

함수비 변화에 따른 다짐 화강토의 인장강도 특성

Tensile Strength Characteristics of Compacted Granite Soils with Variation of the Molding Moisture Contents

김 찬 기

Kim, Chan Kee

Abstract

The soil samples used in this study were prepared with the residual granite soils passed through the #4 sieve and obtained from Pocheon in Gyeonggi-Ki do. Specifically, five types of samples were prepared. Sample A which is a natural state soil was classified as SM according to the USCS. Samples of B, C, D, and E were prepared by mixing Sample A with bentonite and were classified as SC according to the USCS. The plasticity indexes of samples B, C, D, and E were 15, 25, 30, and 40, respectively. The specimens, whose dimensions are 100mm by 127.5mm, were prepared by A method of ASTM D 698 with the Proctor mold. In experiments, the loading with the 1%/min was applied. Four different disk diameters, 13mm, 26mm, 38mm, and 52mm were used in the Improved Unconfined Penetration (IUP) tests. To compare the tensile strengths, the split tensile tests were also conducted on the same specimens used for the IUP tests. To find out the effects of moisture contents, plasticity Index of specimens on the tensile strength, six different water contents were used for making a specimen.

Keywords : Molding moisture contents, Plasticity index, Tensile strength, Residual granite soil, Improved unconfined penetration test

1. 서 론

토목공사에서 많이 사용되는 화강암질 풍화토는 조성광물의 함유량과 풍화정도에 따라 공학적 성질이 달라지며 강우나 지하수 흐름으로 인하여 물과 접촉하면서 함수비가 높아짐에 따라 안정성이 저하되고 전단강도가 급격히 감소되는 경향을 보인다. 화강암질 풍화토는 조성광물의 함유량 및 풍화정도에 따라서 공학적 성질이 다르게 나타난다. 화강암질 풍화토

를 구성하는 석영, 장석, 운모, 유색광물 중 장석류, 유색광물 등은 풍화에 따라 화학적 성질이 크게 변화하여 점토 화 과정에 이르게 되어 풍화정도에 따라서 흙의 물리적·화학적 특성이 다양하게 나타난다. 이처럼 흙 내부의 습윤 변화, 온도변화, 다짐에 너지의 불균형 등에 의해 지반구조물에는 쉽게 균열이 생성되고 발생된 균열은 진행성파괴 및 초기파괴를 유발하여 궁극적으로 구조물 전체의 안정을 파괴한다. 또한 흙의 인장강도는 압축강도에 비해 상대적으로 그 값이 작고 적합한 측정법의 결여로 인하여 영에 가깝다고 생각하거나 무시되고 있지만 지반구조물에서 흙의 인장특성은 대단히 중요한 요소가 될 수

* 대전대학교 공과대학 건설시스템공학과

† Corresponding author. Tel.: +82-31-539-2021

Fax: +82-31-539-2020

E-mail address: cckim@daejin.ac.kr

있다.

도로포장 및 흙 댐의 경우 재료의 인장강도와 관련된 균열파괴의 중요성은 이미 많은 관심을 불러 일으켰다. Leonards and Narain(1963)은 흙 댐의 균열 거동에 관한 연구결과를 발표하였고 George(1970)는 흙-시멘트의 균열 확장 및 균열 효과에 대해 보고한 바 있으며 Suklje(1969)은 피압수로 인한 굴착 저면 점성토층의 인장균열 가능성과 점성토 저면의 한계동수경사가 전단강도 뿐만 아니라 인장강도에 영향을 받을 수 있음을 보고하였다. Spencer(1968)와 Suklje(1969)은 사면상부에서 나타나는 인장주응력상태를 갖는 크리프나 한계상태의 점성토사면의 경우 인장강도가 사면안정해석과 깊은 관련 있음을 밝혔으며 Fang and Fernandez(1981)는 도로, 사면, 흙 댐 및 제방에서의 인장균열 문제의 중요성을 언급하였다. Kim and Sture (2004)도 불포화 흙의 정확한 거동 해석에 있어 인장강도의 중요성을 지적하였다.

