

풍화암 지반에 설치된 소구경말뚝의 거동에 관한 연구

An Experimental Study on the Behavior of Micropiles installed in Weathered Weak Rock

박성재¹⁾, Sung-Zae Park, 정경환²⁾, Gyeong-Hwan Jeong, 이세훈³⁾, Se-Hoon Lee

¹⁾ 부산대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National Univ.

²⁾ (주)동아지질 이사, Director, Dong-A Geological Engineering Co., Ltd.

³⁾ (주)동아지질 차장, Deputy General Manager, Dong-A Geological Engineering Co., Ltd.

SYNOPSIS : In this study compressive and tensile load tests have been performed to investigate reinforcing effect and load transfer mechanism of small diameter piles installed in the foundation soil for the marine suspension bridge. Load tests were carried out on steel plate with diameters of 50cm, 100cm and 150cm varying loads starting from 39 tons up to 314 tons. Small diameter piles were proved to behavior like as friction piles and loads were not transmitted to the bottom of piles. From pull-out tests, the uplift capacity of small diameter piles was largely influenced by reinforcing materials compared to frictional resistance between piles and adjacent soils. The bearing capacity of small diameter piles appeared to be higher than the ultimate bearing capacity evaluated using static formulae. The load carrying capacity of small diameter piles was superior to the bored piles with a similar size. Thus, ultimate bearing capacity estimated from static formulae can provide conservative designs and thereby resulting in economic disadvantages. A further study to accumulate data regarding various soil conditions is recommended for an improved estimation of bearing capacity of piles with small diameter.

Key words : micropiles, load transfer, frictional resistance, load intensity-settlement curve, pull-out test, strain gauge

1. 서론

이탈리아의 Fernando Lizzi가 다양한 작업조건에서 적용성이 뛰어나고 구조물 지지와 사면등의 현장 보강에서 하중지지 능력이 우수한 소구경 말뚝공법을 개발한지³⁾ 거의 반세기가 지났지만, 국내에서는 깊은 기초의 시공에 기성말뚝이나 대구경 현장타설말뚝에 거의 의존하고 있고 아직까지 소구경말뚝의 적용사례는 많지 않다. 본 연구에서는 해상 현수교의 대형 구조물 기초지반 공사중 지반보강용으로 설치된 소구경말뚝에 대해 평판을 이용하여 말뚝과 지반이 함께 저항하도록 압축재하시험을 실시하였다. 시험말뚝의 직경은 100mm, 150mm, 200mm를 사용하였고, 소구경말뚝에는 거동 특성을 분석하기 위해서 일정 간격으로 변형률계를 부착하여 시험하중 단계별 변형률을 측정 하였다. 지반조건과 시공깊이 등을 달리하여 5개소 시험말뚝에 직경 50cm, 100cm, 150cm의 평판에 최대 39~314ton까지 재하와 재하를 반복하여 시험하였다. 소구경말뚝의 기초지반 보강효과는 원지반 상태에서 실시한 평판재하시험 결과와의 비교에서 확인할 수 있었다. 소구경말뚝은 전형적인 마찰말뚝으로 거동하는 특성을 나타내었고

선단에는 하중이 거의 전이되지 않았다. 소구경말뚝의 보강재에 의해 하중-변위 곡선에서 말뚝의 소성 변형량은 줄었고 제하시에는 원지반에 비해 매우 탄성적인 거동 특성을 나타내었다. 말뚝체가 지지할 수 있는 한계를 넘어선 이후 부터는 지반이 하중을 분담하기 시작하여 침하량이 급증하는 양상을 나타내었다. 압축재하시험 종료 후 시험말뚝의 보강재를 대상으로 실시한 인발시험에서 풍화지반에 대한 소구경말뚝의 지지능력은 말뚝주면과 지반 사이의 마찰저항 보다는 말뚝체의 보강재에 의해 먼저 항복된다는 것을 알 수 있었다. 시험결과를 토대로 깊이에 따른 소구경말뚝의 하중분담과 침하의 특성 및 주면마찰응력 등을 평가하였다.

2. 소구경말뚝의 특징

소구경말뚝은 대부분 100mm에서 300mm 사이의 직경과 최소 4m에서 30m의 시공깊이를 가지며, 30 ~ 100tonf의 압축 또는 인장하중 지지능력이 있다. 그림 1에서 알 수 있듯이 소구경말뚝은 단면적에 대한 말뚝원주의 비가 상당히 크므로 하중전이는 말뚝의 주면에 의해 지배된다. 즉, 선단 지지력보다는 주면 마찰력(skin friction)에 의해 지지된다. 말뚝체내의 강재가 하중을 지지하는 주부재 역할을 하고 강재가 지지하는 외부하중은 그라우트와 지반 마찰에 의해 지반으로 전달된다. 그라우트와 지반 사이에서 높은 부착력이 발휘되므로 선단지지효과는 무시할 수 있을 정도로 작다.

