

## 다짐된 세립토의 인장강도 측정법의 개발

### Development of Tensile Strength Measurement Technique on Compacted Fine-Grained Soils

김태형<sup>1)</sup>, Tae-Hyung Kim, 김찬기<sup>2)</sup>, Chan-Kee Kim, 윤중만<sup>3)</sup>, Jung-Man Yun, 유승경<sup>4)</sup>, You, Seung-Kyong

<sup>1)</sup> 한국해양대학교 공과대학 건설환경공학부 전임강사, Full Time Instructor, Div. of Civil and Environ. Engrg., Korea Maritime Univ.

<sup>2)</sup> 대진대학교 토목공학과 부교수, Assoc. Prof., Depart. of Civil Engrg., Dajin Univ.

<sup>3)</sup> 안산공과대학 토목과 교수, Prof., Depart. of Civil Engrg., Ansan College of Tech.

<sup>4)</sup> 명지전문대학 토목과 조교수, Asst. Prof., Depart. of Civil Engrg., Myongji College

**SYNOPSIS** : Theoretical and experimental result studies of the unconfined penetration test (UP) method are conducted to suggest a new test method by improving the UP method for determination of the tensile strength of compacted fine-grained soils. From the theoretical aspect, the tensile strength of the specimen is estimated from the maximum load by the theory of perfect plasticity with assumptions, sufficient local deformability and modified Mohr-Coulomb failure criterion. Experimentally, some factors including relative size of specimen-disc, disc diameter, and loading rate are needed more study, because these factors significantly affect the results of tensile strength. Improvement of the alignment between two discs and specimen in the UP test is also necessary to eliminate the error due to eccentrically loading.

**Key words** : tensile strength, compacted fine-grained soils, unconfined penetration test, modified Mohr-Coulomb failure criterion, alignment

## 1. 서 론

흙의 인장강도는 토질역학 분야에서 중요한 강도변수 중 하나이다. 그러나 많은 지반공학자는 인장강도가 압축강도와 비교하면 상대적으로 그 값이 작고, 적합한 인장력 측정법의 결여로 인한 신뢰할 수 있는 데이터의 부족으로 흙의 인장강도는 영에 가깝다고 생각하거나 무시되고 있다. 하지만 흙의 인장 특성에 관한 이전의 연구들을 살펴보면 인장강도의 중요성을 충분히 알 수 있다. 특히, 세립토가 포함된 자연 혹은 인공적인 지반구조물 경우 흙의 인장특성은 대단히 중요한 요소가 될 수 있다. 왜냐하면 여러 가지 원인들(흙 내부의 습윤변화, 온도변화, 다짐에너지의 불균형 등)에 의해 지반구조물에는 쉽게 균열이 생성되는데 발생한 균열은 진행성파괴 및 초기파괴를 유발하여 궁극적으로 구조물 전체의 안정을 파괴하기 때문이다.

도로포장 및 흙 댐의 경우 재료의 인장강도와 관련된 균열파괴의 중요성은 이미 많은 관심을 불러 일으켰는데, Leonards and Narain(1963)은 흙 댐의 균열거동을, George(1970)는 안정된 흙-시멘트 혼합체의 균열 확장 및 균열의 효과에 대해 언급을 하였다. Suklje (1969)은 피압수로 인한 굴착면 저면의 점성토층에서의 위험한 인장균열 가능성과, 점성토 저면의 한계동수경사가 전단강도 뿐만 아니라 인장강도에 영향을 받을 수 있다고 지적했다. Spencer(1968)와 Suklje(1969)은 사면상부에서 나타나는 인장주응력상태를 갖는 크립나 한계상태의 점성토사면의 경우 인장강도가 사면안정해석과 깊은 관련 있음을 밝혔다. Fang and Fernandez(1981)도 도로, 사면, 흙 댐 및 제방에서의 인장균열 문제의 중요성