본 연구는 다짐 화강암질 풍화토의 함수비와 소성지수 변화에 따른 인장강도특성을 구명(究明)하기 위하여 정(2006)이 개량한 일축관입시험기(Improved Unconfined Penetration, IUP)를 이용하여 여러 조건에서 시험하였다. 시료는 소성지수를 달리한 A, B, C, D, E 각각에 다짐시험에서 얻어진 최적함수비를 중심으로 6단계의 함수비를 가지도록 표준다짐으로 공시체를 제작하여 함수비 변화와 소성지수 변화에 따른 일축관입시험을 실시하였다. 또한 각각의 조건에 대한 일축관입시험 시 디스크의 크기(D)는 52mm, 38mm, 26mm, 13mm 4종류이며 일축관입시험의 결과를 비교검토하기 위해 할렬인장시험을 하여 풍화 화강토의 함수비 변화와 소성지수변화, 디스크 크기에 따른 인장강도특성을 구명하고자 한다.

II. 기본이론

완전소성이론을 이용한 한계해석으로부터 Chen(1970a)은 식 (1)과 같은 인장강도 계산식을 유도할 수 있음을 보였으며 이 식은 할렬인장시험(Thompson, 1965)에 대한 인장강도 계산식으로 이 식의 기본적인 이론은 선형탄성이론에 바탕을 두고 있다. 여기서 σ_t 와 P는 인장강도와 작용하중이고 L과 d는 공시체의 길이

와 직경이다.

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

Chen은 한계해석에 근거하여 양면펀칭시험(double punch test)법을 개발하였으며 이를 이용하여 콘크리트와 암석에 대한 인장강도를 구하는 식 (2)와 같이 제안하였다(Chen and Drucker, 1969; chen 1970b).

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

여기서 K는 공시체 크기에 관련한 상수이고(Fang and Fernandez, 1981) H는 공시체 높이며 a와 b는 디스크의 반경과 공시체의 반경이다.

콘크리트나 모르타르의 지지력 거동이 흙의 지지력거동과 매우 유사하여 Fang and Chen(1972)은 콘크리트에 적용된 위 이론을 흙에 적용하였다. 그러나 일반적인 한계이론을 흙에 적용하기 위해서는 흙이 완전소성체로 인장 및 압축 시 충분한 국부변형이 발생하여야 한다는 것과 Fig. 1처럼 압축측면에서는 수정된 Mohr-Coulomb 파괴면이 인장측면에서 적지만 영이 아닌 인장범위를 갖는 파괴면이 가정되어야 한다는 두 가지 가정을 만족하여야 한다. Fig. 1에서, q_u , σ_t , c 및 ϕ 는 흙의 일축압축강도, 인장강도, 점착력 및 내부마찰각을 각각 나타낸다.

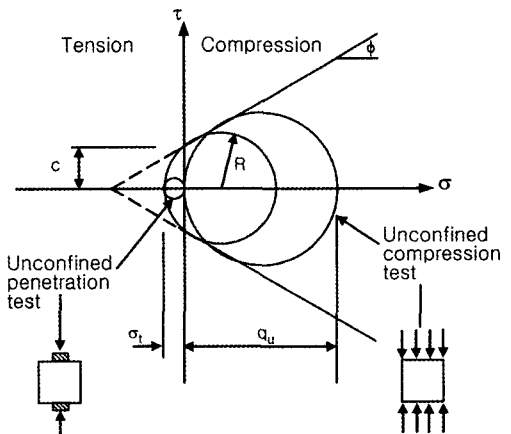


Fig. 1 Modified Mohr-Coulomb criterion

Fang and Fernandez(1981)는 Chen의 양면편칭 시험법을 개량하여 CBR시험과 다짐시험을 활용하여 흙의 인장강도를 측정할 수 있는 일축관입시험법을 제안하였다. 여기서 다짐 몰드를 공시체로 사용한 경우 인장강도를 구하는 식 (2)에서 K값은 1을 제안하였다.

