 비교하여 보면, 말뚝캡이 지표면에 접촉하여 있는 무리말뚝에서는 하중이 증가함에 따라 침하도 점진적으로 증가하고 있어 뚜렷한 극한값을 보이지 않고 있음을 알 수 있다. 전체하중이 20t일 때 말뚝캡이 부담하는 하중의 비율은 전

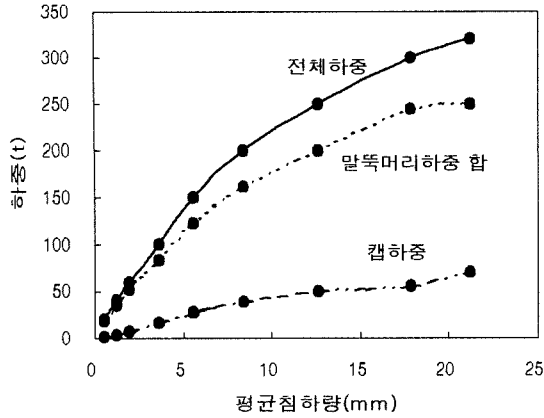


(a) 하중-침하량 곡선

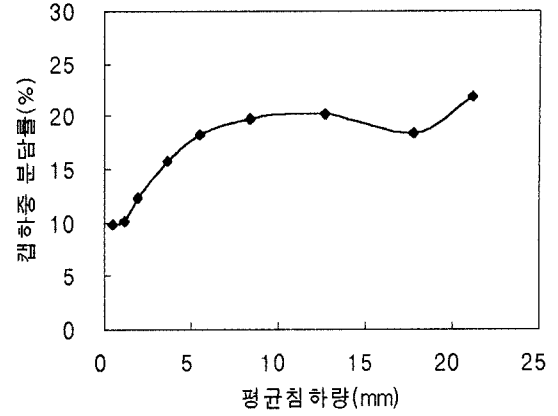


(b) 주면마찰력 분담률

그림 6. 말뚝머리하중의 분리(15번 단말뚝 시험)

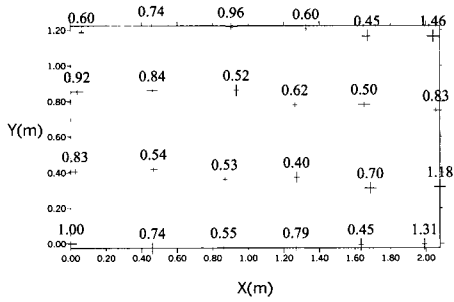


(a) 하중-평균침하량 곡선

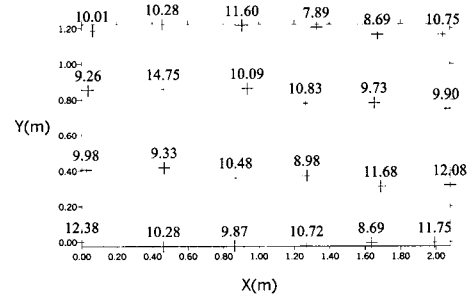


(b) 캡하중 분담률

그림 7. 말뚝과 말뚝캡의 하중분담(무리말뚝)



(a) 전체하중 = 20t



(b) 전체하중 = 320t

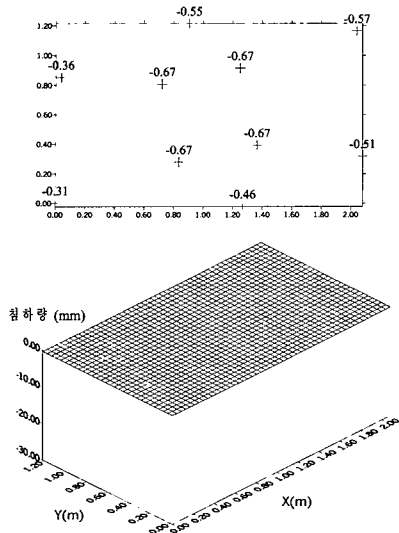
그림 8. 말뚝머리 하중분포

체하중의 약 10%이며 전체하중이 320t일 때 말뚝캡이 부담하는 하중의 비율은 전체하중의 약 22%이다. 즉, 상부하중이 증가함에 따라 전체하중에 대하여 말뚝이 부담하는 하중의 비율이 대체로 감소하고 말뚝캡이 부담하는 하중의 비율은 계속 증가한다. 따라서, 캡이 지반에 접촉하고 있는 강성 무리말뚝 기초에서는 상부하중의 일정부분을 캡이 분담하고 나머지를 말뚝이 분담하는 것으로 설계하는 것이 바람직할 것이다.

