

Homework #13

Summary report of dynamic pile formulas other than ENF

Dynamic pile Formulas

1. 동역학적 공식에 의한 말뚝기초의 지지력 산정방법

구조물의 상재하중을 얇은 기초로써 충분히 지지할 수 없는 말뚝기초가 사용된다. 말뚝기초의 지지력을 산정하는 데에는 동역학적 공식과 정역학적 공식에 의한 이론적인 산정방법과 말뚝재하시험과 같이 실측에 의한 산정방법이 있다.

이 중에서 동역학적 공식에 의한 방법은 공사 현장에서의 말뚝항타시 얻어지는 자료에 의하여 손쉽게 구할 수 있다. 그러나 동역학적 공식은 경험적인 계수값들의 부정확성과 항타 기록의 측정오차 등에 의하여 정확성이 문제시된다.

이에 반하여 말뚝재하시험에 의한 지지력의 측정방법은 공사현장에서 말뚝에 실제로 하중을 가하여 그 결과에 따른 하중-침하량 곡선에 의하여 지지력을 산정하기 때문에 정확한 값을 얻을 수가 있다. 그러나 말뚝재하시험은 소요경비 때문에 모든 말뚝에 대하여 시험을 할 수가 없다. 따라서 동역학적 공식은 정확성의 문제가 해결된다면 현장의 지지력을 산정하는 좋은 방법으로 이용될 수 있다.¹⁾

2. 동역학적 공식

여기에 나타나 있는 식들은 안전율을 포함하지 않은 것들이다. 따라서 허용지지력은 각 식에서 제안하는 안전율로 나누어서 구한다.

① Hiley (SF = 3.0)

$$Q_u = \frac{e_h E_h}{S + \frac{1}{2}(C_1 + C_2 + C_3)} \times \frac{W + n^2 W_p}{W + W_p}$$

② Engineering News (SF = 6.0)

$$Q_u = \frac{e_h E_h}{S + e}$$

③ Pacific Coast Uniform Building Code (SF = 4.0)

$$Q_u = \frac{e_h E_h C_1}{S + C_2}, \text{ where } C = \frac{W + k W_p}{W + W_p}, C_2 = \frac{Q_u L}{AB}$$

$$k = 0.25 \text{ for steel pile} \\ = 0.10 \text{ for all other piles}$$

④ Danish (SF = 3.0)

$$Q_u = \frac{e_h E_h}{S + \sqrt{\frac{e_h E_h L}{2AB}}}$$

1) 정충기, 「말뚝의 동역학적 공식에 대한 신뢰성 분석」, 서울대학교, 1985

⑤ Gates (S.F = 3.0)

$$Q_u = 40 \sqrt{e_h E_h} \log \frac{25}{s} \text{ in centimeters and tons}$$

⑥ Janbu (S.F = 3.0)

$$Q_u = \frac{e_h E_h}{k_u s}, \text{ Where } Cd = 0.75 + 0.15 \frac{W_p}{W}$$

⑦ Canadian National Building Code

$$Q_u = \frac{e_h E_h C_1}{S + C_2 C_3}$$

$$C_1 = \frac{W + n^2 (0.5 W_p)}{W + W_p}, C_2 = \frac{R_u}{24}, C_3 = \frac{L}{E_p} + 0.0001$$

$$E_h = WH$$

⑧ Eytelwein formula

$$Q_u = \frac{e_h E_h}{S + 0.1 (W_p / W)}$$

⑨ Navy-McKay formula

$$Q_u = \frac{e_h E_h}{S(1 + 0.3 C_1)}$$

$$C_1 = \frac{W_p}{W}$$

3. 기본적인 유도과정과 이론적 가정

현재 가장 널리 사용되는 6개의 동역학적 공식들의 기본적인 유도과정과 이론적 가정은 다음에 설명하는 바와 같다.

말뚝에 타격을 가할 때 매 타격시 해머의 에너지는

$$E_0 = WH \quad (W : \text{해머의 무게}, H : \text{해머의 낙하고})$$

와 같이 나타난다.

말뚝에 전달되는 실제 에너지는 안내벽(lead)과 공기의 저항등으로 인한 손실(e_k)과 충격에 의한 손실(e_s)을 고려하여 다음과 같이 나타낸다.

$$E_s = W e_k e_s H \quad - \text{①}$$

이 때에 e_s 는 충격 전과 충격 후의 에너지의 비로써 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e_s = \frac{\frac{W}{g} u^2 + \frac{W_p}{g} u_p^2}{\frac{W}{g} v^2 + \frac{W_p}{g} v_p^2} \quad - \text{②}$$

W_p : 말뚝의 무게
 v : 충격 전 해머의 속도
 v_p : 충격 전 말뚝의 속도
 u : 충격 후 해머의 속도
 u_p : 충격 후 말뚝의 속도

충격이 가해졌을 때 해머와 말뚝의 운동량의 변화량은 같아야 하므로

$$\frac{W}{g}(v-u) = \frac{W_p}{g}(v_p-u_p) \quad \text{--- ③}$$

와 같이 된다.

또한 Newton 은 충격전후의 상대속도의 비율(회복계수 $n = \frac{u_p - u}{v - v_p}$)은 일정하며 그 크기는

두 물체의 재질에 의하여 결정된다고 하였다.

충격전 말뚝의 속도는 0 이므로 공식 ③과 회복계수 n 값을 이용하면 공식 ②는

$$e_i = \frac{W + n^2 W_p}{W + W_p} \quad \text{--- ④}$$

로 나타나며, 따라서 공식 ①은

$$E_h = e_h WH \frac{W + n^2 W_p}{W + W_p} \quad \text{--- ⑤}$$

와 같이 된다.