III. 시 험

1. 재료 및 시험방법

사용된 시료는 경기도 포천 지역에서 채취한 화강 암질 풍화토로서 Fig. 2와 같은 입도분포를 갖는 시료를 이용하였다. 소성지수가 다른 5종류의 시료를 제작하기 위하여 실트질 모래로 분류되는 자연 상태의 시료에 벤토나이트를 첨가 하였다. A시료는 자연 상태의 시료이며 B, C, D, E시료는 A시료에 벤토나이트를 중량비가 5%, 7%, 9%, 12%정도 첨가하여 소성지수가 15, 25, 30, 40이 되도록 만든 시료로서 통일분류상 실트질점토이다. 시료의 물리적 특성은 Table 1과 같고 시험에 이용한 공시체는 높이와 직경이 각각 127.5mm, 100mm이고 표준다짐으로 성형하였다. 일축관입시험에 사용한 디스크의 크기는 52 mm, 38mm, 26mm, 13mm 4종류이며 일축관입시험의 결과를 비교검토하기 위해 할렬인장시험을 하였다. 공시체의 함수비 변화는 다짐시험에서 얻은 최적함수비를 기준으로 6단계의 함수비로 변화하여 공시체를 제작하였다. 김(2005)의 연구결과에서 전단속도가 1.0%/min일 때 인장 및 압축 시 충분한 국부 변형이 발생하며 공시체의 편칭파괴형상이 가장 명확히 나타나므로 전단속도를 1.0%/min로 하였다.

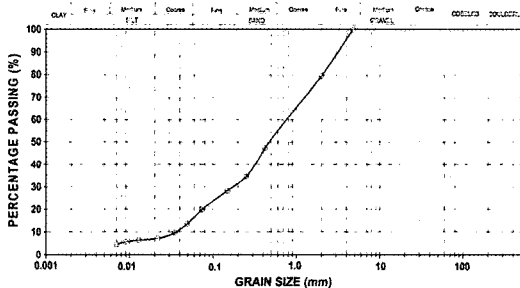


Fig. 2 Grain size distribution of Pocheon weathered granite soil

Table 1 Physical properties of samples

| Sample | Compaction | | Plastic Index (%) | Gs | USCS |
|--------|-------------------------|-----------|-------------------|------|------|
| | $\gamma_{dmax}(g/cm^3)$ | O.M.C (%) | | | |
| A | 1.84 | 12.7 | N.P | 2.64 | SM |
| B | 1.69 | 13.8 | 15 | 2.61 | SC |
| C | 1.65 | 14.5 | 25 | 2.60 | SC |
| D | 1.57 | 15.7 | 30 | 2.59 | SC |
| E | 1.54 | 16.0 | 40 | 2.57 | SC |

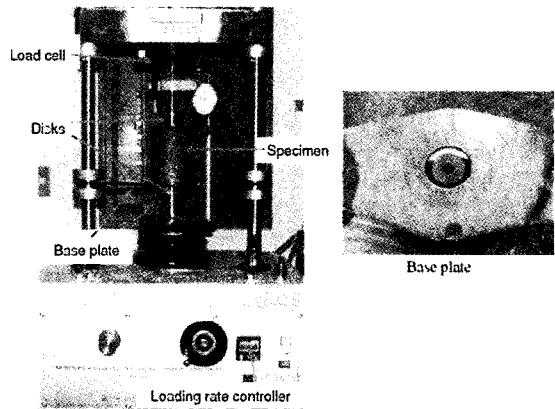


Fig. 3 Improved unconfined penetration test

Fig. 3의 일축관입시험기는 정(2006)에 의해 개량된 시험기로서 지금까지 개발된 시험기의 여러 가지 구조적 문제점, 예를 들면, 편심, 마찰, 응력집중, 미끄럼 및 변형률 측정 오류 등을 가지고 있었고, 인장강도 계산에 있어서도 문제를 내포하고 있었던 여러 가지 문제점을 개선한 시험기이다.

IV. 결과 및 고찰

1. 응력-관입을 관계

다짐 화강암질 풍화토의 함수비 변화에 따른 강도 특성을 구명하기 위하여 소성지수를 15, 25, 30, 40인 시료에 함수비를 6단계로 각각 달리한 일축관입 시험을 실시하였다. Fig. 4는 소성지수 30%일 때 함수비 변화에 따른 응력-관입을 관계를 나타낸 것으로서 Fig. 4(a)는 함수비 3.4%, (b)는 12.6%, (c)는 17.7%인 경우의 관입 디스크의 그기에 따른 응력-관입을 관계를 나타낸 것이다. 그림에 나타난바와 같

