

암반에 근입된 SIP 말뚝의 지지력 특성에 관한 연구

A Study on the Characteristics of Bearing Capacity for SIP Piles constructed on Rock Mass

김태훈* 박준홍** 이 송***
Kim Tae-Hwoon Park Jun-Hong Lee song

ABSTRACT

In this research problems of recent design methods and their improvement for SIP in domestic areas were studied by using the characteristics of load-settlement curves and bearing capacity from field loading tests. Elastic and plastic settlement for total settlement in each loading step conducted domestic areas had a tendency. From these tendency and bearing capacity determined by loading tests we can ascertain that empirical chart can be assistant tool in SIP design.

It shows that SIP design using N-value in domestic area with soil condition of granite type results in very conservative bearing capacity, to be opposed in soil with unprofitable geological condition the design can be insecure.

Also, we can ascertain that Meyerhof's bearing capacity used modified N-value on tip part of pile is more applicable than recent design method where tip bearing capacity is $20N_{ap}$ N-value limited to 50. These results show that modified design method can be more economic than before because of using pile's bearing capacity to tolerable load of pile material.

1. 서 론

오늘날 사회 및 경제적으로 삶의 질을 추구하는 경향은 여러 토목 및 건축공사에서 환경 친화적인 공법을 개발하는 원동력이 되고 있다. 이러한 추세로 인구밀집지역에서 시공되는 말뚝기초의 경우 건설공해-소음, 진동 등-를 피하기 위해 항타공법보다는 지반굴착 후 기성말뚝을 매입하는 SIP 공법을 적용하고 있다. SIP 공법은 일본에서 처음 개발된 이후 국내 말뚝공사의 30% 이상을 차지하고 있으며, 공사량의 계속적인 증가가 예상되고 있다.

본 논문에서는 국내 여러 지역에서 SIP 공법으로 시공된 말뚝, 113개의 재하시험결과를 이용하여 현재 설계에서 많이 이용되고 있는 Meyerhof 식의 적용성을 평가하고 지질학적으로 지층이 화강암류인 지반에 시공된 SIP 말뚝의 하중-변위 특성을 파악하여 지반 지지력에 따른 하중-침하량 곡선을 결정하였다. 또한, 재하시험결과로부터 말뚝의 지지력뿐만 아니라 허용변위가 만족되는 하중을 결정하여 국내에서 시공되는 SIP 설계법의 문제점을 도출하고 그 개선방안을 제안하고자 한다.

2. 국내 지반 및 시공 조건

국내의 대표적인 지반조건은 매립토, 충적 및 붕적토, 풍화토, 풍화암, 연암 순으로 지층이 형성되어 있고, 각 층마다 다양한 층두께를 갖고 있지만, 유사한 지층분포를 갖고 있으므로 본 논문에서는 선단지지력은 말뚝 선단부 지반의 N값을 이용하여 선단지지력을 결정하였고 말뚝의 주면마찰력은 말뚝주면 지반을 두 개의 층으로 구분하여 결정하였다.

시공 조건면에서 일본에서의 SIP 공법은 매입말뚝의 일종으로 설계심도보다 3d 깊게 천공한 후 강도가 서로 다른 주면 및 선단고정용 페이스트를 투입후 경타하는 방법으로 시공하고 있다.

* 서울시립대학교 토목공학과 박사과정, 학생회원

** 대한주택공사 송신사업단 토목과장

*** 서울시립대학교 토목공학과 교수, 정회원

하지만, 국내의 경우 대부분은 굴착후 선단고정과 슬라임 제거를 위해 시멘트 페이스트를 주입하여 굴착하부에 남아 있는 슬라임과 교반 혼합한 후 기성말뚝을 삽입하고 경타한다. 그 후 주변에 시멘트 페이스트를 주입하는 방식으로 시공하고 있다. 따라서, 다른 시공조건을 갖고 있으므로 국내에 적합한 설계식이 정립되어야 할 것으로 판단한다.

본 논문에서 SIP 시공시 기성말뚝의 제원은 PHC를 주로 사용하였으며, 부분적으로 PC 말뚝을 사용하였다. 이 때 PHC말뚝의 직경은 일반적으로 350, 400mm이며, PC말뚝의 경우 400mm이다. 또한, 이들 말뚝의 허용재료하중 각각은 88ton, 109ton, 및 66ton이다.

