

Field Vane 시험의 활용과 주의할 점

The Application of Field Vane Test and Precautions for its use

김수삼, Soo-Sam Kim.

중앙대학교 건설환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environ. Eng.,
Chung-Ang University

SYNOPSIS : In spite that vane test is known to be one of the best technology in the field investigation practice to obtain the in-situ undrained shear strength, it has not frequently been applied to the design of soil structure in Korea. For this reason, a vane test method which has recently been developed is introduced and is evaluated by the literature research in this study.

Especially, the effect of its size, strain rate, penetration depth and PI relationship were summarized and the field application schemes of vane test was suggested. In addition, the newly developed technology on vane test was introduced.

1. 서론

연약지반상에 각종 구조물을 축조함에 있어 비배수 전단강도가 중요한 토질정수가 됨은 이미 널리 알려져 있다.

비배수 전단강도를 구하는 방법은 실내시험과 원위치 시험을 통해 구하는 방법으로 다음과 같이 대별될 수 있다.

Sutc triaxial compression test	}	실내 시험
Sute triaxial extension test		
Supsa plane strain active test		
Supsp plane strain passive test		
Sufv field vane test	}	원위치 시험
Supm pressuremeter test		
Sucp cone penetrometer test		

이들 중 실내시험은 다음과 같은 이유로 각종 지반구조물을 해석하는데 현실성이 결여되고 있어 최근에는 설계를 위한 제상수는 원위치 시험결과를 많이 이용하는 추세로 변화하고 있다.

- (i) 상재하중 제거에 의한 응력이완
- (ii) 시료채취/제작 중에 나타나는 교란
- (iii) 실제 파괴시에 나타나는 전단속도(재하속도)와 시험조건의 차이
- (iv) 불완전한 배수조건
- (v) 이방성(anisotropy)에 따른 비배수 강도의 보정

원위치 시험은 실내시험이 갖는 문제점을 상당부분 보완할 수 있지만 비배수 강도시험을 실시하고 그 결과를 해석함에는 특히 다음사항에 주의해야 한다.

- (i) 시험기기 삽입에 따른 지반교란
- (ii) 전단속도
- (iii) 부분배수와 간극수압 영향
- (iv) 파괴모드와 이방성
- (v) Thixotrophy 영향

상기 방법의 파괴기준과 토질상수의 상관성에 대해서는 많은 문헌에 의해

분석되어오고 있지만 특히 Wroth(1984)에 의해 탁월하게 정리되고 있다.

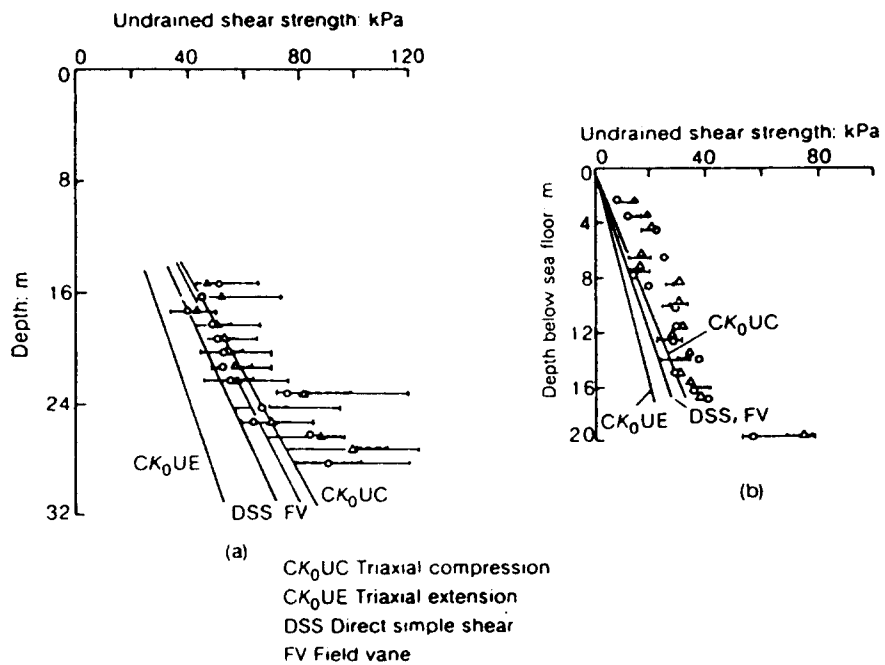
또, 각종 원위치시험을 이용하여 지반상수를 구하고 해석에 이용함에 있어 효용성은 Campanella & Robertson(1983)에 의해 <Table 1>과 같이 잘 소개되고 있다.

<Table 1> Perceived applicability of in situ test method - updated in 1982.
(after Campanella & Robertson, 1983)