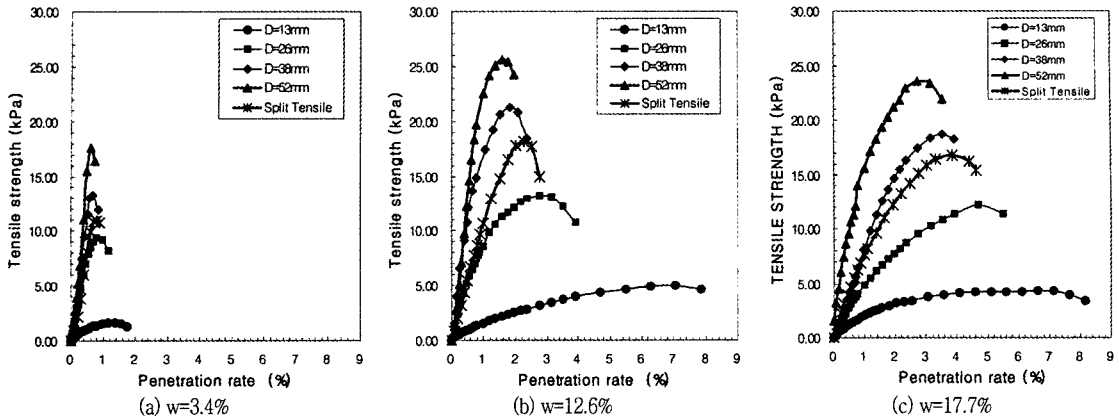


Fig. 4 Tensile stress-penetration rate curve(PI = 30%)

이 함수비가 증가함에 따라 인장강도가 증가하며 최적함수비를 넘어서면 최대인장응력이 작아지는 것을 알 수 있다. 또한 함수비가 증가하여 최적 함수비에도달할 때까지 강도는 증가하지만 응력-관입률곡선의 접선계수는 점점 작아지는 것을 알 수 있다. 또한 디스크의 크기가 증가할수록 인장강도가 크게 나타나고 있으며 디스크 직경에 대한 강도변화의 정도를 알아보기 위해 할열 인장시험을 함께하여 비교하였다. 그 결과 디스크의 직경이 26mm와 36mm인 경우가 할열 인장시험의 결과와 유사하게 나타나고 있다.

또한 인장강도 계산은 식 (2)에서 $K=1$ 을 적용할 수 있는 조건으로 디스크의 크기가 공시체 직경과 디스크의 직경비가 0.2~0.3이내이고 공시체의 높이와 직경비가 0.46~1.0이면 어떤 크기의 공시체나 디스크를 사용할 수 있다고 하였다(Fang and Fernandez, 1981). 그리고 공시체가 파괴 시 2~3개정도로 균열이 발생해야 $K=1$ 을 적용할 수 있다고 하였다. Fig. 5는 개량된 일축관입시험에 의한 공시체의 파괴형상으로 그림에 나타난바와 같이 양단에 콘 형과 함께 3개의 균열이 발생하였다. 이는 흙이 완전소성체로 인장 시 충분한 국부변형이 발생하였다는 것을 의미한다. 특히 이러한 현상은 디스크의 직경이 26mm와 38mm인 경우가 매우 명확히 나타남을 알 수 있었다. 그러므로 표준 다짐물드를 사용하여 공시체를 제작할 경우의 디스크의 크기는 26mm~38mm가 적당하리라 생각된다.

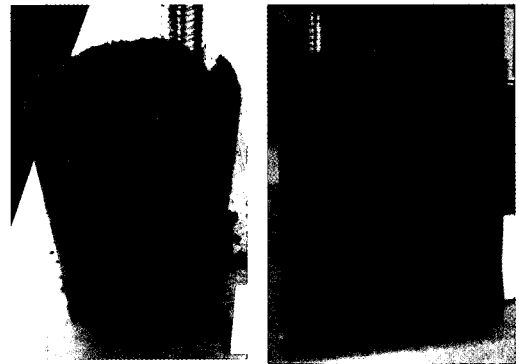


Fig. 5 Mode of crack and failure

Fig. 6은 각각의 소성지수에 대한 함수비 변화에 따른 인장응력과 관입률의 관계를 나타낸 것으로 이때 디스크의 직경은 4 종류로 각각 달리였으며 이중 38mm인 경우만을 그림에 나타내었다. 그림에 나타난바와 같이 소성지수가 0인 경우는 함수비 변화에 따라 인장강도의 변화가 비교적 적게 나타나고 소성지수가 15와 30인 경우는 함수비 변화에 따른 인장강도의 변화가 확연히 나타나며 소성지수가 40인 경우도 유사한 경향을 보이고 있다. 그리고 소성지수가 작은 경우는 최적함수비보다 다소 큰 함수비에서 최대 인장강도를 나타내며 소성지수가 큰 경우는 최적 함수비 부근에서 최대 인장강도가 나타난다.