을 언급하였다. Kim and Sture(2004)도 불포화 흙의 정확한 거동해석에 있어 인장강도의 중요성을 지적하였다. 특히, Allen(2001)은 지반환경구조물의 대표적인 사례인 매립지 차단시스템에서 균열이 발생 그 기능이 상실되어 오염원이 유출된다는 것을 지적하였다. 이것은 이들 매립지를 건설할 때 매립지 전 체구조물의 안정에 대한 검토는 흙의 전단강도 특성을 기초로 해서 충분히 이루어졌지만, 차단재로 사용된 세립토의 균열에 대한 검토는 충분히 고려되지 않았기 때문이다.

위와 같이 중요한 흙의 특성 중 하나인 인장강도를 규명하기 위해서는 이를 정확히 측정할 수 있는 기법의 개발이 요구된다. 이를 위해 흙의 인장강도를 측정하는 기존의 시험법을 고찰하여 각 방법의 장 단점을 파악하여야 하는데, 본 논문에서는 일축관입시험을 주 연구대상으로 선택하였는데, 이론이 명료 하고 실험방법이 간단하기 때문이다. 일축관입시험에 대한 이론적 배경과 실험방법의 적합성을 살펴보고, 점착력이 있는 다짐세립토의 인장강도를 정확히 측정할 수 있는 새로운 기법을 제시하고 한다.

## 2. 이론연구

### 2. 1기본이론

일축관입시험법에 사용된 이론은 한계해석(limit analysis)에 의한 Chen이 제안한 이론에 근거를 두고 있다. Chen(1970)은 완전소성이론을 이용한 한계해석으로부터 식(1)과 같은 인장강도 계산식을 유도할 수 있음을 보여주었다. 원래 식(1)은 할렬인장시험(Thompson, 1965)에 대한 인장강도 계산식으로 이 식의 이론적 기본은 선형탄성이론에 바탕을 두고 있다(Timoshonko, 1934).

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi Ld} \quad (1)$$

여기서,  $\sigma_t$  = 인장강도, P = 작용하중, L = 공시체 길이, d = 공시체 직경이다.

한계해석에 근거하여 Chen(1970)은 양면편칭시험법을 만들어, 이를 이용하여 콘크리트와 암에 대한 지지력을 예측하는 방법을 개발하였다(Chen and Drucker, 1969; Hyland and Chen, 1970). 여기서 한 가지 중요한 점은 콘크리트에 적용된 똑 같은 이론이 흙에 대한 양면편칭시험에도 적용이 가능하다는 것이다. 왜냐하면 콘크리트나 모르타르의 지지력 거동이 흙의 지지력거동과 매우 유사하기 때문이다.

Chen과 Drucker(1969)에 의해 언급된 일반적인 한계이론을 흙에 적용하기 위해서는 다음과 같은 두 가지 가정을 만족해야 한다. 첫 번째 가정은 흙의 변형에 대한 것으로 흙은 완전소성체로 인장 및 압축 시 충분한 국부변형(local deformability)이 발생하여야 한다는 것이다. 두 번째는 파괴면에 관한 것으로 그림 1은 파괴곡면처럼, 압축측면에서는 수정된 Mohr-Coulomb 파괴면이 인장측면에서는 적지만 영이 아닌 인장범위를 갖는 파괴면이 가정되어야 한다는 것이다. 그림 1에서,  $q_u$ ,  $\sigma_t$ , c 및  $\phi$ 는 흙의 일축압 축강도, 인장강도, 점착력 및 내부마찰각을 각각 나타낸다.