3. 말뚝재하시험결과

말뚝재하시험은 서울 도봉, 의정부, 신갈, 원주, 광주, 진안, 아산, 전주, 안동 지역으로 국내 여러 지역에서 실시되었다. 그림 1과 같이 전주지역을 제외한 다른 지역의 경우 지지층이 화강암 계열의 지반이므로 좋은 지반 조건을 갖는 반면, 전주지역은 지질조건이 옥천층군으로 다른 지역에 비해 낮은 지반강도를 갖는 것으로 보인다. 즉, 옥천층군의 지층은 변성정도가 낮은 사암·점판암을 비롯해 석회암·규암·운모편암 등을 포함하고 있어 재하시험결과시 다른 지역에 비해 침하량이 크게 발생한 것을 볼 수 있다.

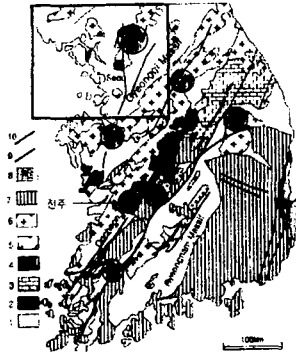


그림 1. 말뚝재하시험 지역의 지질도

1. 선폰브리아 지지층
2. 옥천층군
3. 고생대 퇴적층
4. 쥐라기 대동층군
5. 중생대 열리상 화강암
6. 쥐라기 화강암
7. 백악기 퇴적암 및 화산암
8. 제3기 퇴적암 및 화산암
9. 단층
10. 연성전단대

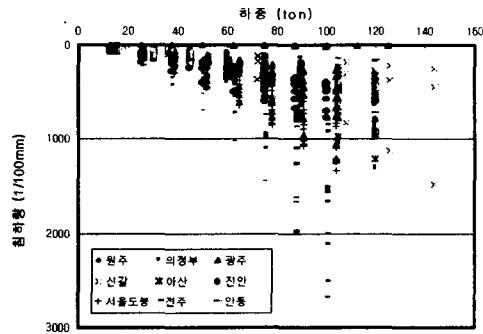


그림 2. 말뚝재하시험 결과

국내 말뚝재하시험은 대부분이 설계하중의 2배까지 하중을 가하여 기시공된 말뚝의 지지력을 검증하기 위해 실시된다. 이러한 각 지역별 말뚝재하시험 결과는 그림 2와 같이 같은 지역이라도 위치별로 다른 하중-침하량 곡선을 나타내고 있으며, 특히 지지층이 지질학적인 조건이 다른 경우 매우 다른 경향을 보이고 있었다. 이것은 말뚝 선단지역에 위치한 암반의 강도특성이 말뚝재하시험 결과에 지배적인 영향을 미칠 것으로 판단할 수 있다. 즉, 그림 2의 전주 지역에서 지지층의 N 값이 50 이상이지만 다른 지역에 비해 말뚝의 침하량이 크게 발생하는 것이 앞에서 지역별 지질도를 살펴본 결과와 부합하는 것으로 말뚝 선단지반의 강도 특성이 연약하기 때문이라고 판단할 수 있다.

4. 말뚝재하시험의 하중-침하량 특성

4.1 재하시험시 탄성 및 소성 침하량의 상호 관계 분석

국내 여러 지역에서 SIP 설계하중의 2배까지 재하한 후 전체침하량을 탄성 및 소성침하량과의 관계가 지역별로 서로 다른 지반조건에서 경향성을 갖는 가를 살펴보았다. 그림 3에서 보듯 각 지역별로 전체 침하량에 대한 탄성 및 소성 침하량 곡선은 일정 범위 내에서 모여 있지만, 이것들을 종합

적으로 살펴보면 일정한 경향을 갖는 탄성침하량 곡선과 소성침하량 곡선을 나타냄을 볼 수 있다. 여기서, 전주지역의 다른 지역에 비해 전체침하량이 매우 크게 발생됨을 볼 수 있다.