Fig. 7은 소성지수와 함수비를 각각 달리한 상태에서 디스크의 직경이 38mm로 일축관입시험과 할열 인장시험을 실시하여 파괴 시 관입률의 관계를 비교한 것이다. 그림에 나타난바와 같이 파괴 시 관입률

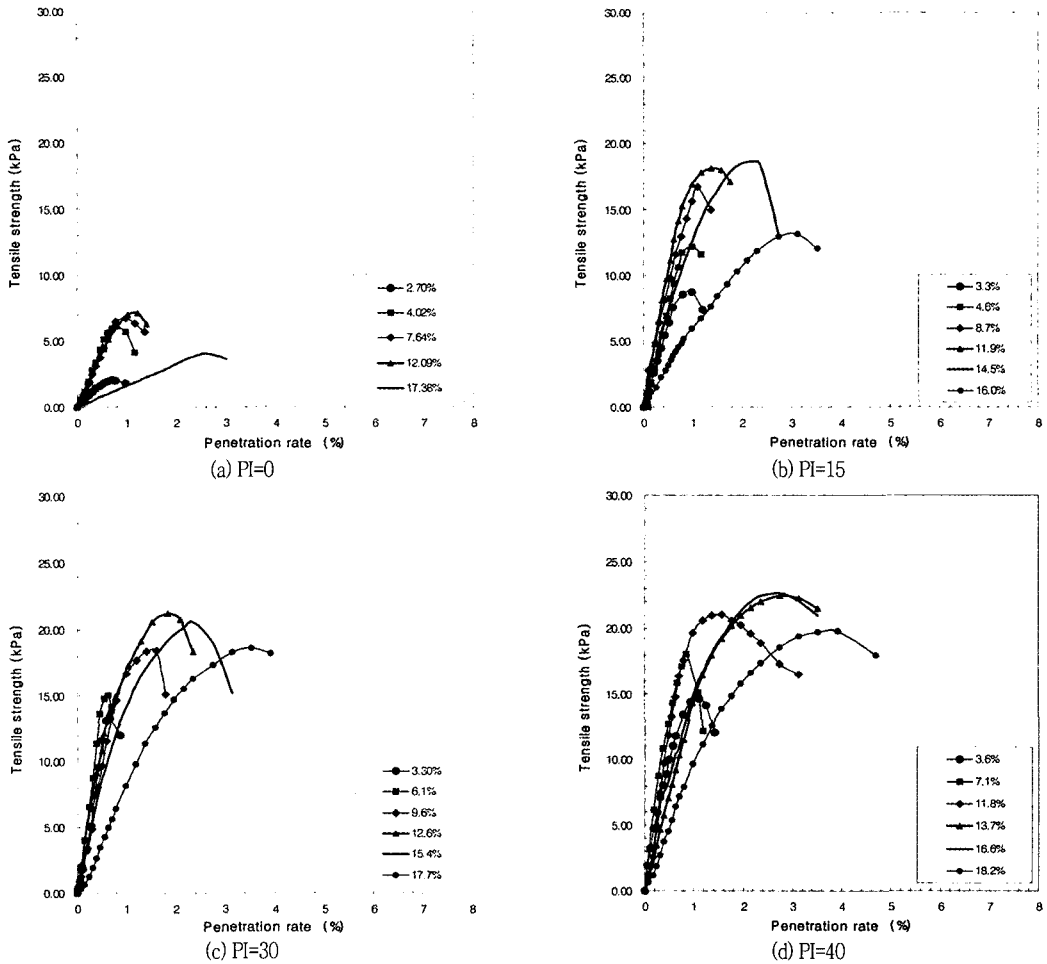


Fig. 6 Tensile stress-penetration rate curve for various molding moisture contents(D=38mm)