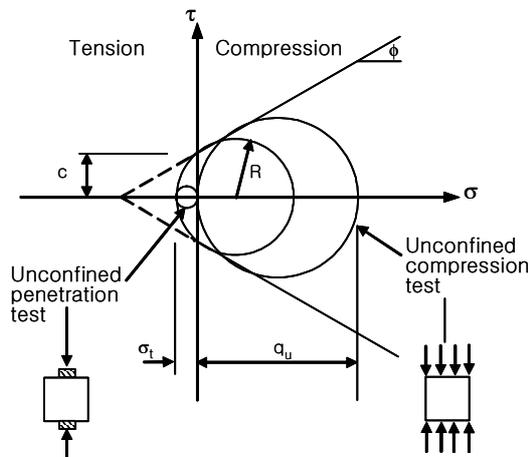


그림 1. 수정된 Mohr-Coulomb 파괴기준

## 2.2 파괴메카니즘

그림 2는 원통형공시체에 대한 양면편칭시험에 의한 이상적인 파괴메카니즘을 나타낸 것이다. 방사선 방향으로 인장균열로 발생되어 있으며 두 개의 콘 형태의 파괴면이 디스크판 바로 밑에 형성이 되어있다. 양쪽에 형성된 콘 형태의 파괴면은 서로 강체처럼 이동하면서 콘 주위의 재료를 양 옆으로 이동시킨다(그림 2(a)). 파괴메카니즘에 대한 속도벡터관계는 그림 2(b)와 같다. 콘 형태의 파괴면을 따라 각 위치에서 상대속도벡터( $\delta w$ )는 파괴면으로부터 내부마찰각( $\phi$ )만큼의 경사를 가지고 작용한다.  $\Delta_R$ 와  $\Delta_D$ 는 각각 상대속도벡터( $\delta w$ )의 수평방향과 수직방향 성분이다. 여기서 불연속면의 면적을 계산하는 것은 간단히 구할 수 있는데, 에너지소멸율은 각 불연속면의 면적에 인장강도  $\sigma_t$ 를 곱하고 거기에 수평방향 속도벡터성분( $\Delta_R$ )을 다시 곱해서 구한다. 외부일률은 하중  $P$ 에 수직방향성분의 속도벡터( $\Delta_D$ )를 곱해서 구한다. 내부에너지소멸율에 대한 외부일률(external work)식은 작용한 힘( $P$ )에 대한 상한 값을 산출할 수 있다.

$$\frac{P}{\pi a^2} = \frac{1 - \sin \phi}{\sin \alpha \cos(\alpha + \phi)} \frac{q_u}{2} + \tan(\alpha + \phi) \left( \frac{bH}{a^2} - \cot \alpha \right) \sigma_t \quad (2)$$

여기서  $\alpha$ 는 미확정된 콘형태 파괴면의 각도이고,  $a$ 는 디스크판의 반지름, 그리고  $b$ 와  $H$ 는 각각 공시체의 반지름과 높이이다 (그림 2).