충격에 의해 발생하는 말뚝의 일의 양은

$$B \approx Q_u (S + \Delta S_{sp} + \frac{1}{2} \Delta S_{cp}) \quad \text{--- ⑥}$$

Q_u : 극한지지력
 S : 최종항타시 말뚝의 관입량
 ΔS_{sp} : 말뚝의 소성변형량
 ΔS_{cp} : 말뚝의 탄성변형량

공식 ⑥에서

$$\Delta S_{cp} = \frac{Q_u L}{AE} \quad \text{--- ⑦}$$

L : 말뚝의 길이
 A : 말뚝의 단면적
 E : 말뚝의 탄성계수

와 같이 나타나게 된다. 이 때 말뚝의 주변 마찰 저항에 의한 효과와 캡과 흙의 탄성변형량도 ⑦식에 포함되어야 한다. 마찰 저항에 의한 효과

$$\Delta S_{cp} = C \frac{Q_u L}{AE} \quad \text{--- ⑦'}$$

⑤, ⑥, ⑦'식을 이용하여 최종적으로 다음과 같은 일반적인 말뚝의 동역학적 공식을 얻을 수 있다.

$$Q_u + \frac{E}{S + \frac{1}{2}\Delta S_{cp} + \Delta S_{mp}} = \frac{ehWH}{S + \frac{CQ_u L}{2AB} + \Delta S_{mp}} \times \frac{W + n^2 W_p}{W + W_p} \quad \text{--- ㉔}$$

또는

$$Q_u = \frac{(S + \Delta S_{mp})AB}{L} \left[\sqrt{1 + \frac{2Cle_k wH}{(S + \Delta S_{mp})^2} \times \frac{w + n^2 W_p}{AB + W_p}} - 1 \right] \quad \text{--- ㉕}$$

실제로 사용되는 동역학적 공식들은 위에서 얻은 공식과 이론을 근거로 하여 결정된다. 이 중에서 Hiley 공식은 공식㉔에서 말뚝의 소성변형량은 무시하고 탄성변형량은 말뚝, 캡, 흙의 탄성변형량 (C_1, C_2, C_3)의 합으로 나타내어 구하였고, Engineering News 공식은 Hiley의 공식에서 e_s 와 e_k 의 값을 1로 가정하고 $C_1 + C_2 + C_3$ 의 값을 해머의 종류에 일정하게 부여하여 결정하였다. PCUBC 공식은 Hiley의 공식을 이용하여 에너지 손실의 원인을 약간 변화시킴으로써 얻어진다. Janbu의 공식은 정확하게 유추되지 않는 변수들은 C_d (driving coefficient)값으로 나타내도록 하였다. C_d 값은 해머의 효율, 정적상태의 말뚝 지지력과 동적상태의 말뚝 지지력 사이의 차이 및 길이에 따라 흙에 전달되는 말뚝 하중의 비율과 관계되는데, Janbu는 C_d 값을 W_p/W 값과 상관지어서 통계적으로 결정하였다. Danish 공식은 재하시험의 결과를 이용하여 차원적인 분석을 통해 복잡한 공식들을 간편화 시켜서 결정되었으며, Gates 공식은 기존의 공식들을 일단 중요한 변수만의 함수로 간편화 시키고 그 다음에 통계적 방법을 통하여 결정하였다. 2)

4. 분석 결과

동역학적 공식을 통계적인 방법을 통하여 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 기존의 동역학적 공식에 의한 허용지지력은 측정허용지지력과 비교하여 보수적인 값으로 나타난다.

(2) Engineering News 공식은 신뢰성이 없다. ($r=0.394$)

(3) 실제의 허용지지력이 100톤이상으로 산정되는 말뚝에서 동역학적 공식의 신뢰성은 매우 떨어진다.

(4) 기존의 공식들을 통계적인 방법을 통하여 측정된 허용지지력과 같은 값을 얻도록 수정한 결과 가장 신뢰성이 높은 Gates 공식은

$$Q_u' = 5.04 \sqrt{e_k WH} \log\left(\frac{25}{S}\right) - 38 \quad (r=0.919)$$

와 같이 수정 되었다. 3)

2) 정충기, 『말뚝의 동역학적 공식에 대한 신뢰성 분석』, 서울대학교, 1985

3) 정충기, 『말뚝의 동역학적 공식에 대한 신뢰성 분석』, 서울대학교, 1985

5. 참고자료

해머의 종류		e
드롭해머	방아쇠 시동장치	1.00
	드럼 원치	0.75
단동해머	McKiernan-Terry	0.85
	Warrington-Vulcan	0.75
복동해머	McKiernan-Terry	0.85
	National	0.85
	Union	0.85
착동해머		0.75
디젤해머		1.00

해머의 기계효율 e (Chellis, 1961)

말뚝의 종류	두부 조건	단동, 그룹, 또는 디젤해머	복동해머
콘크리트	말뚝머리를 패킹하고 플라스틱 돌리 또는 greenheart 돌리를 씌운 헬멧	0.4	0.5
	말뚝머리를 패킹한 목재돌리의 헬멧	0.25	0.4
	패드만 말뚝 머리 위에 놓인 해머		0.5
강	컴포지트 플라스틱 또는 greenheart 돌리를 가진 캡	0.5	0.5
	목재돌리를 가진 캡	0.3	0.3
	말뚝머리에 직접 타격		0.5
나무	말뚝머리에 직접 타격	0.25	0.4

반발계수 n의 값 (Simons and Menzies, 1977)

6. 참고문헌

- 정충기, 말뚝의 동역학적 공식에 대한 신뢰성 분석, 서울대학교, 1985
 한국 지반공학회, 깊은기초, 구미서관, 1997
 김상규, 토질역학의 기본원리, 동명사, 2000