	Soil type	Profile	Density D_r	Angle of friction ϕ	Undrained shear strength c_u	Pore pressure u	Stress history OCR	Modulus: Young's and shear (E and G)	Compressibility m_v and C_c	Consolidation e_p and C_s	Permeability k	Stress-strain curve	Liquefaction resistance
Dynamic cone	C	A	B	C	C	—	C	—	—	—	—	—	C
Static cone													
Mechanical	B	A	B	C	B	—	C	B	C	—	—	—	B
Electrical friction	B	A	B	C	B	—	C	B	C	—	—	—	B
Electrical piezo*	A	A	B	B	B	A	A	B	B	A	B	B	A
Electrical piezo/friction	A	A	A	B	B	A	A	B	B	A	B	B	A
Acoustic probe	C	B	B	C	C	—	C	C	—	—	—	—	C
Dilatometer	B	A	B	C	B	—	B	B	C	—	—	C	B
Vane shear	B	C	—	—	A	—	B	—	—	—	—	—	—
Standard penetration test	B	B	B	C	C	—	—	—	C	—	—	—	A
Seismic cone penetration test downhole	C	C	C	—	—	—	—	A	—	—	—	B	B
K_0 blade	—	—	—	—	—	—	B	—	—	—	—	—	—
Resistivity probe	B	B	A	B	C	—	C	C	C	—	—	C	A
Borehole permeability	C	—	—	—	—	A	—	—	B	A	—	—	—
Hydraulic fracture	—	—	—	—	—	B	B	—	C	C	—	—	—
Screw plate	C	C	B	C	B	—	B	A	B	C	C	B	B
Seismic downhole	C	C	C	—	—	—	—	A	—	—	—	B	B
Impact cone	C	B	C	C	C	—	C	C	C	—	—	—	C
Borehole shear	C	C	—	B	B	—	C	C	—	—	—	C	—
Ménard pressuremeter	B	B	C	B	B	—	C	B	B	—	—	C	C
Self-boring pressuremeter	B	B	A	A	A	A	A	A	A	A	B	A	A
Self-boring devices													
K_0 meter	—	—	—	—	—	—	A	—	—	—	—	—	—
Lateral penetrometer	C	C	B	B	B	—	B	B	C	—	—	—	—
Shear vane	B	C	—	—	A	—	B	—	—	—	—	—	—
Seismic cross-hole	C	C	B	—	—	—	—	A	—	—	—	B	B
Nuclear tests	—	—	A	B	—	—	—	C	—	—	—	—	C
Plate load tests	C	C	B	B	C	—	B	A	B	C	C	B	B

* A, high applicability; B, moderate applicability; C, limited applicability.

<Table 1>에 나타난 바와 같이 배인 시험은 비배수 강도를 얻는 데 가장 우수한 성과를 얻을 수 있음은 전문가들이 동의하고 있는 실정이다. 또 다양한 시험 방법이 <Fig. 1>에 나타난 바와 같이 비배수 전단강도의 크기에 상당한 영향을 미치고 있어 적절한 시험 방법을 선택함이 매우 중요하며 시험 방법별 비배수 강도는 <Table 2>에 나타난 바와 같다.

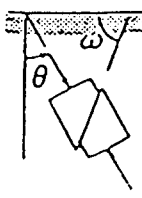
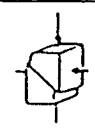



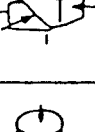
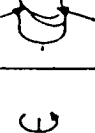



<Fig. 1> Profiles of the undrained shear strength measured in different tests at two soft clay sites in Italy (after Ghionna et al., 1983) :

(a)Porto Tolle;

(b)Panigaglia

<Table 2> Undrained strength for various testing methods (after Ohta, Nishihara and Morita (1985), test data reported by Ladd (1973))

 $\frac{S_u}{\sigma'_{vi}} = \frac{OCR^\Lambda (1+2K_o) M \exp(-\Lambda)}{3\sqrt{3}(\cosh\beta - \sinh\beta \cos 2\theta)} \quad (1)$ $\frac{S}{\sigma'_{vi}} = \frac{OCR^\Lambda (1+2K_o) M \exp(-\Lambda)}{3\sqrt{3}(\sqrt{\cosh^2\beta - \sinh^2\beta \cos^2 2\omega} - \sinh\beta \sin 2\omega)} \quad (2)$ $M = \frac{6 \sin \phi'}{3 - \sin \phi'} \quad \Lambda = 1 - C_s/C_c \quad n_o = \frac{3(1-K_o)}{1+2K_o} \quad \beta = \frac{\sqrt{3}n_o \Lambda}{2M}$		Blue marine clay PI=20 $\phi'=33^\circ$ $K_o=0.5$	
Type of test	Reduced equation for specified test on normally consolidated clay	measured	predicted
	Ko-consolidated Plane strain Comp. $\frac{K_o PUC}{(A)} \frac{S_u}{\sigma'_{vo}} = \frac{(1+2K_o) M \exp(-\Lambda)}{3\sqrt{3}(\cosh\beta - \sinh\beta)}$	0.34	0.347
	Ko-consolidated Triaxial Comp. $\frac{K_o UC}{(B)} \frac{S_u}{\sigma'_{vo}} = \frac{1+2K_o}{6} M \exp\left(\frac{\Lambda n_o}{M} - \Lambda\right)$	0.33	0.318
	Shear Box Test $\frac{SBT}{(C)} \frac{S}{\sigma'_{vo}} = \frac{(1+2K_o) M \exp(-\Lambda)}{3\sqrt{3}}$	—	0.239
	Direct Simple Shear $\frac{DSS}{(D)} \frac{S}{\sigma'_{vo}} = \frac{(1+2K_o) M \exp(-\Lambda)}{3\sqrt{3} \cosh\beta}$	0.20	0.224
	Ko-consolidated Plane strain Ext. $\frac{K_o PUE}{(E)} \frac{S_u}{\sigma'_{vo}} = \frac{(1+2K_o) M \exp(-\Lambda)}{3\sqrt{3}(\cosh\beta + \sinh\beta)}$	0.19	0.165
	Ko-consolidated Triaxial Ext. $\frac{K_o UE}{(P)} \frac{S_u}{\sigma'_{vo}} = \frac{1+2K_o}{6} M \exp\left(-\frac{\Lambda n_o}{H} - \Lambda\right)$	0.155	0.135
	Field Vane $\frac{FV}{(Q)} \frac{S_h}{\sigma'_{vo}} = \frac{(1+2K_o) M \exp(-\Lambda)}{3\sqrt{3}}$ $\frac{S_v}{\sigma'_{vo}} = \frac{1+2K_o}{3\sqrt{3}} \sqrt{\left(\frac{M P}{\Lambda P_o} \frac{P}{P_o}\right)^2 - \left(1 - \frac{P}{P_o}\right)^2 n_o^2}$	0.19	0.182