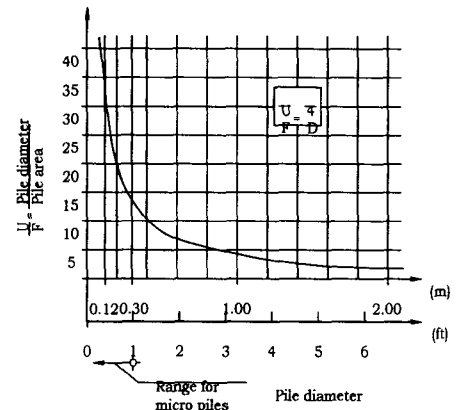


그림 1. 말뚝직경당 말뚝단면적에 대한 직경의 비

3. 현장 현황

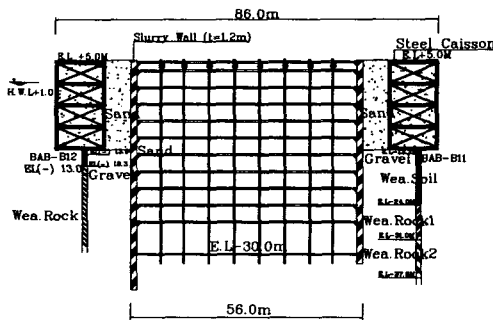


그림 2. 앵커블럭 굴착 단면도

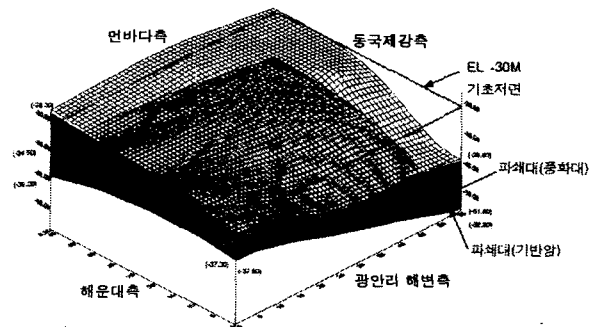


그림 3. 기반암 분포 형상

본 연구의 대상은 부산 광안대로 현장의 현수교가 설치되는 해상구간으로, 현수교의 주케이بل을 지지하게 되는 앵커블럭 시공 현장이다. 앵커블럭은 강재 케이슨을 거치한 후 내부에 모래로 채우고 내부굴착을 위해 1,200mm 두께의 지하연속벽(Diaphragm wall)이 흙막이 벽체용으로 해수면으로부터 평균 35.0m 깊이까지 시공되었다. 당초 앵커블럭의 기초지반으로 해수면으로부터 약 30.0m 하부에 있는 풍화암층에 계획되었으나 계획심도까지 굴착한 면에서 평판재하시험을 실시한 결과, 지반의 상태가 앵커블럭의 기초지반으로 사용하기에는 취약한 상태로 판단되었다^{1),2)}. 기초지반으로서 사용하기 위해서는 상태가 좋은 지반까지 추가 굴착하여 기초위치를 낮추는 방법도 있지만, 흙막이 벽체의 짧은 근입깊이와

풍화지반의 질리로 유입되는 침투수 등의 불리한 조건으로 추가 굴착은 불가능 하였다. 따라서, 당초 기초 설치계획 심도에서 시추조사, 탄성과 탐사, 재하시험 등의 정밀지반조사를 실시하여 원위치에서 지반 보강이 용이한 소구경말뚝(Micropiles) 공법으로 기초지반을 보강하게 된 현상이다.

기초 설치 예정위치인 30m 굴착된 상태에서 기초지반의 변형특성을 알기 위해 6개소의 평판재하시험과 5개소의 공내 수평재하시험을 위치를 변경해가며 각 2회씩 실시하여 지반의 변형계수(E_s)를 평가하였다. 평판재하시험은 시험하중을 감안하여 직경 50cm의 원형평판을 사용하였고, 지반의 변형특성을 파악하기 위해 시험하중을 4단계로 나누어서 재하·제하를 반복하는 다사이클 방식으로 실시하였다. 지반의 허용지지력은 하중강도-침하량 곡선에서 접선교차법에 의해 평가된 항복하중강도(p_y)의 1/2값과 극한하중강도(p_u)의 1/3값중 작은 값으로 결정하였으며, $65\text{tf/m}^2 \sim 255\text{tf/m}^2$ 의 허용지지력을 나타내어, 위치별 지지력에서도 많은 차이를 나타내었다. 평판재하시험 결과와 인접한 공내재하시험 결과를 서로 비교해 보면, 평판재하시험에 의한 지반 변형계수가 작게 평가되었다. 이것은 굴착에 의한 지중 응력해방과 공기노출에 의한 풍화 및 유입해수에 의한 지반 열화등의 영향에 의한 것으로 판단되었다.