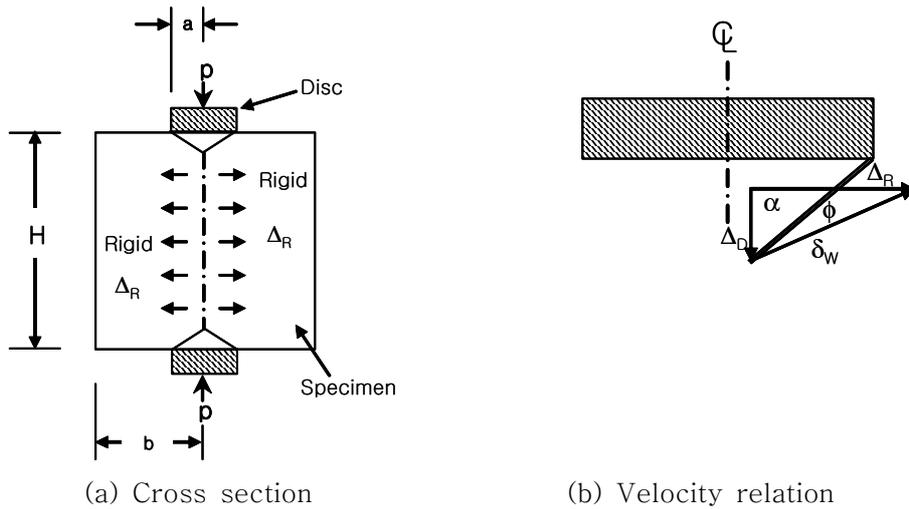


그림 2. 일축관입시험에서의 공시체의 이상적인 파괴메카니즘

상한해는 최소값을 취하면 되는데  $\alpha$ 가 다음의 조건,  $\partial P_u / \partial \alpha = 0$ 을 만족해야 한다.

$$\cot \alpha = \tan \phi + \sec \phi \left[ 1 + \frac{\frac{bH}{a^2} \cos \phi}{\frac{q_u}{\sigma_t} \left( \frac{1 - \sin \phi}{2} \right) - \sin \phi} \right]^{1/2} \quad (3)$$

위 식(3)은  $\alpha \geq \tan^{-1} \left( \frac{2a}{H} \right)$  일 때 유효하며, 위 결과를 이용하여 식 (2)는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$P \leq P^u = \pi(KbH - a^2)\sigma_t \quad (4)$$

식 (4)에서 K는  $\tan(2\alpha + \phi)$ 로 식 (3)에서 볼 수 있는 것과 같이 내부마찰각 뿐만 아니라 압축-인장강도 비, 공시체-디스크 체적 비에도 영향을 받는다.

Chen and Drucker(1969)가 내린 결론처럼 상한해(upper bound solution)는 정해값에 가깝다. 그러므로 모든 흙에 대한 양면편칭시험에서 인장강도를 구하는 하나의 식으로 다음 식이 타당하고도 볼 수 있다. 즉, 식(5)는 양면편칭시험에 대한 인장강도 계산식으로 활용할 수 있다.

$$\sigma_t = \frac{P}{\pi(KbH - a^2)} \quad (5)$$

여기서,  $\sigma_t$  = 인장강도, P = 작용하중, K = 계수 =  $\tan(2\alpha + \phi)$ , H = 공시체 높이, a = 디스크 반경, b = 공시체 반경이다. Fang and Chen(1972)은 Proctor 몰드 공시체를 사용한 경우 K=1을 제시하였다.

### 3. 인장시험

#### 3.1 시료준비

본 연구에 사용된 시료는 경기도 포천 지역에서 채취한 풍화잔적토로서 10번 체를 통과한 시료를 시험에 이용하였다. 시료의 물리적 특성은 표 1과 같다. 표 1에서 A시료는 자연 상태의 시료로서 통일분류상 SM이고 B시료는 A시료에 벤토나이트를 첨가한 인공의 시료로서 통일분류상 SC이다. 이와 같이 준비된 시료에 대한 전단 시 응력-변형률 거동특성을 검토하기 위해 다짐시험에서 구한 최적함수비와 최대건조밀도 조건으로 공시체를 제작하였으며 공시체의 높이와 직경은 각각 127.5mm, 100mm 이다.

표. 1 시료의 물리적 특성

Sample	Compaction		Atterberg Limit		#200(%)	Gs	Li(%)	USCS
	$\gamma_{dmax}(g/cm^3)$	O.M.C (%)	Liquid Limit	Plastic limit				
A 시료	1.76	9.0	N.P		18.6	2.66	2.80	SM
B 시료	1.85	14.9	45.2	15.1	29.2	2.62	-	SC