각종 토질조사 보고서상에 나타난 우리나라 연약지반 조사에 사용되는 시험방법들은 통상 실내시험으로는 일축압축, 전단, 삼축압축 시험이 이용되고, 원위치 시험으로는 Cone 또는 Piezocone 시험과 경우에 따라 드물게 Vane과 Swedish Sounding 시험이 채택되고 있다. 즉 베인시험의 이용빈도가 많지 않은 실정이다. 그 이유는 표준품셈상의 베인시험 비용이 실비에 못미치는 데다가, 시험에 소요되는 노력과 시간이 과다하여 현장조사 요원들이 기피하는 것도 그 이유의 하나가 될 것이고 궁극적으로는 베인시험 자료에 대한 인식이 부족하여 한정적으로 사용되고 있다고 판단된다.

베인시험은 1919년 Olsson에 의해 처음 사용되었다고 Flodin & Broms(1981)가 제시하고 있는 바 대체적으로 1928년 경에 스웨덴과 독일에서 사용되기 시작하여 1945년 경에는 영국에서 유용한 연구결과들이 나타나고 있는 매우 역사가 오래된 원위치 시험방법 중의 하나이다.

Cadling & Odenstad(1950)는 베인이 회전함에 따라 Torque moment로 인해 유발되는 전단강도가 원통형 표면에서 일정한 값을 갖는다는 가정하에 다음 식을 제안하였다.

$$S_u = \frac{2T}{\pi D^2 \left(H + \frac{D}{3} \right)} \dots\dots\dots (1)$$

T : Torque moment

H : 베인 날개 높이

D : 베인 날개 직경

Flaate(1966)는 원통형 끝부분에서의 강도는 회전변형률에 비례하여 중심부에서는 0, 외곽으로 가면서 S_u 까지 커진다고 판단하고 다음 식을 제시하였다.

$$S_u = \frac{2T}{\pi D^2 \left(H + \frac{D}{4} \right)} \dots\dots\dots (2)$$

(1)식과 (2)식에 표준배인규격인 H=2D를 적용하면 다음과 같이 된다.

$$S_u = \frac{6}{7} \frac{T}{\pi D^2} \dots\dots\dots (3)$$

또는

$$S_u = \frac{8}{9} \frac{T}{\pi D^2} \dots\dots\dots (4)$$

따라서 두 식의 값은 단지 5% 정도의 차이를 나타냄을 알 수 있다.

Cadling & Odenstad(1950)는 지반에 배인을 삽입하므로 인해 발생하는 교란 정도를 규명하기 위하여 배인 두께비(perimeter ratio)를 제시하였고, 배인의 회전각속도의 증가에 따라 전단강도가 증가함을 논술했다.

Aas(1965), Torstensson(1977) 등도 전단속도가 비배수 강도에 미치는 영향을 제시하였고, La Rochelle, Roy and Tavernas(1973)도 배인 날개의 두께비에 따라 비배수 전단강도의 감소효과를 구체적으로 제기하였다. Aas(1965, 1967)는 또한 배인의 높이와 폭의 차이로 인한 이방성을 나타낼 수 있는 방법을 제안하였다.

Menzies & Mailey(1976)은 20° 에서 70° 까지 서로 다른 각도를 갖는 배인을 제작하여 전단강도를 측정하였으며, Bjerrum(1972)은 소성지수를 이용하여 시험강도를 보정하고 연약지반상에 축조된 성토의 안정성을 재평가하는 방안을 제안하였다.

Wroth(1984)는 Rankine lecture 발표논문에서 이때까지 배인시험의 발전과 해석에 대한 내용을 체계있게 정리하여 제시하였으며, Davies & Parry(1982)는 원심모형시험기를 사용하여 배인 전단강도의 변화를 실측하여 정지상태 때보다 운전 중에 강도가 매우 커짐을 발견하였다.

Morris & William (1993) 등은 전단 중에 유효응력의 영향 등을 고려한 새로운 모델을 이론적으로 제시하는 노력을 시도한 바 있다.

Otha et al.(1993) 등은 Cam Clay Model에 필요한 지반상수를 얻는데 배인

시험 방법을 활용하는 방안을 연구하였다.

이상에 안내한 베인에 관한 각종 연구 이외에도 수많은 연구가 진행되고 있으며 각종 설계 및 시공에 그 성과가 이용되고 있는 바 시험방법 및 주의 사항을 요약 정리하면 다음과 같다.

2. 베인시험의 원리

(1) 가정조건

베인 시험은 다음과 같은 가정하에 지반의 비배수 전단강도를 실측에 의해 구하고 있다.

- (i) 전단 중에는 배수가 발생하지 않는다.
- (ii) 지반은 등방성이고 균질이다.
- (iii) 상하부의 전단면에는 균등한 전단응력이 분포한다.
- (iv) 원통형 전단면을 갖는다.
- (v) 전단때 발생하는 원통의 크기는 베인 직경과 같다.
- (vi) 진행성 파괴는 발생하지 않는다.
- (vii) 베인 삽입중에 발생하는 지반교란은 무시한다.