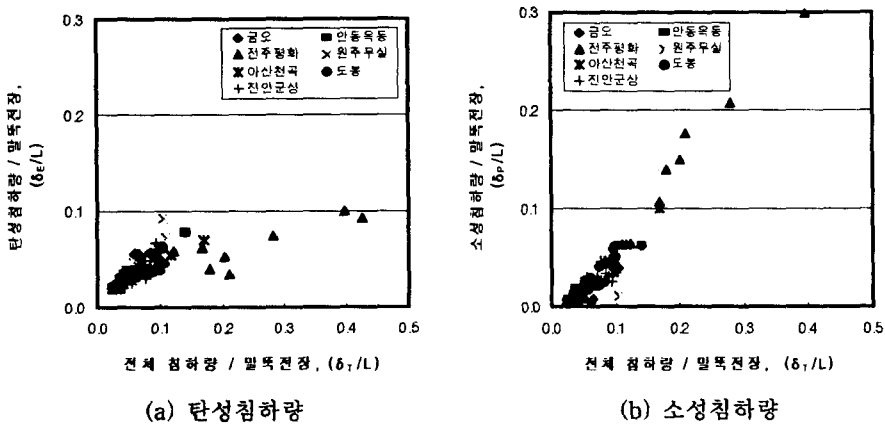


그림 3. 지역별 전체 침하량에 대한 탄성 및 소성침하량 곡선 분포

4.2 단계별 하중에 대한 탄·소성 침하량의 관계

하중조건을 50ton, 70ton, 100ton, 120ton으로 세분화하여 그림 3을 재분석한 결과 그림 4와 같았다. 여기서, 각각의 하중조건에서 전체침하량에 대한 탄성 및 소성침하량조건은 일정한 관계를 갖는 곡선을 보여주고 있었다. 즉, 하중이 증가할수록 탄성침하량은 그림 4(a)에서와 같이 곡선의 기울기가 증가됨을 볼 수 있다. 반면, 이에 대응하는 그림 4(b)에서의 소성침하량은 하중이 증가할수록 곡선의 기울기가 작아져 같은 하중조건에서 탄성침하량과 소성침하량이 같은 지점은 하중이 증가할수록 계속 증가하게 된다. 또한, 그림 4(a)에서 탄성침하량은 임의 하중조건에서 전체침하량이 증가하면 초기에는 증가하다 각 하중의 경제치에서 수렴하게 된다.

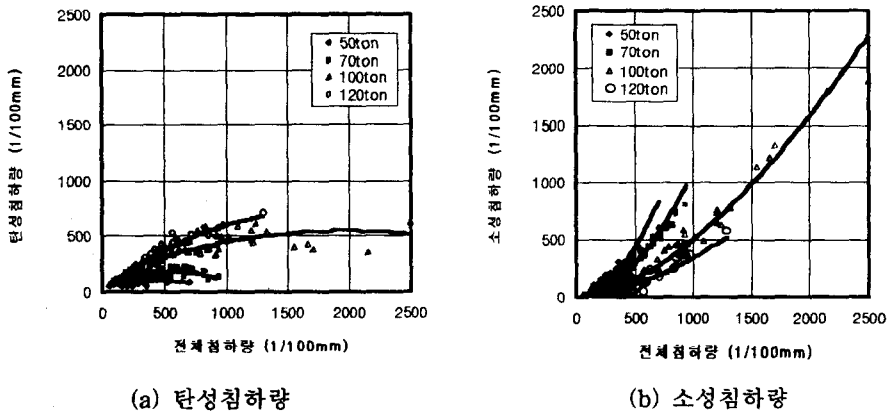


그림 4. 단계별 하중에서 전체침하량에 대한 탄성 및 소성침하량

그림 4의 단계 하중별 전체침하량에 대한 탄성 및 소성침하량을 하나의 차트로 나타낸 것이 그림 5이다. 여기서, 지반의 지지력은 재하시험결과로 결정하였다. 지반의 지지력이 좋을수록 그래프는 하단부로 이동하게 되며, 탄성침하량을 따라 임의 하중단계의 소성침하량 곡선과 교차하는 지점이 그 지반의 임의 하중단계에서 전체침하량, 소성침하량이라 판단할 수 있다. 즉, 이것은 각각의 하중단계에 대응하는 침하곡선으로 임의 지지력을 갖는 지반에서 침하량 특성을 경험적으로

예측할 수 있으리라 판단된다. 따라서, 기성말뚝의 하중-침하량 곡선은 지반조건별(지반강도특성)로 일정한 관계를 갖는 탄성 및 소성침하량 곡선을 나타내며, 역으로 이러한 침하량곡선으로 지반의 강도 특성을 추정할 수 있을 것으로 판단한다.