#### 3.2 인장시험기법

지금까지 흙의 인장강도를 측정하기 위해 개발된 시험방법을 살펴보면 Tschebotarioff et al.(1953)와 Winterkorn(1955)는 개조된 Briquette Gang Model 형태의 시험기를 점토의 인장강도를 측정하기 위해 개발하였고, Leonards and Narain (1963)은 Beam 형태의 인장강도 측정 장치를 방법을 제안하였다. 또한 보편적인 활렬인장시험(split tensile test)형태의 시험기가 콘크리트, 역청콘크리트, 석회로 안정화된 흙, 안정화된 쏘일시멘트등에 폭넓게 사용이 되었다(Breen and Stephens, 1966; 1963; Thompson, 1965; Kennedy and Hudson, 1968). Chen(1970)은 콘크리트의 인장강도를 측정할 수 있는 새로운 양면편칭시험(double punch test)을 제시하기도 하였다. Fang and Chen(1972)과 Fang and Fernandez(1981)는 양면편칭시험 방법을 이론적 실험적으로 흙에 적용시켜 일축관입시험을 제시하였다. Narain and Prakash(1970) 콘크리트나 암에서 인장강도 측정을 위해 사용하는 Brazilian 시험을 다짐 흙에 적용하여 직경압축시험(diametral compression test)을 실시하고도 하였다. 최근에 Kim and Sture(2004)도 불포화 다짐 흙의 인장강도를 측정하는 기기를 개발하기도 하였다. 하지만 인장강도를 측정하는 지금까지 개발된 장치는 여러 가지 구조적 문제점, 예를 들면, 편심, 마찰, 응력집중, 미끄럼 및 변형률 측정 오류 등을 가지고 있었고, 인장강도 계산에 있어서도 문제를 내포하고 있었다.

본 연구에서 다짐된 세립토의 정도 높은 변형특성과 인장강도를 측정하기 위해 주 연구 대상인 일축 관입시험기를 개량한 그림 3과 같은 시험기를 사용하여 실험을 실시하였다. 실험기기와 기법에 대한 설명은 추후 다른 논문을 통해 발표하고자 하며 본 논문에서 인장강도에 영향을 미치는 디스크의 직경 및 재하속도에 대한 선행 실험결과를 고찰하고자 한다.



그림 3. 개량된 일축관입시험기 (Improved Unconfined Penetration test, IUP test)

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 인장강도-변형을 관계

그림 4는 디스크의 크기가 인장강도에 미치는 영향을 검토하기 위한 시험의 결과로서 디스크의 크기에 따른 인장강도-변형을 관계를 나타낸 그림이다. 이때 하중 재하속도는 1.0%/min이다.