(2) 베인 시험 기본식

<Fig. 2>에 나타낸 단면에 있어서 Torque moment, T를 다음 식에 의해 계산하여 비배수 전단강도를 구한다.

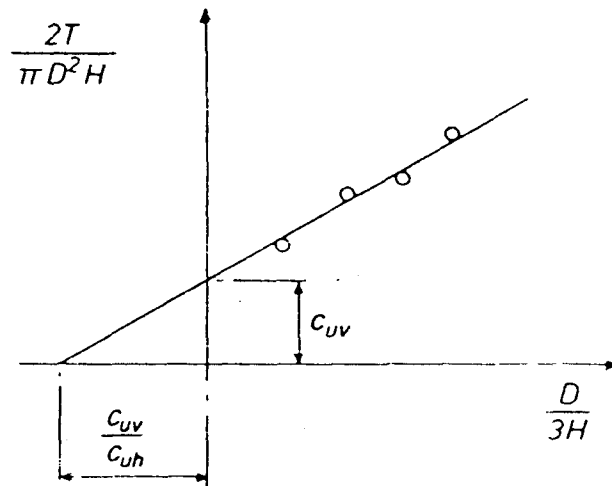
$$\begin{aligned}
 \text{최대 Torque } T &= \frac{\pi D^2 H S_u}{2} + 2 \int_0^{D/2} 2\pi r \delta r r S_u \\
 &= \frac{\pi D^2 H S_u}{2} + 2 \left[\frac{4\pi r^3}{3} S_u \right]_0^{D/2} \\
 &= \frac{\pi D^2 H}{2} + \left[1 + \frac{1}{3} \frac{D}{H} \right] S_u \quad \dots\dots\dots (5)
 \end{aligned}$$

만약 $H=2D$ 이면, $T=3.67D^3S_u$ 이다.

Aas(1965, 1967)가 제안한 직사각형 단면을 사용하였을 때 이방성의 영향을 감안한 식을 제시하면 다음과 같다. 수평방향과 연직방향의 비배수 전단강도를 S_{uh} 와 S_{uv} 라고 하면 식 (5)로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\left(\frac{2}{\pi D^2 H}\right)T = S_{uv} + S_{uh}\left(\frac{D}{3H}\right) \quad \dots\dots\dots (6)$$

식 (6)을 이용하여 $(2/\pi D^2 H)T$ 와 $(D/3H)$ 를 서로 다른 시험을 반복하여 그래프로 그리면 S_{uv} 와 S_{uh} 를 구할 수 있다. (Fig. 2 참조)



<Fig. 2> Method of determining soil anisotropy (Aas, 1965, 1967)

만약 다이아몬드 모양의 베인을 사용하는 경우에는 전단응력이 균등하게 분포한다고 가정하면 다음 식으로 나타낼 수 있고

$$T = \frac{\pi D^3 (S_{uv})}{6 \sin \alpha} \quad \dots\dots\dots (7)$$

전단응력이 삼각형 분포라면 (8)식이 되어 약 33%의 차이를 나타내고 있다.

$$T = \frac{\pi D^3 (S_{ua})}{8 \sin \alpha} \dots\dots\dots (8)$$

(3) 표준 베인 시험

Chandler(1987)는 표준 베인 시험 절차를 다음과 같이 제시하고 있다.

- (i) 4개의 베인 날개를 직교하도록 검증하고
- (ii) 높이와 폭의 비는 2:1 유지
- (iii) H=130mm, D=65mm를 표준으로 사용하고
- (iv) 날개두께=2mm 유지
- (v) 면적비<12%
- (vi) Rod의 마찰력 측정
- (vii) 지반에 삽입 후 존치시간=5분 확보
- (viii) 12° / min 속도로 회전
- (ix) 계산

3. 베인 시험에 영향을 미치는 문제들

(1) 베인의 크기

현장에서의 정확한 비배수 강도를 측정하기 위해서는 적절한 크기의 베인을 선택해야 한다. 현장에서의 취급의 용이함을 가정하면 작은 베인이 좋겠지만 최소한 넓이 50mm, 높이 100mm 이상의 베인을 현장에서 사용하도록 하고 있으며 넓이의 2배의 높이를 갖는 것을 기본으로 정의하고 있다.

SGI는 각각 65×130mm와 55×110mm 2종류의 베인을 사용하도록 하고 있으며, Chandler는 표준 베인 시험으로 65×130mm 규격을 권고하고 있다. 그러나 BS 1377:1975에서는 표준 베인의 크기를 <Table 3>과 같이 흙의 전단강도에 따라 구별하여 사용하도록 권고하고 있다. 즉 연약한 지층일수록 큰 베인을 쓰도록 요구하고 있다. 또 미국은 Casing 크기에 따라 베인 크기를 달

리하고 있다.

<Table 3> Standard dimensions for the vane by BS 1377

Soil shear strength (kPa)	Vane dimensions		Rod Dia. (mm)
	height (mm)	width (mm)	
< 50	150	75	< 13
50 ~ 75	100	50	< 13
> 75	Not suitable		

<Table 4> USA Specification for vane blades

(mm)

Casing size	Vane dia.	Vane height	Blade thickness	Dia. of vane rod
AX	38.1	76.2	1.6	12.7
BX	50.8	101.6	1.6	12.7
NX	63.5	127.0	3.2	12.7
4 inch	92.1	184.1	3.2	12.7