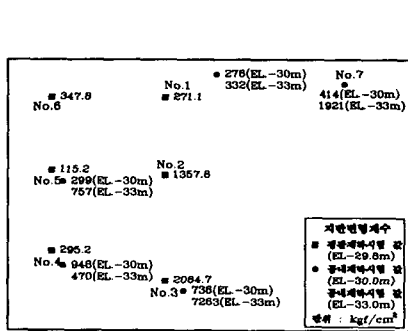


그림 4. 변형계수값의 분포

비교란 시료의 채취가 어려운 관계로 강도정수(c , ϕ)를 원지반에서 직접전단시험(In situ direct shear test)으로 평가하였다. 시험방법은 ISRM에 제시된 방법중 시험지반위에 콘크리트 block을 설치하고 하중을 직접 전달시키는 block 전단방식으로 실시하였다. 수직하중은 5단계로 나누고, 각 수직하중별로 3 ~ 4단계의 전단하중을 변화시키면서 시험체에 작용시켰다. 시험체의 전단력이 작용되는 면은 시험체의 재하측에 인장이 발생되지 않도록 시험지반면과 15° 의 경사를 두고 전단하중이 작용하도록 제작하였다.

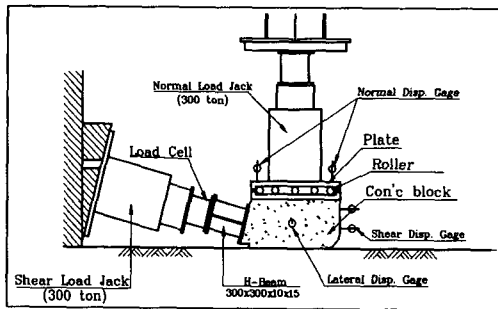


그림 5. 시험장치

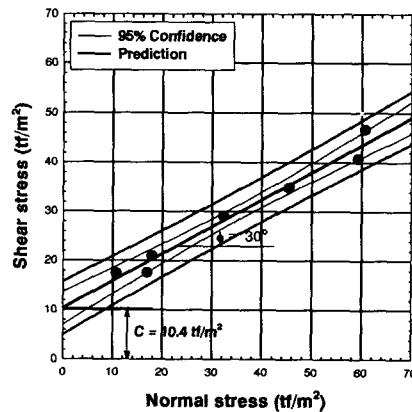


그림 6. 전단응력-수직응력 관계도

전단응력과 수직응력은 다음과 같이 계산하였다.

$$\text{전단응력 } \tau = \frac{T \cos \theta}{A}, \quad \text{수직응력 } \sigma = \frac{N + T \sin \theta}{A}$$

여기서, T : 경사하중, N : 수직하중, A : 전단면적, θ : 경사하중과 전단면과의 경사각

전단응력과 수직응력에 대해 각각 95% 신뢰도를 바탕으로 Mohr - Colomb 파괴기준에 의해 평가된 강도정수는 점착력 $c = 10.4 \text{tf/m}^2$, 내부마찰각 $\phi = 30^\circ$ 으로 평가되었다.

4 소구경말뚝의 재하시험

4.1 시험말뚝 및 시험장치

1차시험(No.1 ~ No.4)에서 소구경말뚝의 시공깊이는 모두 8.0m로 동일하지만, No.1 및 No.3은 말뚝 직경이 150mm이고, 보강재로는 철근 ϕ 32mm를 4본 사용하였으며, 50cm 직경의 평판을 단말뚝 위에서 재하하였다. 반면에 No.2와 No.4은 말뚝의 직경이 100mm로 철근 ϕ 32mm가 1본 사용된 단말뚝을 70cm 간격으로 정삼각형 배열로 3공 시공하여 1.0m 직경의 평판을 사용하였다.

2차 시험(No.5)은 말뚝의 직경이 200mm이고 ϕ 32mm 철근 4분으로 16.0m까지 시공하여 1차 시험의 4개소보다 말뚝규모가 크고, 재하판의 직경도 150cm로 상대적으로 큰 재하판이 사용되었다. 특히, No.5 말뚝은 실시공 조건에서 시험을 실시하기 위해 시험말뚝 주변에 1.5m 떨어진 지점에 8공의 소구경말뚝을 시공한 상태에서 재하시험을 실시하였다.