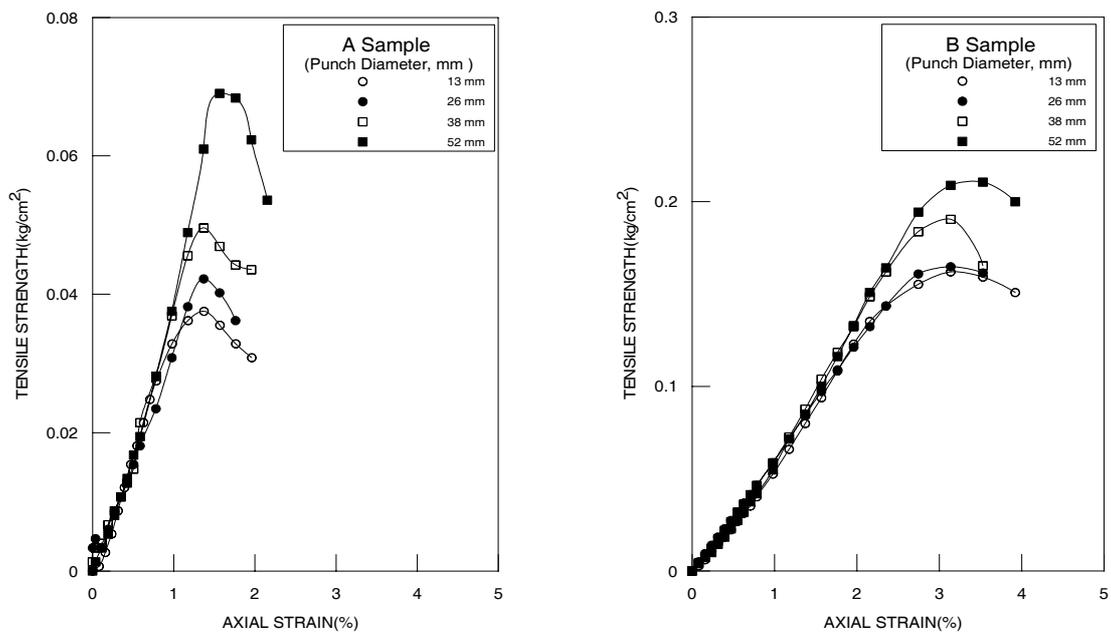


그림 4. 디스크 크기에 따른 인장강도-변형을 관계

그림에 나타낸바와 같이 디스크의 크기가 증가할수록 두 시료 모두 인장강도가 크게 나타나고 있으며, 응력-변형률곡선의 초기 기울기는 실트질 모래인 A시료가 점토질 모래인 B시료에 비해 크게 나타나고 있으며 인장강도는 B시료가 A시료보다 크게 나타나고 있다. 또한 A시료는 변형을 1.5%정도에서 침투강도가 나타나고 매우 뽀족한 형상인 반면에 B시료는 변형을 3% 정도에서 침투강도가 나타나며 다소 완만한 형상을 보인다. 이는 점착력에 기인한 것으로 생각된다.

그림 5는 일축관입시험에 의한 공시체의 파괴형상을 나타낸 그림이다 그림에 나타낸바와 같이 양단이 콘 형과 함께 2-3개의 조각으로 균열이 발생된다. 이러한 파괴 형상은 편칭디스크 직경이 50mm인 경우에는 명확히 보이나 편칭디스크의 직경이 이보다 작으면 이러한 경향이 불명확하게 나타난다.



그림 5. 일축관입시험에 의한 파괴형태

#### 4.2 디스크의 영향

일축관입시험 시 디스크의 크기에 의한 인장강도의 영향을 조사하기 위하여 편칭 디스크의 크기를 13.0, 26.0, 39.0, 52.0mm로 각각 달리하여 시험하였다. 그림 6은 디스크의 크기에 의한 인장강도의 영향을 나타낸 그림으로 두 시료 모두 디스크의 크기가 증가할수록 인장강도가 증가함을 볼 수 있으며 하중재하속도가 큰 경우가 작은 경우보다 확연한 인장강도 증가를 보이고 있다. 또한 편칭디스크의 크기에 의한 인장강도의 증가는 선형적이라 볼 수는 없다. 이 점에 관하여는 좀더 많은 실험을 수행하고 그 결과를 추가하여 하나의 실용적인 식으로 추후에 제안하고자 한다.