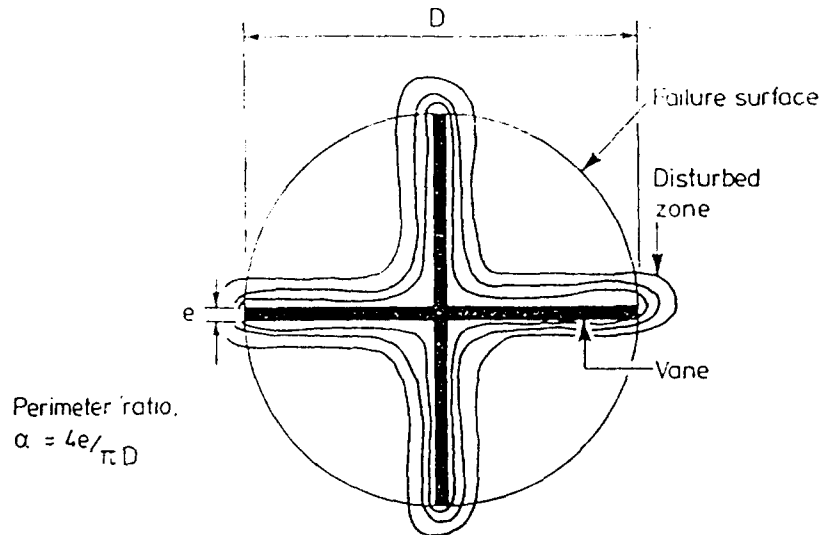
또 Menzies et al.(1980) 등은 120×240mm의 대형 베인을 사용하여 연구하고 있으며, Kirkpatrick et al.(1984)은 연구용으로 12.7×12.7mm의 정사각형 소형 베인을 사용하는 사례도 있다.

(2) 베인의 두께

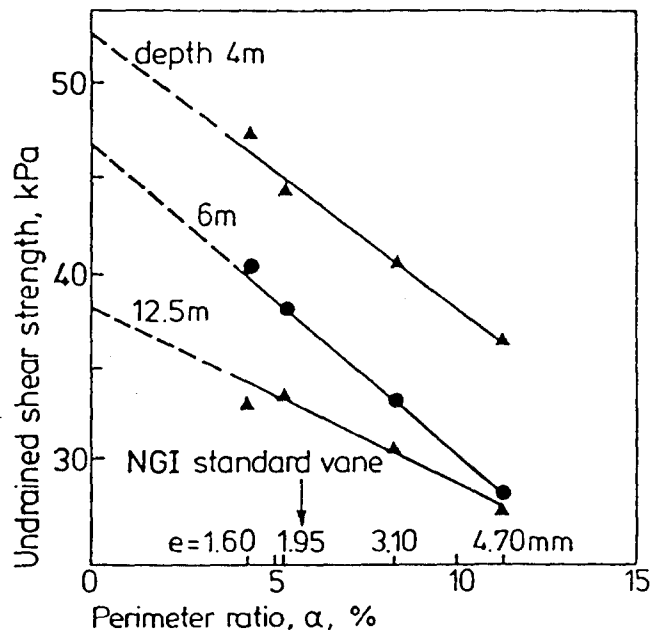
베인의 두께는 베인 삽입에 따른 지반의 교란 영역에 영향을 미쳐 비배수 전단강도의 측정에 큰 차이를 나타내게 한다. 베인의 두께에 따라 나타나는 교란 영역은 <Fig. 3>에 나타난 바와 같은 양상을 나타내게 되고 이에 따라 파괴 영역이 베인 시험의 가정조건을 크게 벗어나게 된다.

또 La Rochella et al.(1973) 등의 연구에 의하면 베인 두께에 의한 비배수

전단강도의 변화는 베인 두께에 따라 토층의 심도별로 영향을 미치는 것을 확인하고 있는 바(<Fig. 4> 참조), 예를 들면 토층 심도가 6m일 때 두께 4.70mm의 베인과 두께 1.6mm인 경우를 비교하면 비배수 전단강도가 두꺼운 경우 50% 정도 감소함을 나타내고 있다.



<Fig. 3> Diagrammatic illustration of vane insertion disturbance
 (after Cading & Odenstad 1950 and La Rochelle et al., 1973)



<Fig. 4> Effect of field vane blade thickness(e) on measured undrained strength
 (La Rochelle et al., 1973)

베인 삽입에 따라 전단강도가 감소함은 흙입자 사이에 형성된 연결고리를 파괴하고 흙입자의 상대적인 위치에 변화를 가져와 예민비가 큰 점성토에서 특히 비배수 전단강도의 감소가 크게 나타나고 있다. 따라서 가능하면 두께가 얇은 베인의 사용이 요청되나 지반의 강성에 최소한 대응하는 두께가 되어야 한다.

베인 두께의 영향을 평가하기 위하여 두께비(Perimeter Ratio)가 사용되고 있는 바 이는 다음식에 의해 나타낸다.

$$\alpha = \frac{4e}{\pi D} \dots\dots\dots (9)$$

α : 두께비 (Perimeter Ratio)

e : 베인 두께 (mm)

D : 베인 폭 (mm)

<Fig. 4>는 두께비가 11% 정도를 나타내면 비배수 전단강도는 30% 이상 과소평가될 수 있음을 보여주고 있다. 만약 두께 2mm, 폭 75mm인 베인을 사용하면 $\alpha=3.4\%$ 의 두께비를 갖는 경우에 해당한다.