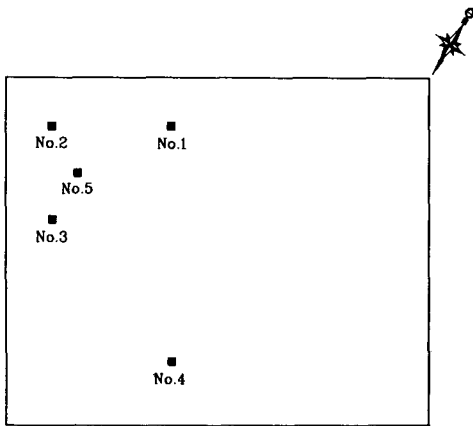


그림 7. 소구경말뚝 재하시험 위치도

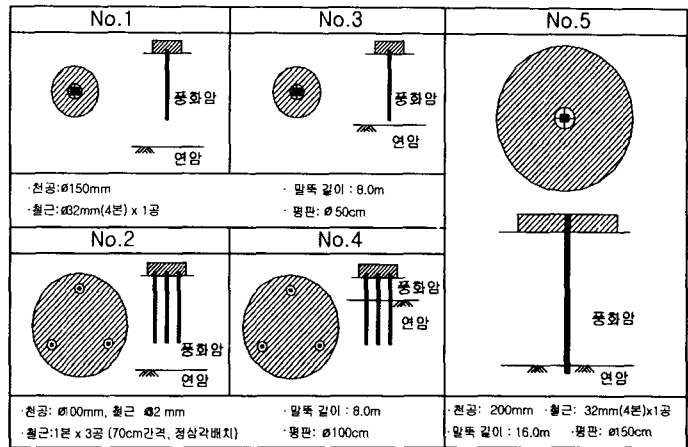


그림 8. 시험말뚝의 제원

소구경 시험말뚝의 재하하중에 의한 하중전이를 관찰하기 위해 각 시험말뚝마다 일정간격으로 변형률계(Strain gauge)를 말뚝의 보강재인 철근에 부착하였다.

시험말뚝에 보강재인 철근(D29) 4분이 사용된 No.1, No.3, No.5 말뚝은 대칭으로 배치된 2분의 철근에 설치하였으며, No.2, No.4 말뚝은 철근이 1분이므로 각각의 말뚝에 대해 일정간격으로 설치하였다. 변형률계는 시험시 변형률값을 보다 정밀하게 얻기위해 각 설치 위치마다 양단에 대칭으로 설치하여 평균값을 산출하였다. 또한, 변형률계의 온도에 따른 오차를 제거하기 위해 설치 위치마다 액티브(Active) 게이지와 더미(Dummy)게이지를 각각 부착하여 결선은 2 게이지 3 와이어(2 gauge 3 wire)방식으로 설치하였다.

표 1. 변형률계 설치현황

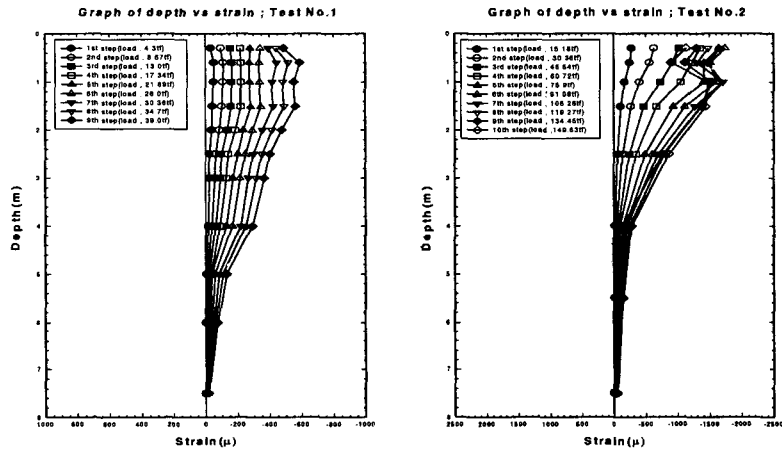
시험말뚝	설치심도(m)	설치수량 (EA)
No.1, No.3	0.3→0.6→1.0→1.5→2.0→2.5→3.0→4.0→5.0→6.0→7.5	88
No.2, No.4	0.3→0.6→1.0→1.5→2.5→4.0→5.5→7.5	96
No.5	0.3→0.6→1.0→1.5→2.0→2.5→3.0→4.0→4.5→5.0→6.0→7.0→8.5→10.5→13.0→15.5	136