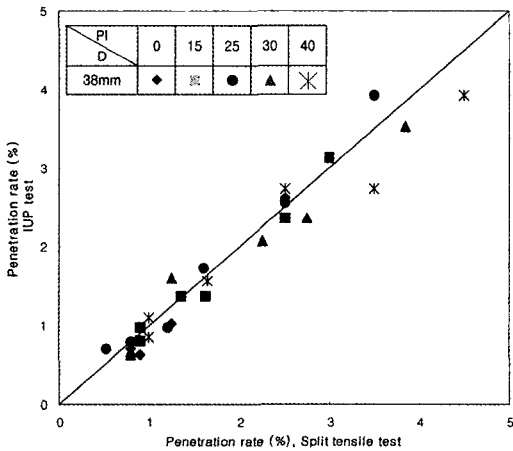
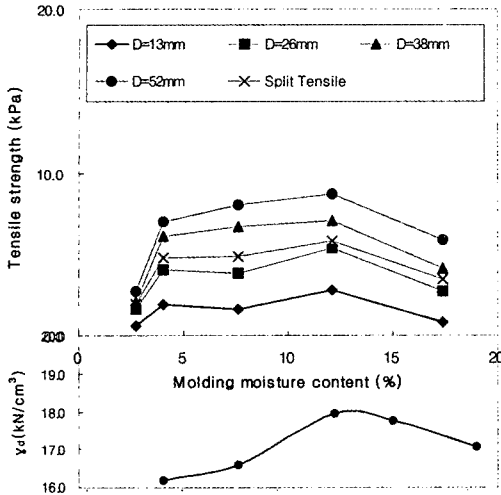


Fig. 7 Comparison of the penetration rate at failure by IUP tests and split tensile tests

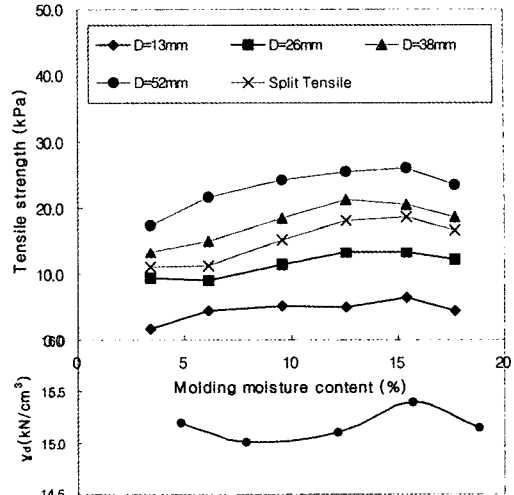
이 일직선상에 나타나는 것으로 보아 본 연구에서 실시한 일축관입시험의 결과를 신뢰하여도 좋을 것으로 판단한다.

2. 인장강도특성

Fig. 8은 소성지수가 0%와 30%인 시료의 함수비에 따른 인장강도의 관계를 다짐곡선과 함께 나타낸 것이다. 그림에 나타난 바와 같이 디스크의 크기가 커질수록 인장강도는 증가하고 있으며 디스크의 크기가 13 mm와 52 mm인 경우의 인장강도는 할열시험의 결과와 다소 차이를 보인다. 반면에 디스크의 크기가 26 mm와 38 mm인 경우의 인장강도는 할열시험의 결과와 비교적 잘 일치하고 있다. 또한 디스크



(a) PI=0%



(b) PI=30%

Fig. 8 Relationships between tensile strength and molding moisture contents for various disk size

의 크기에 무관하게 최적함수비에서 최대인장강도를 나타내고 있으며 소성지수가 클수록 최대인장강도가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 소성지수 변화에 따른 인장강도의 변화를 각각의 소성지수에서 공시체의 함수비가 최적함수비 상태이고 디스크의 직경이 26mm와 38mm인 경우의 인장강도를 나타낸 그림이다. 그림에 나타난바와 같이 소성지수가 증가함에 따라 인장강도가 증가하는 경향을 보이고 있으며 이는 Fang and Chen (1972) 이 보고한 결과와도 일치하고 있다.

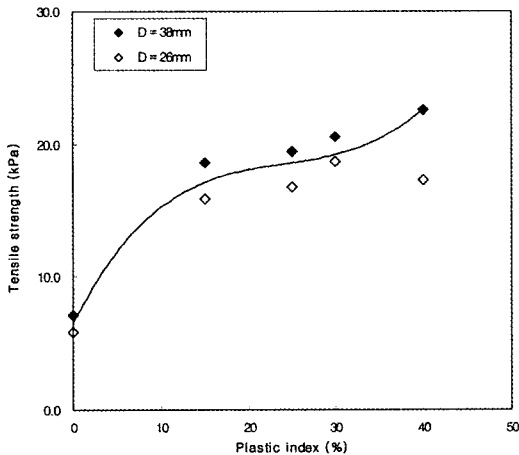


Fig. 9 Relationships between tensile strength and plasticity index

Fig. 10은 일축관입시험과 할열인장시험에서 결정된 인장강도를 서로 비교한 것이다. 그림은 각각의 소성지수에 대하여 함수비를 6종류로 달리하였고 관입 디스크 직경은 4종류로 달리하였으며 그 중 디스크의 직경이 26 mm와 38 mm인 경우를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 측정된 인장강도가 서로 잘 일치하고 있다. 특히 최적함수비 부근에서 두 시험의 대응성은 매우 양호해 보인다. 그러므로 일축관입시험을 이용하여 할열인장강도를 결정하여도 실용상 문제가 없을 것으로 생각되며 할열인장시험을 이