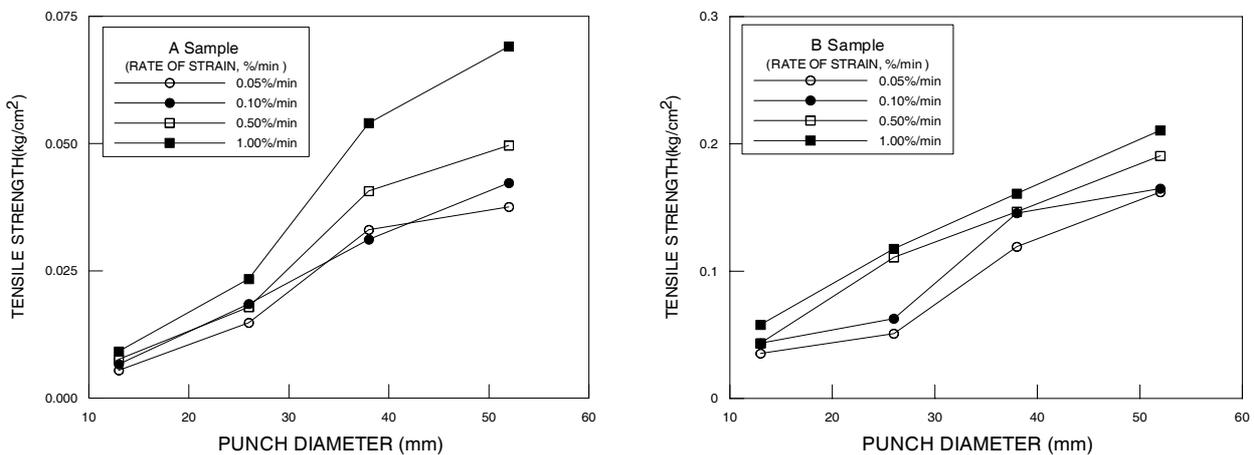


그림 6. 디스크의 크기에 의한 인장강도의 영향

#### 4.3 하중재하속도

그림 7은 하중재하속도가 인장강도에 미치는 영향을 검토하고자 0.05%/min, 0.1%/min, 0.5%/min, 1.0%/min의 하중재하속도로 두 시료에 대하여 편칭디스크의 크기를 각각 달리하여 인장강도 시험을 실시한 것이다. 그림에 볼 수 있는바와 같이 두 시료 모두 편칭디스크의 크기에 무관하게 하중재하속도

가 증가할수록 인장강도가 증가하고 있다. 그 중에서도 펀칭 디스크의 크기가 작은 경우보다 큰 경우가 하중재하속도에 더 큰 영향을 받고 있을 알 수 있으며 시료의 특성에 따라서는 특별히 구별되지 않는 것으로 보인다.

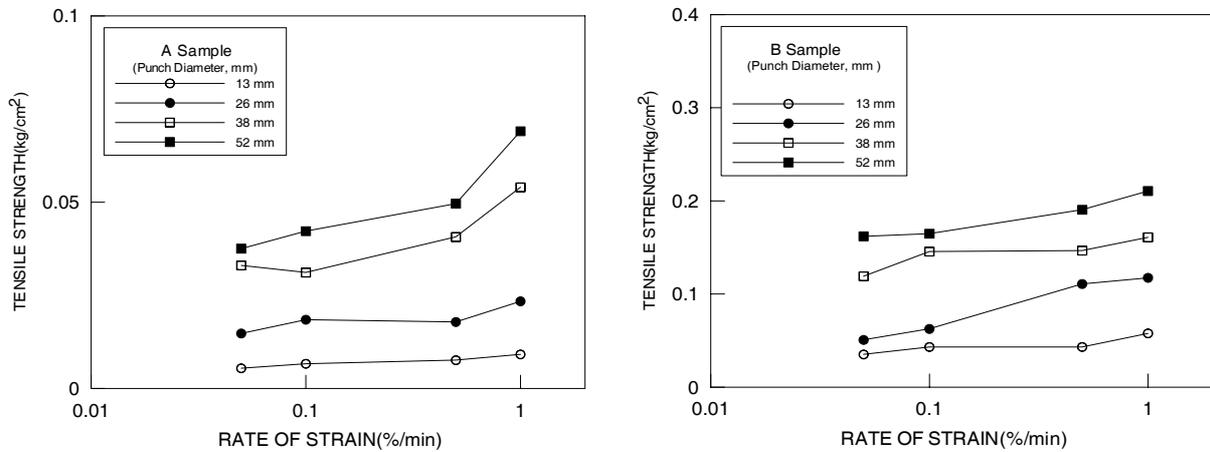


그림 7. 인장강도에 미치는 재하속도와 디스크판의 크기 영향

## 5. 결 론

현재까지 압축강도에 비해 상대적으로 등한시 되어온 흙의 인장강도는 토질역학 분야에서 중요한 강도로 이전의 연구를 살펴보면 중요성을 충분히 알 수 있다. 그래서 본 연구에서는 흙의 인장강도를 측정하는 기존의 시험법중 하나인 일축관입시험을 이론적 실험적 측면에서 고찰하여, 새로운 인장시험법을 개발에 이용하고자 한다.