4.2 시험결과 및 분석

4.2.1 하중전이 특성

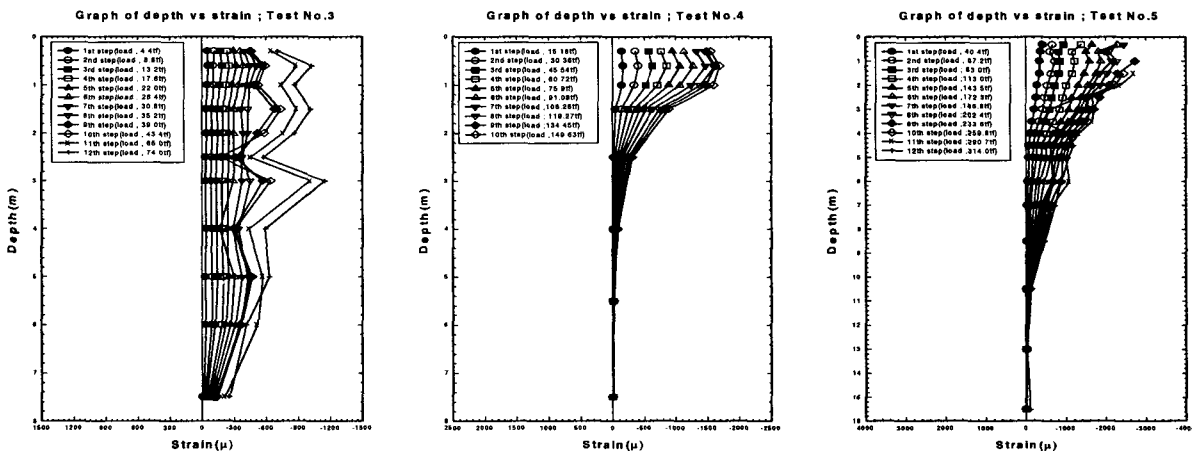
시험말뚝 No.1은 직경 50cm의 평판에 최대 시험하중 39.0tonf이 재하되었고, 하중 단계별 소구경말뚝에 설치된 변형률계에 의해 측정된 변형률 분포형상은 그림 9의 (a)와 같다. 39.0tonf까지 재하되는 동안 7.5m지점에서는 거의 변형률이 발생하지 않고 말뚝깊이의 약 80%인 6.0m까지 하중전이가 진행되었다. 변형률의 분포가 상부에서 많이 발생되고 하부로 가면서 줄어든 양상을 나타내고 있어서 일정한 크기의 주변마찰력이 깊이에 따라 저항하였고 말뚝의 선단저항은 동원되지 않았다.

시험말뚝 No.2는 150tonf의 하중이 재하되는 동안 소구경말뚝의 평균 최대변형률은 0.001477로 나타났고, 1.0m에서 4.0m사이에서 변형률의 분포가 역삼각형 모양을 나타내고 있어서 이 지점에서 주변마찰 저항이 하부로 갈수록 선형적인 증가를 나타내고 있다. 7.5m지점에서는 0.000049로 아주 적은 변형률이 측정되었고, 시험하중 이내에서는 선단까지 하중이 전이되지 않았다. 말뚝의 상부 1.0m이내의 깊이에서 변형률이 약 0.0015(3150kg/cm²)를 초과하는 상태가 되면 변형률이 불규칙한 변화를 나타내었다. 이것은 압축하중을 받는 상태에서 철근이 허용응력을 초과하고 있고, 또한 소구경말뚝이 단철근으로 설치된 상태에서의 말뚝체는 지반이 보다 약한 층으로 거동을 한 것으로 평가된다.



(a) TEST NO. 1

(b) TEST NO.2



(c) TEST NO.3

(d) TEST NO.4

(e) TEST NO.5

그림 9. 위치별 변형률 분포도

시험말뚝 No.3은 재하 하중 초기단계에서부터 말뚝의 상단에서 선단까지 하중의 전이가 그대로 유지되는 것을 나타내고 있다. 이것은 말뚝 시공직후 말뚝 설치공 하부로부터 유출되는 침투수에 의해 그라

우트 재료가 말뚝의 보강재로부터 분리·유출되어 완전한 말뚝체의 형성이 되지 못하여 발생된 것이다. 그라우트재가 철근에 제대로 부착되지 않은 상태이므로 상부 하중으로부터 철근이 저항하는 변형률이 약 0.0003을 초과한 상태부터는 전반적으로 아주 불규칙한 변형률 분포를 나타내어 공내에서 부분적으로 좌굴이 발생된 것으로 판단된다.

시험말뚝 No.4는 말뚝의 전체 8m 심도중 하부 4m정도가 기반암에 근입되어 있어서 시험하중에 대한 말뚝체의 하중전이는 전형적인 마찰말뚝 형상을 나타내었다. 149tonf의 하중이 재하되는 동안 철근의 변형률이 4.0m 지점까지 발생되었으나, 이 지점에서는 변형률 발생이 미세하고, 대부분 2.5m 깊이 이내에서 분포되어 있다. 1.0m ~ 2.5m사이의 심도에서 급격하게 변형률이 감소하고 있어서 이 부근에서 말뚝의 주변마찰력이 크게 작용하는 것으로 평가된다.