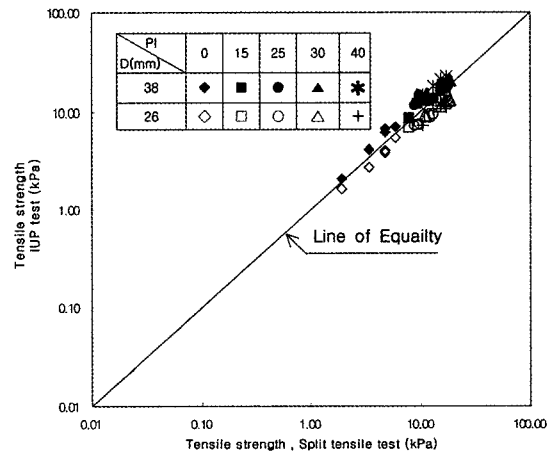


Fig. 10 Comparison of the tensile strength by IUP tests and split tensile tests

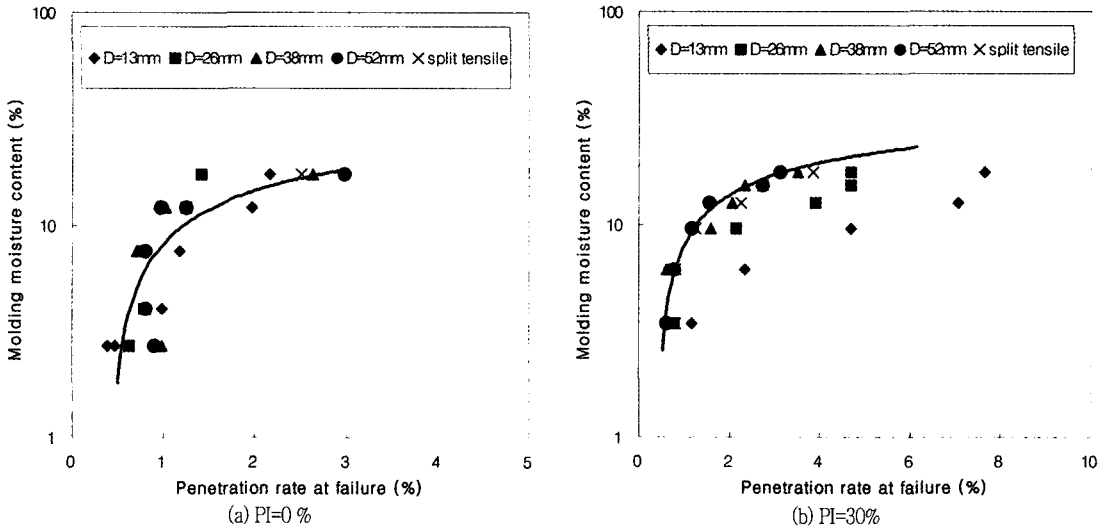


Fig. 11 Relationships between penetration rate at failure and molding moisture content for various disk size

용한 신뢰성의 검토 방법은 Fang and Chen (1972)이 실트질 점토에 대하여 사용한 방법이며 콘크리트, 점성콘크리트 등에 대한 시험 결과도 평가한 방법이다.