또 베인을 연결하는 Rod의 직경과 관련하여 면적비가 사용되고 있는 바 이는 다음식으로 나타낸다.

$$A_c = \frac{[8e(D-d) + \pi d^2]}{\pi D^2} \dots\dots\dots (10)$$

A_c : 면적비 (Area ratio)

e : 베인 두께 (mm)

D : 베인 폭 (mm)

d : Rod의 직경 (mm)

윗 식에서 Rod의 직경이 0이라면 두께비(Perimeter Ratio)는 면적비(Area ratio)의 1/2과 같은 값을 의미한다. 또 점성토의 예민성에 대하여 표준 베인 시험(BS 기준)의 교란이 미치는 영향은 다음 <Table 4>에 나타난 바와 같이 예민비가 낮은 경우에는 $\pm 10\%$ 정도의 비배수 전단강도의 변화를 보여주나 예민비가 높은 경우 20~30% 감소함을 나타내고 있어 예민비가 높은 지반에서의 베인 시험 사용에 주의가 필요함을 나타내고 있다. (Chandler, 1987)

<Table 4> Postulated effects of insertion disturbance on the undrained strength measured by the field vane

Sensitivity	Measured value of c_u		
	In 'Standard' test	With no insertion disturbance	After 24 hrs. 'rest' ('consolidated-undrained' c_u)
Low - medium	± 0.9	1.0	± 1.1
High	0.7 - 0.8	1.0	± 1.1

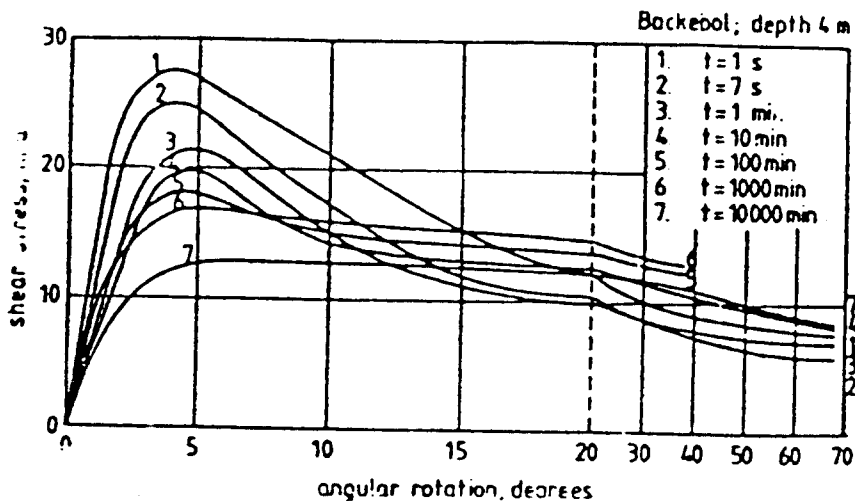
(3) 베인의 시험위치

베인 시험은 자연지반에 베인을 직접 삽입시켜 시험하는 경우와 소정의 깊이까지 시추를 시행한 후 베인을 삽입하는 방법 등이 사용된다. 이 경우 교란된 지반을 피하여 자연상태 지반에서 비배수 전단강도를 조사해야 하는데 Hvorslev(1949)는 시추공 하단에서 시추공 직경의 3배정도 하부에서 시험을 실시할 것을 제안하고 있다. 그러나 NGI에서는 시험시공을 통해 최소한 시추공 직경의 6배이상 하부로 내려가 시험을 실시하도록 권고하고 있다. 베인시험이 끝나면 베인은 가능한 한 빠른 시간에 인발되어야 하는데 이는 지체된 시간만큼 베인에 점성이 작용하여 면적비에 영향을 미치기 때문이다.

(4) 베인의 회전속도

전단강도 시험에서 하중 재하속도는 응력에 큰 영향을 미치게 된다. 일반적으로 느린 속도로 힘을 가하면 전단강도도 감소하는 경향을 나타내게 된다. Torsrensson(1977)은 깊이 4m 지반에서 베인의 회전속도에 따라 전단강도의 변화를 <Fig. 5>와 같이 관찰하였다. 회전속도를 빠르게 했을 경우에는 2~3°의 회전각에서 최대강도가 나타나며 이때 비배수 전단강도값도 매우 커짐을 실측하여 베인의 회전속도가 크게 영향을 미침을 증명하였다. 표준적으로 0.2°/sec 정도를 회전시킬 것을 권고하고 있으나, BS에서는 6°~12°/min를 제시하고 있으며 ASTM D2573-72는 6°/min을 요구하고 있다.

Cadling과 Odenstad(1950)은 0.1°/sec ~ 1.0°/sec 사이에서 전단강도가 현저히 증가함을 확인하였고, NGI는 0.2~0.4°/sec를 요구하고 1~3분 사이에 파괴에 도달한다고 하였다. 또 실용적으로는 15m 이내의 심도에서는 0.2°/sec의 일정한 속도로 회전시키지만 그 이상의 깊이에서는 회전속도가 2배가 필요하다고 하였다.

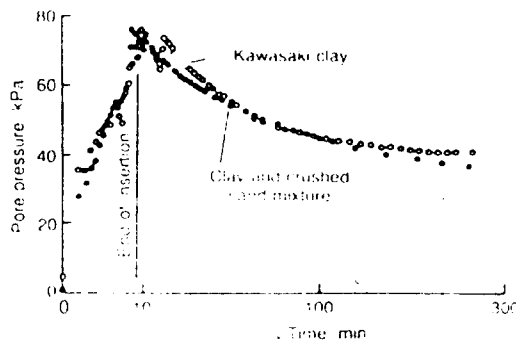


<Fig. 5> Effect of testing rate on the 'stress-strain' curve for a vane test (Torstenson, 1977). (t=time to maximum torque)

(5) Thixotropy 영향

Flaate(1966)는 베인을 지반내에 삽입했을 때 간극수압이 소멸되면서 thixotropy에 의한 점토강도의 증가가 나타난다고 하였다. 따라서 베인을 삽입한 후 일정한 시간이 경과한 후 시험을 실시해야 하는 문제를 제기하게 된 것이다. 즉 베인 삽입과 시험시작시간 사이에 일정한 “표준대기시간”이 필요함을 의미한다.

