

베인 전단면의 전단응력분포를 고려한 전단강도의 평가

Evaluation of Undrained Shear Strength with the Consideration of Shear Stress Distribution around the Vane

이 우 진, 고려대학교 토목환경공학과 조교수

Lee Woo-Jin, Assist. Prof., Depart. of Civil & Environ. Engrg., Korea University

1. 현장베인시험으로부터 비배수전단강도의 산정

현장베인시험은 점성토의 비배수전단강도를 결정하기 위해 가장 일반적으로 수행되는 현장시험방법의 일종이다. 현장베인시험시 전단강도에 영향을 주는 요소들로는 베인의 모양, 베인주변의 전단응력 분포, 베인의 관입으로 인한 지반의 교란, 베인 관입 후 회전까지의 시간경과에 의한 압밀, 베인시험시 회전속도, 전단강도의 이방성 등인 것으로 알려져 있다. 따라서 이러한 영향요소들에 의한 베인전단강도 값의 차이를 최소화하기 위해 각국의 표준시험방법에서는 베인의 형상 및 규격, 베인 관입후 회전까지의 경과시간, 베인의 회전속도등을 규정하고 있으며, 시험결과로부터 비배수전단강도의 추정시에는 전단강도의 등방성과 베인 주변의 일정한 전단응력 분포를 가정하고 있다.

현장베인시험시 측정된 Torque(T)는 베인에 의해 형성되는 원통형 수직전단면의 저항모멘트(T_v)와 원형 수평전단면의 저항모멘트(T_h)로 구성된다.

$$T = T_v + 2T_h \quad (1)$$

베인의 회전에 의하여 수직전단면에 발생하는 전단응력의 분포가 일정하며 평균전단응력을 S_{uv} 라고 가정하고, 수평전단면에 발생하는 전단응력은 베인중심에서 베인날의 끝부분으로 갈수록 최대전단응력 S_{uh} 에 접근하는 다음식과 같이 표현할 수 있다.

$$S_{uh}(r) = \frac{S_{uh}}{\left(\frac{D}{2}\right)^n} r^n \quad (2)$$

따라서 수직전단면에서의 torque (T_v)와 수평전단면에서의 torque (T_h)는 전단면에 발생한 전단응력과 다음과 같은 관계가 있다.

$$\begin{aligned} T_v &= \pi DH \times S_{uv} \times \frac{D}{2} \\ &= \frac{\pi D^2 H}{2} S_{uv} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} T_h &= \int_0^{D/2} S_{uh}(r) \times 2\pi r \times r \times dr \\ &= \int_0^{D/2} \frac{S_{uh}}{\left(\frac{D}{2}\right)^2} 2\pi r^{n+2} dr \\ &= \frac{\pi D^3}{4(n+3)} S_{uh} \end{aligned} \quad (4)$$





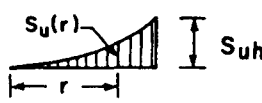




그러므로 베인의 회전에 소요된 전체 torque는 전단응력과 다음의 관계로 표시될 수 있다.

$$T = \frac{\pi D^2 H}{2} S_{uv} + \frac{\pi D^3}{2(n+3)} S_{uh} \quad (5)$$

2. 수평전단면의 전단응력 분포에 따른 전단강도 평가

Silvestri와 Aubertin(1988)은 수평전단면에 발생하는 전단응력의 분포에 따른 n 값을 표 1과 같이 제시하였다.

표 1. 수평전단면에 발생하는 전단응력의 분포에 따른 n 값

Type	Pattern	n	P_n
Uniform		0	6
Parabolic		1/2	7
Triangular		1	8
Square power		2	10
Cubic power		3	12
Fourth power		4	14
Bessel function (Cassan, 45)		-	6.77
Trapezoidal		-	6.48
Strain-softening		-	7.27

2.1 등방성 조건

만약 현장베인의 결과 해석시 전단강도를 등방으로 가정하고 ($S_{uv}=S_{uh}=S_u$) 베인의 형상이 $H/D=2$ 인 것을 사용하였다면, 점성토의 비배수전단강도는 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$S_u = \frac{T}{\pi D^3 \left(2 + \frac{1}{n+3}\right)} \quad (6)$$

실무에서 일반적으로 가정하는 바와 같이 수평전단면의 전단응력 분포가 uniform하다면 위 식은 다음과 같이 표현된다.

$$S_u = \frac{6}{7} \frac{T}{\pi D^3} \approx 0.86 \frac{T}{\pi D^3} \quad (7)$$

Flaate(1966)는 수평전단면에 발생하는 전단응력의 분포를 삼각형으로, Wroth(1984)는 런던 점토에 대해 전단응력 분포를 5차곡선으로 가정하여 각각 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$S_u = \frac{8}{9} \frac{T}{\pi D^3} \approx 0.89 \frac{T}{\pi D^3} \quad (8)$$

$$S_u = \frac{12}{13} \frac{T}{\pi D^3} \approx 0.92 \frac{T}{\pi D^3} \quad (9)$$

Donald 등(1977)은 3차원 유한요소해석으로부터, Menzies와 Merrifield(1980)는 실측을 통하여 베인의 회전으로 인한 전단응력의 분포를 조사하였으며 그 결과는 그림 1에 보이는 바와 같다. 이들의 연구결과에 의하면 수직전단면의 전단응력은 uniform에 가까운 것으로 나타났으나, 수평전단면의 전단응력 분포는 상당한 비선형의 분포를 보이고 있다. 따라서 수평전단면에서 uniform한 전단응력의 분포를 가정하는 식(8)은, 전단응력이 베인의 중심으로 부터 베인의 끝부분으로 갈수록 증가하는 경우에 비해, 전단강도를 과소평가하는 경향이 있다.