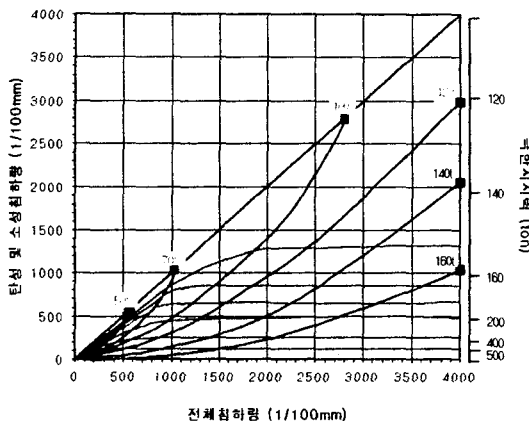


그림 5. 재하시험으로 결정한 극한지지력과 침하특성

5. 지지력 분석

본 논문에서는 말뚝의 극한하중을 결정하여 기존 Meyerhof의 설계지지력식을 수정·보완하고자 한다. 여기서, 극한하중을 결정하기 위해 재하시 말뚝재료의 변형 및 파괴가 발생하지 않는다는 가정하에 재하시험의 하중-변위곡선을 회귀분석하여 말뚝 직경 0.1d의 침하량에 대응하는 하중을 지반의 극한하중으로 고려하였다.

국내 SIP 말뚝의 설계방식은 정형화되어 있지 않으며, 말뚝 직경이 결정되면 지지력이 결정되는 보수적인 방안과 식 3과 같은 Meyerhof 방법 등을 이용하고 있다.

$$q_{ult} = 30N_p' A_p + (0.2\overline{N_{av}}' L_s + 0.5\overline{q_{av}}' L_c) L_d \quad (3)$$

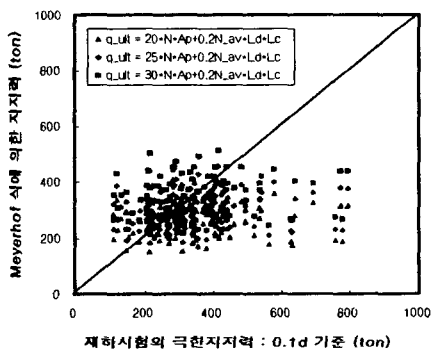
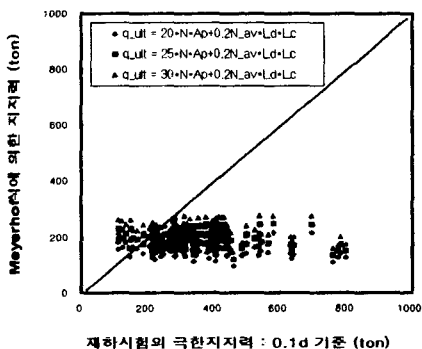


그림 6. 기존 설계방식에 대한 지지력 비교 그림 7. 수정 N값을 이용하여 결정한 지지력 비교

일본의 경우 선단부 시공방법에 따라서 선단지지력 계산식이 $20\sim 30N_p$ 를 사용하고 있다. 국내와 일본의 경우 같은 최종경타공법을 적용하더라도 시공방법에 차이가 있어 정확한 비교가 될 수 없지만, 그림 6에서와 같이 N값을 50으로 제한한 Meyerhof 식으로 선단지지력이 $20\sim 30N_p$ 의 범위를 갖을 때를 재하시험에서 결정한 극한지지력과 비교한 결과 재하시험결과의 극한지지력이 선단지지력을 $30N_p$ 으로 계산한 지지력보다 대부분 크게 초과하여 발생하므로 국내에서 사용되고

있는 $20NA_p$ 선단지지력식 매우 보수적임을 판단할 수 있다. 이중 선단지지력 부분을 $30NA_p$ 로 설정한 것이 말뚝재료의 허용하중까지 이용할 수 있도록 하는 보다 경제적인 설계법인 것으로 판단된다. 하지만, 그림 2의 재하시험결과와 마찬가지로 표준관입시험 시험 N값의 한계를 45~50으로 제한한 선단지지력 결정 방법은 지지층이 화강암류의 지질조건을 갖는 매우 우수한 지반조건일 경우에 일률적인 N값 45~50의 적용으로 대단히 보수적인 결과를 보여주고 있다. 다른 반면, 지지층 조건이 나쁠 경우 불안정한 설계법이 될 수 있다. 따라서, 보다 합리적인 설계를 위해서는 기존의 경험식 $20NA_p$ 보다 다른 방안이 강구되어야 할 것으로 판단된다.