Fig. 11은 각각의 디스크에서 함수비 변화에 따른 파괴관입률의 변화를 나타낸 것이다. 그림에 나타난 것과 같이 최적함수비보다 작은 함수비에서의 파괴관입률은 함수비가 작을수록 작게 나타나며 최적함수비 부근을 기준으로 최적함수비 이후에서는 파괴관입률이 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 그리고 소성지수가 큰 경우가 작은 경우에 비해 함수비 변화에 따라 파괴 관입률의 변화가 크게 나타나고 있다. 또한 디스크의 크기가 작은 경우에는 함수비가 증가함에 따라 파괴관입률도 함께 증가하는 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 연구는 다짐 화강토의 소성지수를 달리한 5종류의 시료를 각각 다짐시험에서 얻어진 최적함수비를 중심으로 6단계의 함수비를 가지도록 공시체를 제작하여 함수비 변화와 소성지수 변화에 따른 일축관입시험을 실시하였다. 또한 각각의 조건에 대한 일축관입시험 시 디스크의 크기는 4종류이며 일축관입시험의 결과를 비교검토하기 위해 할열인장시험을 함께하여 다짐 화강토의 함수비 변화와 소성지수변화,

디스크 크기의 변화에 따른 인장강도특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 소성지수가 작은 경우보다 큰 경우가 함수비의 변화에 따라 인장강도가 크게 변화한다. 그리고 소성지수가 작은 경우는 최적함수비보다 다소 큰 함수비에서 인장강도가 측정되며 소성지수가 큰 경우는 최적함수비 부근에서 인장강도가 나타난다.
- 2) 디스크의 크기에 무관하게 최적함수비에서 최대인장강도를 나타내고 있으며 소성지수가 클수록 최대인장강도가 크게 나타나는 것을 알 수 있다.
- 3) 일축관입시험과 할열인장시험에서 결정된 인장강도와 파괴 시 관입률을 비교한 결과 서로의 대응성이 매우 양호하므로 흙의 인장강도시험 방법으로 일축관입시험을 활용해도 좋을 것으로 판단된다.
- 4) 일축관입시험에 의한 공시체의 파괴형상은 양단에 콘 형과 함께 3개의 균열이 발생하였으며 디스크의 직경이 26mm와 38mm인 경우 매우 명확히 나타나므로 표준 다짐물드를 사용하여 공시체를 제작 할 경우 이 크기를 추천한다.

본 연구는 2006학년도 학술연구비지원에 의해 이루어진 것이며 이에 감사드립니다.

References

1. Chen, W. F. and Drucker, D. C., 1969, Bearing Capacity of Concrete Blocks or Rock, *Journal of Engineering Mechanics Division, Proc. ASCE*, 95(EM4) : 955-978.
2. Chen, W. F., 1970a, Double Punch Test for Tensile Strength of Concrete, *ACI*, 67 : 993-995.
3. Chen, W. F., 1970b, Extensibility of Concrete and Theorems of Limit Analysis, *Journal of Engineering Mechanics Division, Proc. ASCE*, 96(EM3): 341-352.
4. Fang, H. Y. and Chen, W. F., 1971, New Method for Determination of Tensile Strength of Soils, *Highway Research Record* 354: 62-68.
5. Fang, H. Y. and Chen, W. F., 1972, Further Study of Double-Punch Test for Tensile Strength of Soils, *Third Southeast Asia Conference on Soil Engineering, Hong Kong*: 211-215.
6. Fang, H. Y. and Fernandez, 1981, Determination of Tensile Strength of Soils by Unconfined-Penetration Test, *ASTM STP* 740 : 130-144.
7. George, K. P., 1970, Theory of Brittle Fracture Applied to Soil Cement, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division Proc. ASCE*, 96(SM3): 991-1010.
8. Jung, S. J., Kim, T. H., Kim, C. K., 2006, Tensile strength measurement on compacted sand-bentonite mixtures, *Journal of the Korean Society of Civil Engineering*, 26(6c): 377-384.
9. Kim, C. K., Kim, T. H., Kwon, Y. S., Kook, H. S., 2005, Characteristics of tensile strength of compacted grained soils by improved unconfined penetration test, *Proceedings of the Conference of the Korean Society of Civil Engineering* : 5377-5380.
10. Kim, T. H. and Sture, S., 2004, Effect of Moisture on Attraction Force in Beach Sand, *Marine Georesources and Geotechnology* 22(1-2): 33-47.
11. Leonards, G. A. and Narain, J., 1963, Flexibility of Clay and Cracking of Earth Dams, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Proc. ASCE*, 89(SM2): 47-98.
12. Spencer, E., 1968, Effect of tension of stability of embankment, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE*, 94 (SM5): 1159-1173.
13. Suklje, L., 1969, *Rheological Aspects of Soil Mechanics*, Wiley-Interscience : 456-473
14. Thompson, M. R., 1965, *The Split Tensile Strength of Lime-Stabilized Soils*, *Highway Research Record* 92 : 11-23.