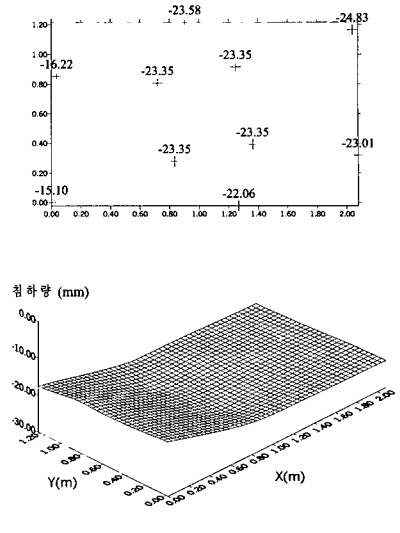
말뚝캡에 가해진 전체하중이 20t과 320t일 경우에 대하여 각각의 말뚝머리에 작용하는 하중 분포를 나타내면 그림 8과 같다. 전체하중이 20t일 때 말뚝머리에서의 하중분포를 살펴보면 일반적으로 균등한 값을 나타내나

말뚝캡 오른쪽 모서리 부분에 위치한 말뚝들에는 하중이 다소 많이 작용하는 것을 알 수 있다. 전체하중이 320t일 때는 그림 8(b)에서 볼 수 있는 것과 같이 1개소의 말뚝머리하중을 제외하면 각 말뚝머리에 작용하는 하중은 대략 9t에서 12t 정도이며 평균하중은 10.4t이다.

말뚝캡의 침하양상을 전체하중 20t과 320t에 대하여 나타내면 그림 9와 같다. 전체하중이 20t일 때 말뚝캡의 침하는 전반적으로 균등하나 중앙부에서 최대가 되며 그 값은 0.67mm로 매우 작다. 전체하중 320t이 작용시에는 말뚝캡 가운데 부분과 오른쪽 모서리 부분의 침하량은 23mm 정도로서 왼쪽 모서리 부분의 침하량 15mm 정도보다 크며, 부등침하량은 8mm 정도이다. 말뚝캡 부

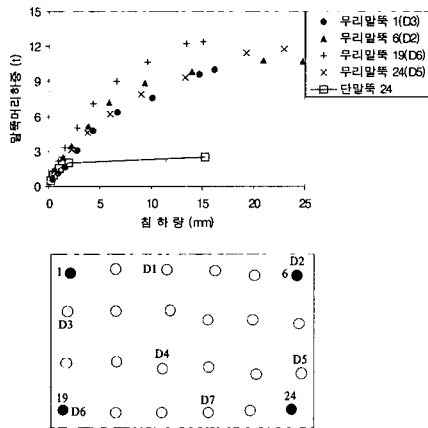


(a) 전체하중 = 20t

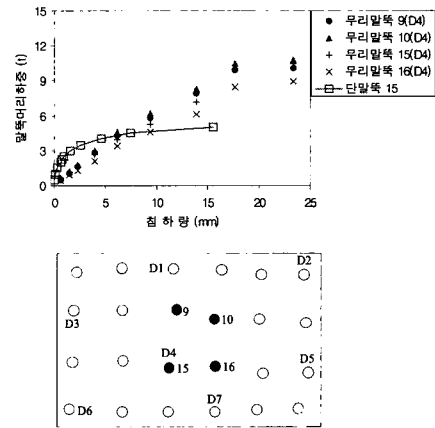


(b) 전체하중 = 320t

그림 9. 말뚝캡의 침하



(a) 외곽 4개 말뚝



(b) 중앙 4개 말뚝

그림 10. 말뚝머리 하중의 비교

등침하의 주요 원인은 시험지반의 불균질성에 기인하는 것으로 추정된다. 이러한 부등침하를 제외하면 전반적으로 말뚝침하량이 균질하여 말뚝캡은 강성이 큰 기초의 거동을 보이는 것으로 판단된다.

무리말뚝에 대한 재하시험결과로부터 무리말뚝의 최외곽에 있는 말뚝과 중앙부에 있는 말뚝에 대해 하중과 침하량 관계를 나타내면 그림 10과 같다. 이 그림에는 관심 대상인 말뚝들의 위치와 그 말뚝들의 하중-침하량 곡선을 도시하였으며 침하량을 계산하기 위해 참조한 다이얼 게이지 번호도 나타내었다. 또한, 15번 말뚝과 24번 말뚝에 대한 단말뚝 재하시험결과도 이 그림에 함께 나타내었다.