5.1 지지층의 수정 N값을 이용한 지지력 결정 방법

SIP 말뚝의 선단지반의 N값을 50까지만 제한하는 방법은 표준관입시험시 관입량 30cm에서 50타나 관입량 3cm에서의 50타나 구분되지 않고 같은 적용을 하게 된다. 따라서, N값이 50이상일 경우 관입량에 따른 수정 N값을 식 4에 제시하였다. 여기서, 수정 N의 경계값을 100으로 설정하였다.

$$N = 50 \times \frac{30\text{cm}}{N=50\text{일때의 관입량(cm)}} , N = 50 + \frac{(N-50)}{5} \quad (4)$$

여기서, 제한값 100과 식 4는 선단지지력 $20NA_p$ 와 마찰력을 고려한 설계 극한지지력과 재하시험결과로 결정한 극한지지력을 비교하여 설계식이 재하시험결과보다 안정적인 결과가 나오도록 하는 경계값이다.

또한, 지지층이 화강암류인 지역의 수정 N값을 말뚝선단에서 영향범위 2d로 가정하여 평균 산정하였다. 말뚝선단에서 2d까지 N값을 결정한 것은 하중이 전달되는 과정을 직경 d, 이고 높이 2d인 구속압을 받는 원형의 공시체를 가정하여 이 공시체에 축하중이 가해지는 조건으로 가정하였기 때문이다. 이 때 공시체의 강도는 N값이 대표한다고 볼 수 있다. 수정 N값을 결정하여 이 값을 Meyerhof 경험식에 대입하여 지지력을 결정한 것이 그림 7이다. 이러한 결과를 검토해 볼 때 말뚝선단의 N값을 수정하여 Meyerhof 경험식에서 선단지지력, $20NA_p$ 와 주변마찰력을 고려해 준 결과를 이용한 것이 재하시험에서 얻은 말뚝의 지지력을 경제적으로 활용할 수 있는 방안이라 판단된다.

그림 8에서는 재하시험으로 결정한 극한지지력에 대해서 말뚝선단지반의 N값을 수정하지 않은 방법과 수정한 방법의 지지력비를 비교하였다. 이 때 선단지반 지지력식 $20NA_p$ 을 이용하였다.

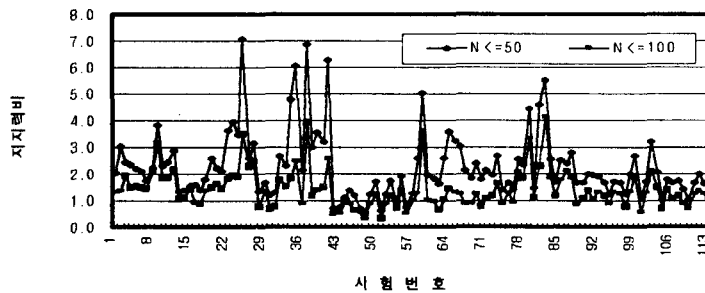


그림 8. 기존 지지력법과 수정지지력의 비교

먼저, 선단지반의 N값을 수정하지 않고 Meyerhof 식을 적용한 결과는 평균 2.3배의 지지력비가 산정되었다. 이것은 주택공사의 연구결과에서 설계값이 재료 허용하중의 57%, 55%, 76%에 해당하는 것으로 말뚝 재료허용하중을 충분히 활용하지 못한 결과이다. 하지만, 후자에서 N값을 100으로 제한하고 말뚝 선단지반의 N값을 수정하여 Meyerhof 식을 적용한 결과 지지력비가 평균 1.4배

를 보이고 있다. 즉, 이것은 화강암류 지지층에 시공된 SIP 말뚝의 지지력을 말뚝재료의 허용하중까지 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 논문에서는 국내 각 지역의 SIP 말뚝의 재하시험으로부터 먼저, 하중-침하량 곡선의 특징을 살펴보고 더하여 재하시험결과로부터 산출한 지지력을 이용하여 현재 국내 SIP 말뚝 설계시 문제점과 개선방향을 고찰하였다.