시험말뚝 No.5는 최대 314ton까지 재하되는 동안 16m 심도의 소구경말뚝에서 변형률 분포가 말뚝길이의 약 60%정도인 10.0m이내에서만 발생되었다. 기반암이 약 15m 깊이에 분포하고 있지만, 선단까지 하중전이가 발생되지 않고 10.0m이내에서 시험하중에 대해 하중전이가 완료되었다. 변형률 분포 형상을 보면 말뚝의 상부에서부터 10.0m부근까지 거의 직선적으로 감소하고 있어서 이 범위의 지반에 대한 역학적 특성이 거의 유사한 것으로 판단된다. 하중단계별 특성은 다음과 같다.

재하 하중 0~186.8tonf 구간은 말뚝심도별 변형률값은 평판하부 1.0m 아래에서 최대 변형률 0.0022를 나타내며, 그 아래 심도에서는 깊어지면서 변형률이 감소하는 마찰말뚝의 하중전이가 거동을 보여준다.

재하 하중 186.8 ~ 233.6tonf 구간은 말뚝두부 아래 1.0m까지의 변형률계 값은 읽을 수가 없었으나, 그 아래 심도에서는 이상적인 하중전이 거동을 나타낸다. 하중강도-침하량 곡선에서 233.6tonf까지 거의 직선적으로 변화하는 것을 고려한다면 이 때의 변형률은 0.0025 ~ 0.003정도로 추정된다. 이 하중 범위에서는 지반에서 저항하는 하중분담이 점점 증가되며, 압축에 저항하는 소구경말뚝은 상대적으로 약한 지반으로 휘면서 저항하는 것으로 파악된다.

재하 하중 233.6tonf 이상 구간은 국부적으로 말뚝이 휘는 현상이 점점 크게 나타난다. 소구경말뚝이 분담하는 하중은 저항 가능한 최대하중에 도달된 것으로 판단되며, 증가된 하중은 지반이 모두 분담하며, 이 때 소구경말뚝은 침하량을 제어하는 역할을 할 것으로 판단된다.

4.2.2 소구경 말뚝의 하중분담

재하 하중에 대하여 소구경말뚝이 분담하는 하중을 다음과 같이 평가하였다.

$$P = \epsilon(E_s A_s + E_g A_g)$$

여기서, ϵ : 변형률, E_s : 보강재의 탄성계수, A_s : 보강재의 단면적, E_g : 그라우트재의 탄성계수, A_g : 그라우트재의 단면적

그림 10은 재하 하중단계마다 변형률계에 의해 평가된 소구경말뚝의 위치별 축력을 시험하중에 대한 백분율로 나타낸 것이다.

그림 (a)는 전체적으로 재하 하중이 증가함에 따라 말뚝의 하중분담율도 증가함을 나타낸다. 이것은 최대 재하하중 39.0tonf에 대해 보강재인 $\phi 32$ mm 철근 4본이 충분히 분담할 수 있으므로, 7.5m 위치만 제외하고는 하중분담율이 증가하고 있다. 최대 재하하중 39.0tonf이 작용할 때 평판 아래 0.3m 위치에서 최대 90% 이상 부담하며, 주변마찰력의 작용으로 하부로 갈수록 하중분담율이 낮게 작용하고 있다.

그림 (b)에서는 하중증가에 따라 하중분담율이 증가하지만, 상부위치인 0.3m 지점에서 60.0tonf부터 감소하기 시작하고, 점점 하부 위치에서도 하중분담율이 감소되어 그 영향이 2.5m 위치까지 미친다. 또한, 0.3m 위치에서 45.5tonf 재하시 소구경말뚝이 하중을 모두 분담하는 것으로 나타내었으나, 최종 149tonf에서는 약 34%까지 감소하였다. 보강재의 하중분담율이 낮아지면, 점점 지반이 하중을 분담하면서 지반의 침하량이 상대적으로 많이 발생된 것으로 판단된다. 특히, 지반의 조건이 나쁜 상태에서는 No.2지점 같은 거동 특성을 나타낼 것으로 판단된다.