말뚝캡의 최외곽에 설치한 말뚝에 대한 하중-침하량 관계를 나타내는 그림 10(a)와 말뚝캡 중앙부에 설치한

말뚝에 대한 하중-침하량 관계를 나타내는 그림 10(b)의 결과를 고찰해 볼 때, 다음과 같은 것을 알 수 있다.

- (1) 외곽 말뚝의 경우에는 단말뚝과 무리말뚝의 초기 하중-침하량 거동이 비슷하나, 하중이 증가함에 따라 단말뚝은 급속히 파괴에 이르고 무리말뚝은 상당히 큰 하중을 지지하는 것을 볼 수 있다.
- (2) 중앙 말뚝의 경우에, 단말뚝이 무리말뚝에 비해 초기에는 같은 하중에 대해 침하량 작으나, 하중이 증가함에 따라 급속히 파괴에 도달하였고 무리말뚝은 지속적으로 하중을 지지하는 것으로 나타났다.
- (3) 무리말뚝으로 거동하는 말뚝의 극한지지력이 단말뚝에 비하여 상당히 큰 것을 알 수 있다. 그 이유는 무리말뚝의 경우에 강성기초와 지반의 상호작용에 의해 상당히 큰 구속응력이 말뚝에 작용하여 지지력

이 증가한 것으로 판단된다. 사질토 지반에 말뚝캡이 접촉한 다른 무리말뚝 시험에서도 이와 유사한 결과가 나타났다(Vesic, 1969 ; Akin-musuru, 1980 ; Phung, 1993).

외곽과 중앙에 위치한 말뚝이 단말뚝인 경우와 무리말뚝인 경우에 그 거동이 상당히 다르게 나타나 이를 좀더 살펴보기 위해, 말뚝 15번(중앙)과 말뚝 24번(외곽)의 단말뚝 재하시험 및 무리말뚝 재하시험을 수행하여 얻은 하중-침하량 곡선을 그림 11에 도시하였다. 또한, 이 그림에는 무리말뚝 재하시험 결과로부터 얻은 말뚝 개당 평균하중과 말뚝캡의 평균침하량에 대한 관계 곡선도 같이 도시하였으며, 이 5개의 하중-침하 곡선을 분석하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

- (1) 단말뚝의 경우에는 전술한 바와 같이, 중앙부에 위치하고 있어 주변 말뚝 설치로 인한 다짐의 영향을 많이 받은 15번 말뚝이 외곽부에 위치한 24번 말뚝보다 강성 및 지지력이 크게 나타난다.
- (2) 무리말뚝의 경우에는, 같은 침하량에 대해서 중앙부 말뚝이 외곽 말뚝에 비하여 하중분담이 작은 것으로 나타났다. 이는, 강성기초의 경우에는 변위장중첩 효과로 인해 중앙부 말뚝에 작은 하중이 작용하여도 외곽부와 같은 침하량을 유발하기 때문이다.
- (3) 주변 말뚝설치로 인한 영향을 비교적 덜 받은 단말뚝 24번의 지지력을 chin방법으로 구하면 2.6t이고 말뚝개당 평균하중에 대한 하중-침하곡선으로 지지력을 구하면 16.6t으로 무리말뚝으로 거동시의 지지력이 단말뚝에 비해 6.4배로 나타났다.

말뚝에 같은 하중이 작용할 때 단말뚝의 침하량과 무리말뚝의 침하량비를 살펴보기 위해서 24번 말뚝의 단말뚝 재하시험과 무리말뚝 시험의 말뚝 개당 평균하중에 대한 하중-침하 곡선을 비교하여 그림 12과 같이 침하량비를 구했다. 그림 12에 의하면, 초기 하중단계에서는 무리말뚝의 변위장중첩 효과로 인하여 침하량비가 1보다 큰 것으로 나타나나 하중이 증가함에 따라 단말뚝이 파괴에 이르면서 침하가 급격히 증가하면 침하량비는 1 이하로 감소함을 알 수 있다.

15번 말뚝에 대하여, 단말뚝 재하시험과 무리말뚝 재하시험시 침하량에 따른 말뚝머리하중에 대한 주변마찰력 분담률을 나타내면 그림 13과 같다.