Kimura & Saitoh(1983)의 <Fig. 6>과 같은 시험자료에서도 베인의 삽입완료시에 가장 큰 간극수압이 확인되고 있으며 약 3분 전후에서 간극수압이 점점 감소하면서 안정추세에 진입함을 보여주고 있다.



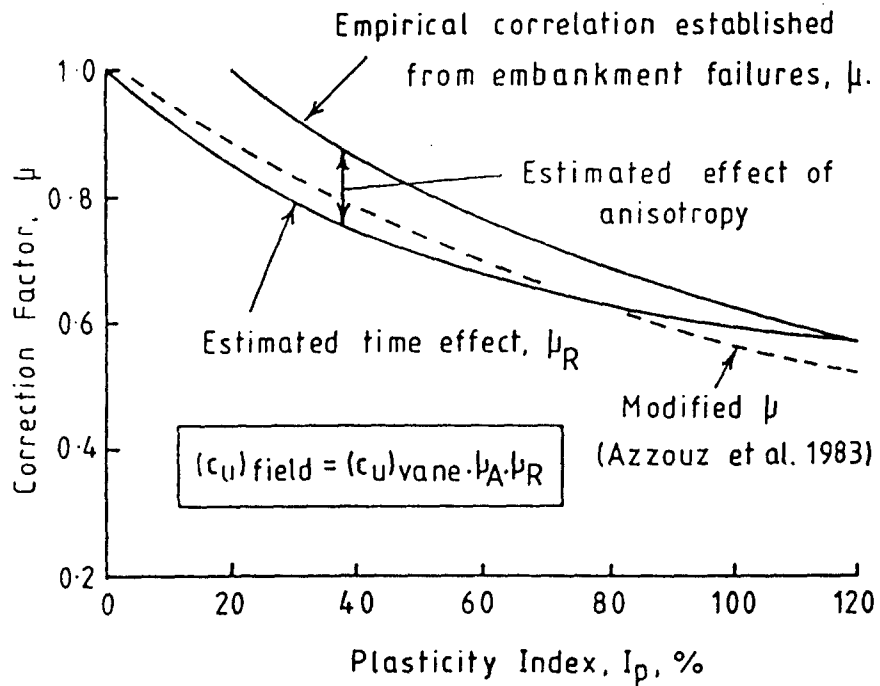
<Fig. 6> Variation of pore pressure during and following vane insertion
(adapted from Kimura & Saitoh, 1983)

(6) 시험 결과의 해석

Bjerrum(1972)은 연약지반상에 축조된 성토에 대한 안전율 계산결과 베인 시험을 통해 얻는 비배수 전단강도가 고소성 점토에서 실제에 비해 너무 과대평가되었다고 판단하였다. 따라서 다음 식과 같이 보정되어야 함을 제안하였다.

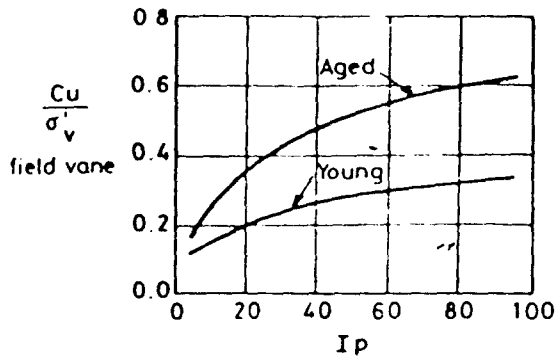
$$Su(\text{design}) = \mu Su(\text{fieldvane}) \dots\dots\dots (11)$$

윗 식에서 μ 는 Plastic Index(PI)에 따라 변하는 값으로 <Fig. 7>에 의해 구할 수 있다. 이때 μ 는 배인의 회전속도와 현장강도의 이방성에 따라 좌우되는 값이다.

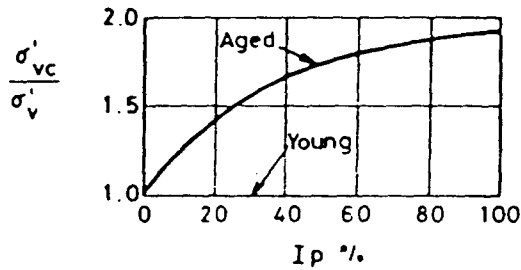


<Fig. 7> Factors relating vane and field strengths (Bjerrum, 1973)

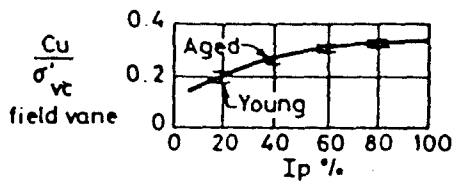
Mesri(1975)는 Bjerrum(1972)의 현장 배인 보정곡선에 2개의 경험치를 추가하여 PI와 $\mu S_u / \sigma_{vc}'$ 의 관계를 나타내었다. (<Fig. 8> 참조)



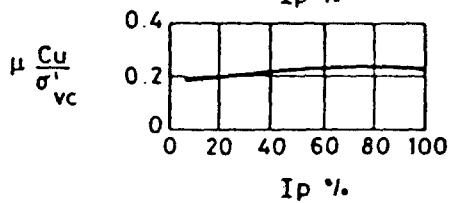
a) Trends for vane strengths of normally consolidated clays.



b) Effects of ageing on apparent overconsolidation



c) Trends for Cu/σ'_{vc} from vane tests on low OCR clays (combining a) and b))



d) Trends for field strengths for low OCR clays (combining c) with Figure 3.10

<Fig. 8> Reinterpretation of Bjerrum's data (after Mesri, 1975)

이 조합에 의하면 제방의 파괴에 대응하는 $Su/\sigma'_{vc} \approx 0.22$ 에서 거의 일정한 값을 나타내고 있음을 나타내고 있다. 그러나 $PI-Su/\sigma'_{vc}$ 관계는 약간 증가하는 관계에 있다는 해석에서 OCR에 따라 그 상태가 상이한 관계까지 다양한 연구가 진행되고 있다.