이론적인 측면에서 일축관입시험은 완전소성이론에 의한 한계이론을 적용하였는데, 이를 위해 흙의 변형에 인장 시 충분한 국부변형이 발생하여야 한다는 것과, 인장부분을 포함한 수정된 Mohr-Coulomb 파괴면이 가정이 되었다. 이 이론은 흙에 적용 가능한 이론이다.

실험적인 측면에서 디스크 직경, 하중재하속도 등이 실험결과에 많은 영향을 미침을 알 수 있는데, 새로운 시험법 개발에 있어 이에 대한 구체적 연구와 개선이 추후 추가 실험을 통해 요구된다. 또한 편심에 오류 영향을 제외시키기 위해 일축관입시험에서 공시체 위와 아래 부분에 접하는 두 디스크와 정렬이 중요한데 이에 대한 개선도 요구된다.

## 감사의 글

이 논문은 한국과학재단의 젊은과학자연구활동지원사업(R08-2004-000-10089-0)에 의해 지원받은 과제이며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- Allen, A. (2001), "Contaminant landfills: the myth of sustainability", Engineering Geology, Vol. 60, pp. 3-19.
- Breen, J. J. and Stephens, J. E. (1966), "Split Cylinder Test Applied to Bituminous Mixtures at Low Temperatures". ASTM, Jour. of Materials, Vol. 1, No. 1, March.
- Chen, W. F. and Drucker, D. C. (1969), "Bearing Capacity of Concrete Blocks or Rock", Jour. of Eng. Mech. Div., Proc. ASCE, Vol. 95, No. EM4, pp. 955-978.
- Chen, W. F. (1970), "Extensibility of Concrete and Theorems of Limit Analysis", Jour. of Eng. Mech. Div., Proc. ASCE, Vol. 96, No. EM3, pp. 341-352.

5. Chen, W. F. (1970), "Double Punch Test for Tensile Strength of Concrete", ACI, Vol. 67, pp. 993-995.
6. Fang, H. Y. and Chen, W. F. (1972), "New Method for Determination of Tensile Strength of Soils", Highway Research Record 354, pp. 62-68.
7. Fang, H. Y. and Fernandez (1981), "Determination of Tensile Strength of Soils by Unconfined-Penetration Test", ASTM STP 740, pp. 130-144.
8. George, K. P. (1970), "Theory of Brittle Fracture Applied to Soil Cement", Jour. of Soil Mech. and Found. Div., Proc. ASCE, Vol. 96, No. SM3, pp. 991-1010.
9. Kennedy, T. W. and Hudson, W. R. (1968), "Application of the Indirect Tensile Test to Stabilized Materials", Highway Research Record 235, pp. 36-48.
10. Kim, T.-H. and Sture, S. (2004), "Effect of Moisture on Attraction Force in Beach Sand", Marine Georesources and Geotechnology, Vol. 22, No. 1-2, pp. 33-47.
11. Leonards, G. A. and Narain, J. (1963), "Flexibility of Clay and Cracking of Earth Dams", Jour. of Soil Mech. and Found. Div., Proc. ASCE, Vol. 89, No. SM2, pp. 47-98.
12. Suklje, L. (1969), Rheological Aspects of Soil Mechanics, Wiley-Interscience, pp. 456-473
13. Thompson, M. R. (1965), "The Split-Tensile Strength of Lime-Stabilized Soils", Highway Research Record 92, 1965, pp. 11-23.
14. Tschebotarioff, G. P., Ward, E. and DePhilippe, A. A. (1953), "The Tensile Strength of Disturbed and Recompacted Soils", Proc, Third Internat. Conf. on Soil Mech. And Found. Eng., Vol. 3, pp. 207-210.