말뚝머리하중에 대한 말뚝주면하중의 분담비율이 단말뚝 재하시험의 경우에는 침하(하중)가 증가함에 따라 82%에서 65%로 감소하였으나, 무리말뚝 재하시험에서

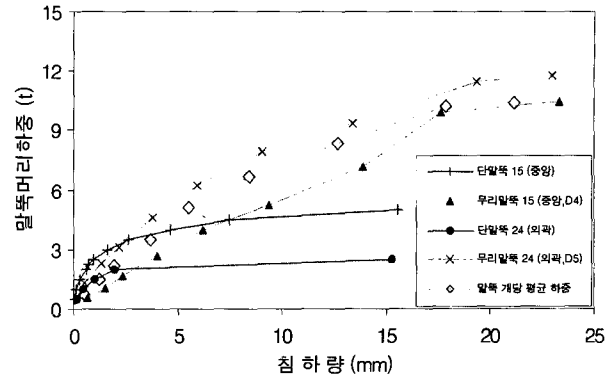


그림 11. 하중-침하량 곡선의 비교

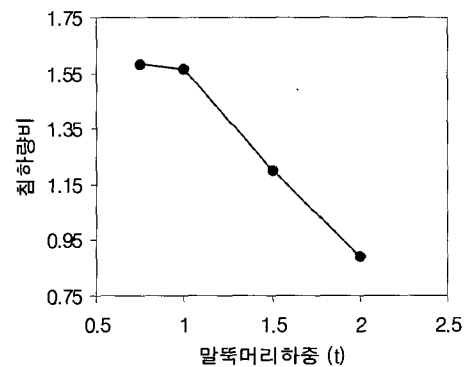


그림 12. 단말뚝 24번과 무리말뚝의 침하량비

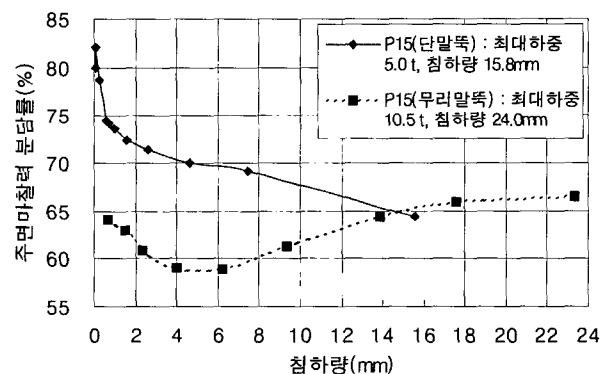


그림 13. 주변마찰력 분담률(15번 말뚝)

는 주변마찰력의 분담비율이 하중크기에 따라 일정한 경향을 보이지 않고 59% ~ 66% 정도로 단말뚝 재하시험시보다 작다. 이것은 무리말뚝에서의 말뚝캡-말뚝-지반 사이의 상호작용효과가 말뚝선단보다 말뚝주면에서 더 크다는 기존의 시험결과(Akinmusuru, 1980 : Phung, 1993)와는 다소 다른 경향을 보인다. 이 때는 말뚝캡 폭과 말뚝 길이의 비가 2.5 ~ 5.0으로 이 비가 약 2.0인 본 시험보다는 구속응력이 말뚝선단에 미치는 영향이 작았을 것으로 판단되나 구체적인 원인에 대해서는 추가적인 연구가 필요하다.