우리나라 지반은 서해안의 경우 $PI \approx 10 \sim 20$ 의 범주에 드는 지역이 많고 남해안의 경우 $PI \approx 20 \sim 30$ 정도의 지역이 많은 실정을 고려할 때 보정계수 $\mu \approx 1$ 을 사용할 수 있을 것으로 사료된다. 그러나 압밀이 진행됨에 따라 PI 값이 일부 변경됨을 감안하여 이에 대한 검토가 보완되어야 할 것이다.

4. 요약 및 결론

현장에서 쉽게 사용할 수 있는 베인 시험에 대한 연구동향과 주의할 사항을 문헌검색을 통해 정리하였다. 우리나라에서 조사되는 수많은 현장 비배수 전단강도들이 대부분 일축압축, 삼축압축 (K_0UC), 직접전단 시험 등 실내 시험에만 의존하는 것은 낙후된 현장 시료 채집/보관/성형 기술에 비추어 우려할만하다. 베인 시험은 실내 시험의 불확실성을 극복할만한 적절한 비배수 전단강도 시험인데도 국내에서 사용빈도가 적은 것은 앞으로 개선되어야 할 것이다.

베인 시험이 매우 간편한 방법임에도 불구하고 시험 기기의 선정, 설치, 시험 방법 등에서 섬세한 주의를 기울이지 않으면 성과를 그르칠 수 있다. 이를 위하여 엄격히 시험 기준이 제시되어야 하는 바 우리나라 지반이 대부분 저소성 점성토 지반임을 감안하여 이에 대한 효용성을 규명하는 연구가 실내와 현장 시험 결과를 가지고 실행되어야 할 것이다. 특히 OCR특성과 Su/σ_{vc} 및 PI 의 관계, 회전 시간과 지반의 이방성에 따른 보정계수의 선정, 베인과 Piezocone 시험 및 각종 실내 시험과의 상관성 연구 등이 금후에 한국 지반특성을 고려하여 보완되어야 할 것이다.

또 최근에는 Wiesel(1973) 등에 의해 제안된 전자식 베인 시험기가 계속 발전중이고 특히 자동계측 시스템과 간극수압을 측정하는 장치들이 보완되고 있으며 마찰을 줄이는 새로운 장치들이 개발되고 있어 새로운 조사방법으로 계속 전개될 전망이다. 우리나라도 이에 대한 연구가 수행되어 보다 정

밀한 지반해석이 가능하도록 기술개발을 촉진해야 할 것이다.

참고문헌

1. Bjerrum, L. (1973) "Problem of soil mechanics and construction on soft clays and structurally unstable soils (collapsible, expansive and others)", Proc. 8th Int. Conf. Soil Mech, Moscow, 3, pp.111-159
2. Chandler, R. J. (1988), "The in-situ Measurement of the undrained shear strength of clay using the field vane", Vane shear strength testing, field and laboratory studies, ASTM STP 1014, pp.13-44
3. Clayton, C. R. I., Matthews, M. C., Simons, N. E. (1995) "Site investigation", Blackwell Science, pp.476-486
4. Davies, M. C. R., Parry, R. N. G.(1982) "Determining the shear strength of clay cakes in the centrifuge using a vane", Geotechnique 32, No.1, pp.59-62
5. Jardine, R. J., Hight. D. W. "Laboratory and field techniques for obtaining design parameter", Embankments on soft clays, Bulletin of the public works research center, Athens, pp.195-281
6. Kirkpatrick, W. M., Khan, A. J. (1984), "The influence of stress relief on the vane strength of clays", Geotechnique 34, No.3 pp.428-432
7. La Rochelle, P. Roy, M & Tavenas, F., (1973), "Field measurements of cohesion in Champlain clays", Proc. 8th Int. Conf. Soil Mech., Moscow, 1, pp.229-236
8. Menzies, B. K. & Merrifield, C. M. (1980). "Measurement of shear stress distribution on the edges of a shear vane blade", Geotechnique 30, No. 3, pp.314-318

9. Morries, P. H., Williams, D. J. (1993), "A new model of vane shear strength testing in soils", *Geotechnique* 43, No. 3, pp.489-500
10. Ohta, H., Nishihara, A., Iizuka, A., Morita, Y.,(1992) "Use of field vane test data in analysis of soft clay foundations", *Predictive Soil Mechanics* , Thomas Telford, London, pp.513-528
11. Torstensson, B. (1977) "Time- dependent effects in the field vane test", *Proc. Int. Symp. Soft clay*, Bangkok, pp387-397
12. Wiesel C.E. (1973), "Some Factors influencing in situ vane test results", *Proc. 8th. Int. Conf. Soil Mech.*, Moscow, 1 · 2, pp.475-479
13. Worth , C. P. (1984) "The interpretation of in situ soil tests", *Geotechnique*, 34, No. 4 pp.449-489