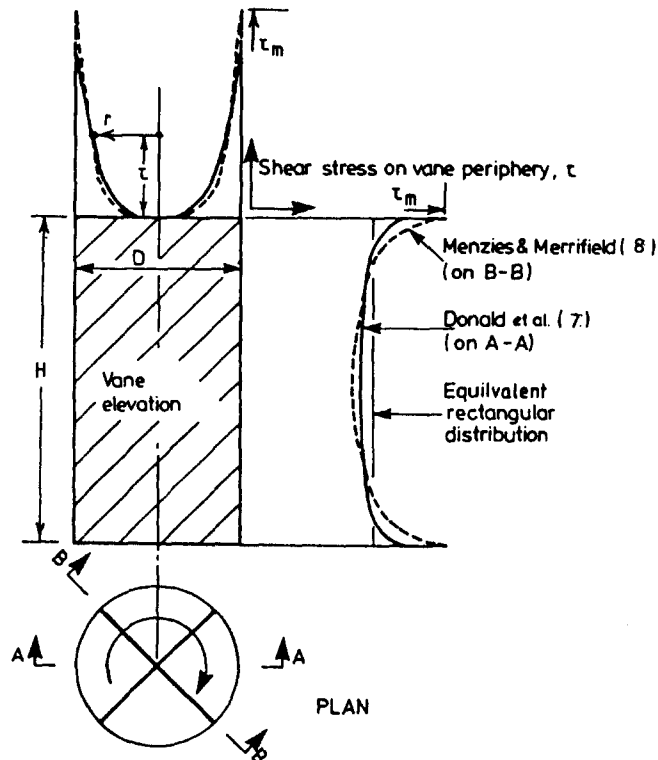


그림 1. 베인회전으로 인한 전단면에서의 전단응력 분포

수평전단면에서의 전단응력 분포를 대변하는 계수 n 에 따른 전단강도의 변화를 알아보기 위해 $T/\pi D^3$ 에 곱하는 상수 c 의 변화를 그림 2에 도시하였다. 이 결과에 의하면 전단응력 분포가 비선형에 가까울수록 식(8)에 의해 결정된 전단강도는 과소평가의 정도가 증가하며, 최대 10%이상의 차이가 발생할 수도 있음을 암시하고 있다.

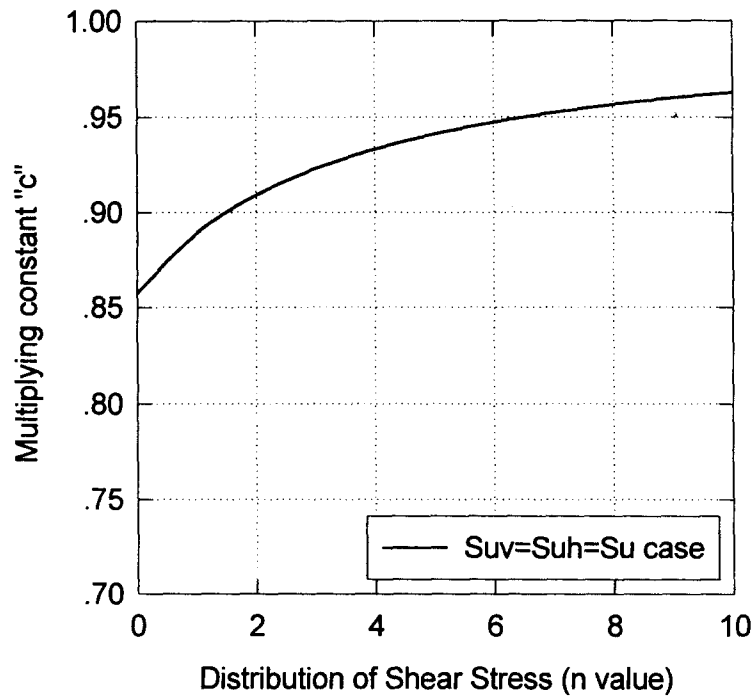


그림 2. 수평전단면의 응력분포에 따른 계수의 변화

2.2 이방성 조건

현장에 존재하는 대부분의 정규압밀된 소성이 적은 점토지반은 전단강도가 이방성을 보일 가능성이 크다. Silvestri와 Aubertin(1988)은 캐나다의 sensitive clay에 대해 모양과 H/D 가 다른 베인시험을 실시하고 $S_{uh}/S_{uv}=1.14\sim 1.41$ 의 범위를 같다고 주장하였으며, Chandler(1988)는 S_{uv}/S_{uh} 의 최소값을 0.6으로 추정하였다.