5. 결 론

말뚝캡이 지표면에 접촉되어 있는 무리말뚝에 대하여, 말뚝캡-지반-말뚝 사이의 복잡한 상호작용 및 말뚝캡의 지지력 분담효과 등을 파악하기 위하여, 직경이 92.5mm이고 길이가 약 3.1m인 축소 강관말뚝을 사용한 단말뚝 및 무리말뚝(말뚝 24본 : 4 × 6, 말뚝캡 : 1.5m × 2.3m × 0.5m)에 대하여 재하시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 말뚝캡 설치전에 수행된 단말뚝시험에서는, 말뚝 설치시의 다짐효과로 인하여 중앙부에 위치한 말뚝(15번 말뚝, 극한지지력 5.2t)이 외곽부에 위치한 말뚝(24번 말뚝, 극한지지력 2.6t)보다 지지력이 크게 나타났다.
- (2) 무리말뚝 시험에서는, 하중이 증가함에 따라 전체하중에 대해 말뚝캡이 분담하는 하중의 비율이 점진적으로 커져 최종하중 단계인 320t에서는 전체하중의 약 22%에 해당하는 하중을 분담하였다.
- (3) Chin 방법을 사용하여 구한 무리말뚝의 개당 평균 극한지지력은 16.4t으로, 단말뚝(무리말뚝 외곽의 24번 말뚝) 재하시험으로 구한 지지력 2.6t보다 상당히 크게 나타났다.
- (4) 무리말뚝의 경우에는, 같은 침하량에 대해서 중앙부 말뚝이 외곽 말뚝에 비하여 하중분담이 작은 것으로 나타났다. 이는, 강성기초의 경우에는 변위장중첩 효과로 인해 중앙부 말뚝에 작은 하중이 작용하여도 외곽부와 같은 침하량을 유발하기 때문으로 판단된다.
- (5) 말뚝에 같은 크기의 하중이 작용할 때 단말뚝의 침하량과 무리말뚝의 침하량 비를 나타내는 침하량 비가 하중초기 단계에서는 1 이상이나 단말뚝이 파괴에 근접함에 따라 1 이하로 작아지는 것으로 나타났다.
- (6) 말뚝머리하중에 대한 말뚝주면하중의 분담비율이 단말뚝 재하시험의 경우에는 하중이 증가함에 따라 주면마찰력의 분담비율이 82%에서 65%로 감소하였으나, 무리말뚝 재하시험에서는 같은 말뚝에서 주면마찰력의 분담비율이 59% ~ 66% 정도로 비교적 일정하게 나타났다.

다양한 지층구조와 말뚝특성을 고려하면 위의 실험 결과를 설계에 직접 반영하는 데는 한계가 있을 것이며, 또한 본 실험이 가지고 있는 축척효과(scale effect)로 인한 실험거동과의 차이점을 극복하기 위해서는 무리말뚝을 적용한 대형구조물 말뚝기초에 대한 시험이 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. 윤지선 역(2000), 토목지질공학, 구미서관, pp.117~119.
2. Akinmusuru, J. O.(1980), "Interaction of Piles and Cap in Piled Footings", ASCE, JGED, Vol.106, No.GT11, pp.1263~1268.
3. American Society for Testing and Materials ASTM D1143-81 (1989), Standard Method of Testing Piles under Static Axial Compressive Load, Vol.04.08, Philadelphia, pp.179~189.
4. Bowles, J. E.(1988), Foundation Analysis and Design, 4th eds., McGraw-Hill, INC., New York, pp.264~266.
5. Clancy, P. and Randolph, M. F.(1996), "Simple Design Tools for Piled Raft Foundations", Geotechnique, Vol.46, No.2, pp.313~328.
6. Hain, S. J., and Lee, I. K.(1978), "The Analysis of Flexible Raft-Pile Systems", Geotechnique, Vol.28, No.1, pp.65~83.
7. Hansbo, S.(1993), "Interaction Problems related to the Installation of Pile Groups", Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Van Impe, eds, Rotterdam, ISBN 9054103132.
8. Katzebach, R., Arslan, U. and J. Gutwald(1994), "A Numerical Study on Pile Foundation of the 300m High Commerzbank Tower in Frankfurt am Main", Numerical Methods in Geotechnical Engineering, Balkema, Rotterdam, pp.271~277.
9. O'Neil, M. W.(1983) "Group Action in Offshore piles", Proc. of Speciality Conference on Geotechnical Practice in Offshore Engineering, ASCE, pp.25~64.
10. Phung, D. L.(1992), "Tests on Piled Footings in Non-Cohesive Soils - A Literature Survey", Swedish Geotechnical Institute, Varia No.364.
11. Phung, D. L.(1993), "Footings with Settlement-Reducing Piles in Non - Cohesive Soil", Ph. D. thesis, Chalmers Univ. of Technology, pp.7~8.
12. Prakash, S. and Sharma, H.D.(1990), Pile Foundations in Engineering Practice, John Wiley and Sons, New York, pp.646~652.
13. Randolph, M. F.(1994), "Design Methods for Pile Group and Piled Rafts", Proc. 13th Int. Conf. Soil Mech., New Delhi, pp.61~82.
14. Somner, H., Tamaro, G. and De Benedittis, C.(1991), "Messe Turm, Foundation for the Tallest Building in Europe" 4th International DFI Conference, Rotterdam.
15. Vesic, A. S.(1969), "Experiments with Instrumented Pile Groups in Sand", Performance of Deep Foundations, ASTM STP 444, American Society for Testing and Materials, pp.177~222.

(접수일자 2001. 7. 12, 심사완료일 2001. 11. 25)