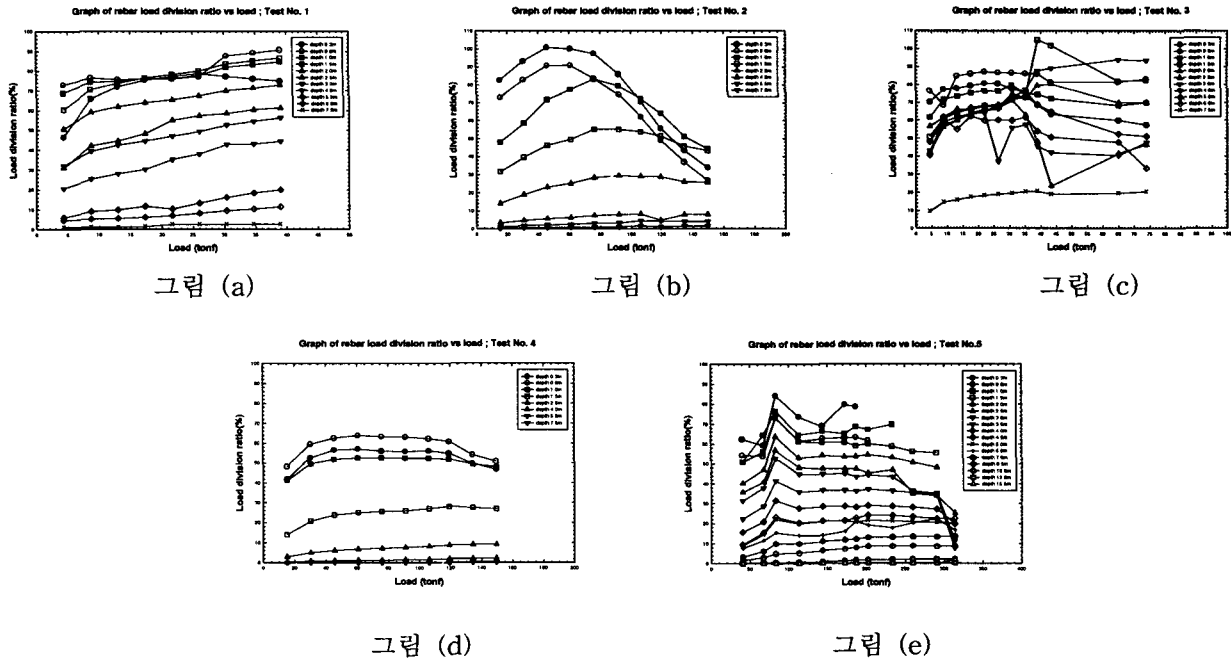


그림 10. 소구경말뚝의 하중단계별 하중분담 형상

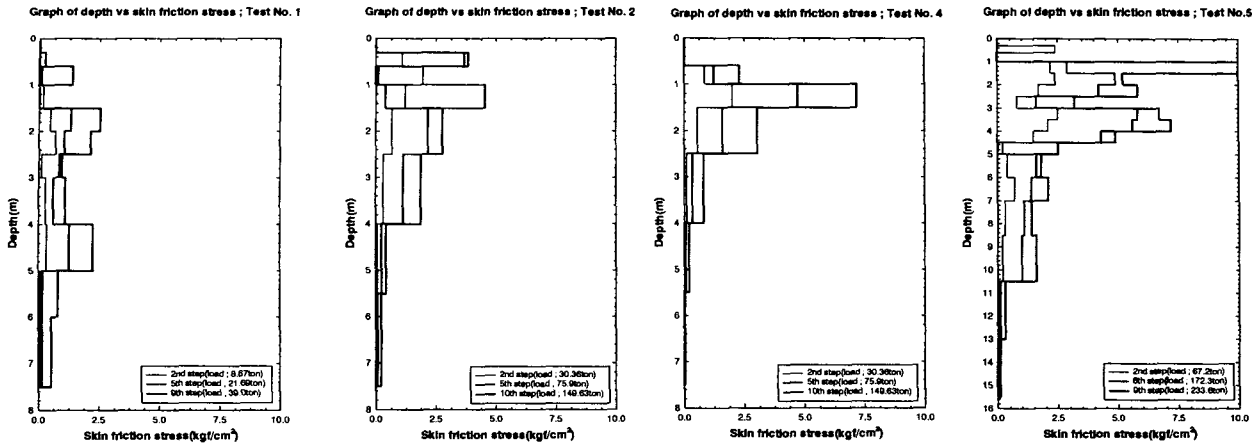
그림 (c)에서는 그라우트재의 유실로 인해 약 35.0tonf 하중 이후에는 매우 불규칙한 변화를 하고 있어서 시험조건이 같은 No.1의 그림 (a)와는 대조를 이루고 있다.

그림 (d)에서는 0.3m와 1.0m사이에서는 초기하중시 분담율의 증가를 나타내고, 거의 일정하게 유지된 후 약 120tonf부터 분담율이 약간 감소하고 있으나 같은 조건인 No.2의 (b)와는 많은 차이를 보이고 있다. 이 같은 차이는 원지반의 조건이 매우 양호하여 보강재의 최대 하중분담율도 최대 64%정도만 유지되고, 또한 말뚝 상부에서 대부분 분담되고 있는 반면 4.0m이하에서는 10%미만의 미미한 분담율만 나타내고 있다. 120tonf에서 하중분담율이 감소하는 것은 4본의 철근이 거의 항복하중에 근접한 하중작용에 의해 발생된 것으로 판단된다.