S_{uv}/S_{uh} 를 0.6으로 가정하고 수평전단면의 전단응력 분포를 uniform, Flaate(1966)의 삼각형, Wroth(1984)의 5차곡선으로 가정하여 전단강도를 산정하면 다음과 같은 식들로 표현된다.

$$S_u \approx 0.78 \frac{T}{\pi D^3} \quad (10)$$

$$S_u \approx 0.83 \frac{T}{\pi D^3} \quad (11)$$

$$S_u \approx 0.91 \frac{T}{\pi D^3} \quad (12)$$

위의 식들 중 수평전단면의 전단응력 분포가 실제와 가까운 식(11)과 (12)는 등방성 지반조건에서 uniform한 전단응력의 분포를 가정한 식(7)과 비슷함을 알 수 있다. Chandler(1988)는 위의 결과로부터 식(7)의 uniform분포의 가정으로 인한 오차가 강도의 이방성으로 인해 보정되고 있다고 주장하면서, 현재 실무에서 쓰이는 식(7)이 적절한 오차범위 내의 전단강도를 추정할 것으로 예상하였다. 그림 3은 S_{uv}/S_{uh} 를 0.6과 0.9로 가정하고 수평전단면의 전단응력 분포를 대변하는 n 값의 변화에 따른 전단강도의 변화를 알아보기 위해 $T/\pi D^3$ 에 곱하는 상수 c 의 변화를 도시하였다. 이 결과에 의하면 전단강도의 이방성이 증가할수록 식(7)과의 차이가 적어지며, 전단강도가 등방에 가깝거나 $S_{uv} > S_{uh}$ 인 경우에는 상당한 오차가 발생할 것으로 판단된다.

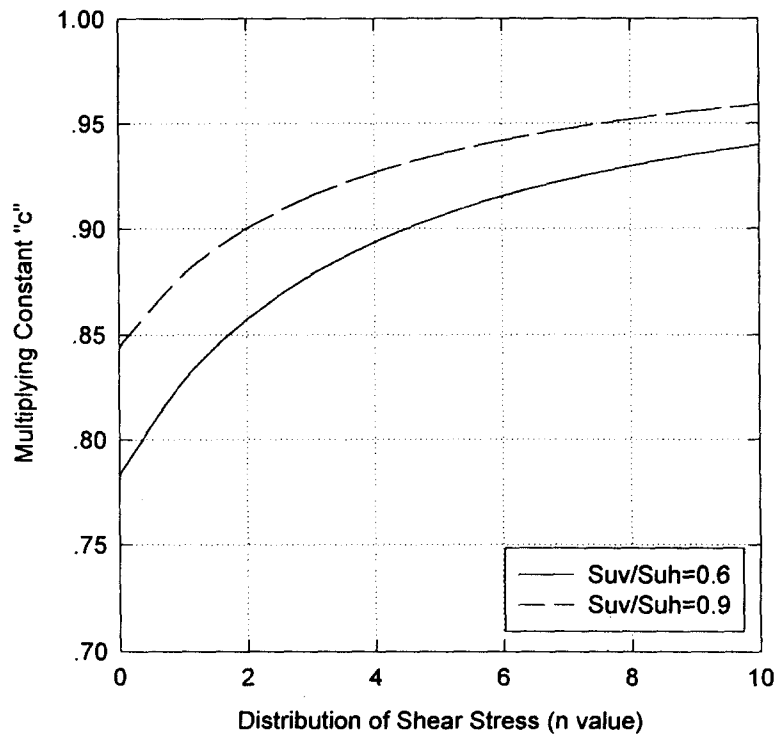


그림 3. 수평전단면의 응력분포에 따른 계수의 변화

3. 참고문헌

- ① Chandler, R. J. (1988) "The In-Situ Measurement of the Undrained Shear Strength of Clays Using the Field Vane", Vane Shear Strength Testing in Soils: Field and Laboratory Studies, ASTM STP 1014, A. F. Richards, Ed., ASTM, Philadelphia, pp. 13-44.
- ② Donald, I. B., Jordan, D. O., Parker, R. J., and Toh, C. T., (1977) "The Vane Test - A Critical Appraisal", Proceedings of the 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Vol. 1, pp. 81-88.
- ③ Flaate, K. (1966) "Factors Influencing the Results of Vane Tests", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 3, No. 1, pp. 18-31.
- ④ Menzies, B. K., and Merrifield, C. M. (1980) "Measurements of Shear Stress Distribution on the Edges of a Shear Vane Blade", Geotechnique, Vol. 30, pp. 314-318.
- ⑤ Silvestri, V., and Aubertin, M. (1988) "Anisotropy and In-Situ Vane Tests", Vane Shear Strength Testing in Soils: Field and Laboratory Studies, ASTM STP 1014, A. F. Richards, Ed., ASTM, Philadelphia, pp. 88-103.
- ⑥ Wroth, C. P. (1984) "The Interpretation of In-Situ Soil Tests", Geotechnique, Vol. 34, No. 4, pp. 449-489.