1) 국내 여러 지역에서 실시한 재하시험결과 각각의 하중단계에서 전체침하량에 대한 탄성 및 소성침하량은 한 지역에서 실시된 재하시험의 침하량 특성과 유사한 관계를 보여주고 있었다. 즉, 하중이 증가할수록 탄성침하량은 곡선의 기울기가 증가되고 이에 대응하는 소성침하량은 하중이 증가할수록 곡선의 기울기가 작아져 같은 하중조건에서 탄성침하량과 소성침하량이 같은 지점은 하중이 증가할수록 계속 증가하는 특징을 갖는다.

2) 지반조건별로 일정한 관계를 갖는 탄성 및 소성침하량 곡선과 재하시험으로부터 결정된 지지력을 이용하여 국내 지반 및 시공조건에 부합하는 경험적인 지반의 강도 및 침하량 특성을 그림 5를 이용하여 추정할 수 있을 것으로 판단한다.

3) 국내 화강암류의 지질조건을 갖는 지역에서 N값을 이용한 SIP 공법의 설계는 재하시험결과 매우 보수적인 결과를 보였으며, 지지층의 지질조건이 불리한 경우 N값을 이용한 SIP 공법은 불안정한 결과를 보여주므로 선단지지력 결정시 지지층의 암반강도를 추정하여 설계하는 것이 보다 말뚝의 경제성과 안정성을 향상시킬 것으로 판단한다.

4) 재하시험결과와 기존 설계방식을 비교한 결과 선단지반의 N값을 수정하지 않고 Meyerhof 식을 적용했을 경우는 평균 2.3배의 지지력비가 산정되었다. 이것은 설계값이 재료 허용하중의 50~75%에 해당하는 것으로 말뚝 재료허용하중을 충분히 활용하지 못한 결과이다. 하지만, N값을 100으로 제한하고 말뚝 선단지반의 N값을 수정하여 Meyerhof 식을 적용했을 경우는 지지력비가 평균 1.4배를 보이고 있다. 즉, 국내와 같이 화강암류 지지층에 시공된 SIP 말뚝의 지지력을 말뚝재료의 허용하중까지 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

마지막으로 본 연구에서 재하시험결과는 설계지지력의 2배까지 하중을 재하한 결과 SIP 말뚝의 거동을 판단하는데 어느 정도 한계를 보여주고 있었다. 따라서, 보다 정확한 거동 예측 및 설계 패턴을 결정하기 위해서는 말뚝재료 허용하중 2배까지 재하시험이 이루어져야 한다고 사료된다. 즉, 이러한 자료들이 더욱 축적되었을 때 국내의 설계형태를 보다 정확하게 결정할 수 있을 것으로 판단한다.

참 고 문 헌

1. 이송의 2명(2000), “동재하 및 정재하시험에 의한 말뚝의 지지력 비교 분석”, 대한토목학회 학술발표, pp 207~210.
2. 조성환(1997), “풍화암에 근입된 현장타설말뚝의 하중전이에 관한 연구”, 연세대학교 박사학위논문.
3. 임해식의 5명, “SIP 공법의 품질개선방안과 지지력산정법 제안에 관한 연구”, 대한주택공사 주택연구소, 2001.9.
4. 채수근, “새로운 매입말뚝 공법의 지지력 특성”, 한국지반공학회 1997, vol.13, No.4, pp25~35.
5. American Society for Testing and Materials ASTM D1143-81(1989), “Standard Method of Testing Piles under Static Axial Compressive Load”, Vol.04.08, Philadelphia, pp179~189.
6. Canadian Geotechnical Society(1992), Foundation Engineering Manual (3rd.ed.).
7. Duncan C. Whillie(1992), Foundation on Rock, pp205~237.
8. GEO(1996), Pile Design and Construction, Hong Kong Geotechnical Engineering Office.