그림 (e)에서는 전반적으로 재하 하중 83.0tonf까지 분담율이 증가한 후 말뚝의 상부위치에서부터 서서히 감소하는 양상을 나타내었다. 최대분담율이 85%이하인 것은 소구경말뚝의 단면적(0.0314m²)이 평판단면적(1.76625m²) 보다 상대적으로 작아서, 비록 지반이 약한 상태이지만, 지반이 하중을 부담하는 면적이 넓었기 때문이다. 7.0m이하에서는 최대 시험하중인 314.0tonf까지 미세하게 하중분담율이 증가하고 있어서 하중증가에 따라 말뚝의 하중전이가 하부로 진행되고 있음을 나타낸다.

4.2.3 주변마찰응력 평가

그림 11은 소구경말뚝의 주변마찰응력을 나타낸 것으로 시험말뚝 모두 재하하중에 대하여 주변마찰로 저항하며, 선단저항력은 동원되지 않은 상태를 나타내고 있다. 주변마찰응력이 분포하는 말뚝의 길이는 상부로부터 50% ~ 60% 깊이까지이며, 그 하부에는 아주 미세하게 작용하고 있다. 평가된 주변마찰응력이 극한상태는 아니지만, 길이 8.0m 소구경말뚝에서는 2kgf/cm² ~ 7kgf/cm²의 마찰응력을 나타내었고, 말뚝길이가 긴 No.5에서는 최대 10kgf/cm²의 마찰응력이 평가되었다. 재하하중에 대해 실제 분담한 하중을 주변마찰력으로 보면, 시험말뚝 No.2에서는 최대 80.0tonf정도 평가되지만, 표준관입시험 결과를 이용한 Mayerhof의 경험식으로 산정하면, 최대주변마찰력은 37.6tonf에 불과하여 2배 이상 차이가 난다.



(a) 시험말뚝 No.1

(b) 시험말뚝 No.2

(c) 시험말뚝 No.4

(d) 시험말뚝 No.5

그림 11 주면마찰응력도

5. 결론

본 연구에서는 풍화암 지반에서 지반 보강용으로 설치된 소구경말뚝의 보강효과를 평가하고 말뚝의 하중전이 및 주면마찰력등을 분석하기 위해 평판을 이용한 압축재하시험을 실시하였다. 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 재하시험의 하중-침하량 곡선에서 소구경말뚝으로 보강된 지반은 침하량과 하중제하시 소성변형량이 원지반에 비해 상대적으로 줄어들어 소구경말뚝은 지반의 침하를 억제시키는 효과를 나타내었고, 또한 보강재의 탄성적인 거동 영향에 의해 지반의 소성변형량이 많이 줄어든 것으로 평가된다.

2) 상대적으로 연약한 풍화토 ~ 풍화암 지반에서 소구경말뚝이 분담하는 하중은 작용하중의 최대 100%까지 나타낸 반면, 견고한 풍화암 지반에서는 분담율이 64%에 그쳐 상대적으로 연약한 지반일수록 소구경말뚝의 활용도가 높다는 것을 알 수 있다.

3) 변형률계에 의해 평가된 소구경말뚝과 시험평판의 침하는 일정 하중까지 발생 경향이 매우 유사하게 나타났으나, 그 후의 하중증가에 따라 소구경말뚝의 침하량은 변화없이 일정한 반면, 평판의 침하는 급격히 늘어났다. 즉, 대부분의 재하하중을 소구경말뚝이 분담한 후 대략 보강재가 항복하중에 도달하면 지반의 하중분담이 증가함과 동시에 침하량이 급속하게 증가되는 경향을 나타내었다.

4) 지반이 완전히 파괴되는 극한하중까지 시험을 할 수는 없었으므로 주면마찰응력을 극한하중상태에서 평가하지는 못하였다. 시험결과, 최대 10kgf/cm²의 마찰응력이 얻어졌고, 마찰응력은 대부분 말뚝상부로부터 50~60% 길이 이내에서 발생되었다.

5) 소구경말뚝의 주면마찰력 평가 방법은 대부분 대구경 현장타설말뚝에서 평가된 경험식 등에 의해 평가되고 있으나, 평가방법에 따라 많은 차이를 나타낼 수 있다. 따라서 소구경말뚝에 적합한 주면마찰력 산정법에 대해서는 보다 많은 실험 등으로 연구되어야 한다.

* 참고문헌+

- 1) 박성재, 박병호, 장학성, 정경환, 이세훈(1998), “원위치 직접전단 시험에 의한 현수교 기초지반의 전단강도정수(C, ϕ)평가”, 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp.93-96
- 2) S.Z.Park, G.H.Jeong. et al.(1999,6), “Deep foundation for offshore structure-the Kwang-An Grand Bridge, Proc. of the 9th(1999) International Offshore and Polar Engineering Conference(Brest)”, Vol.1, pp.639-645
- 3) Bruce, D.A and Juran, I.(1997), “Drilled and Grouted Micropiles : State of practice Review”, FHWA-RD-96, Volume I., II.