

약액으로 고결된 모래 지반의 수압파쇄에 관한 연구

A Study on Mechanism of Hydrofracturing in Gelled Sandy Ground

천 병 식*
Chun, Byung Sik

Abstract

The mechanism of hydraulic fracturing in sandy soil is elucidated by investigating the relation among the hydrofracturing pressure(P_f'), the confining pressure(σ_3'), the tensile strength of gelled sand(σ_t), and the permeability of sand(k) through many injection tests on several kinds of sand.

要 旨

약액주입시 사질지반에서 발생하는 수압파쇄의 발생기구를 설명하기 위하여 여러가지 고결사에 대해 많은 주입시험을 행하여 할렬압(P_f')과 구속압(σ_3'), 고결사의 인장강도(α), 투수계수(k)등과 상관관계를 구하였다.

1. 序 論

토중의 국부적인 수압의 증가가 지반의 파괴를 가져오는 경우가 있다. 이것은 Hydrofracturing (또는 Hydraulc fracturing)으로 알려진 지반의 할렬 현상 (또는 수압파쇄현상)이다. 이 현상은 투수성이 작고 또한 인장강도가 큰 암석등을 주 연구 대상으로 하여 왔으며 할렬발생은 주입공벽 주변의 인장파괴에 기인하는 것으로서 투수성이 크고 인장강도가 비교적 작은 경우 파괴지반의 할렬현상에 대해서는 공학적으로 그다지 문제가 되지 않았고 따라서 이에 관한 연구도 다소 미진한 감이 없지않았다. 그러나 최근 국내외에서 연약지반처리 또는 근접시공에서 차수목적등으로 약액주입공법이 다

양하게 쓰여짐에 따라 곳곳에서 수압파쇄등의 문제점이 야기되고 있다.

더욱 8개 석탄 화력발전소에서 산업폐기물로 부산되는 석탄회를 해안 매립·성토재 또는 고속도로 성토 및 노반재로의 활용을 위한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있는바 부족한 석탄회 지반의 강도증대 또는 방전등의 목적으로 여러가지 화학약액의 원활한 사용을 위해서는 이러한 문제점을 해결할 수 있어야 한다.

따라서 본 연구는 위와 같은 파괴지반에 있어서 할렬발생 원인의 해명을 목적으로 고결사를 대상으로 할렬발생압에 미치는 주입가압속도, 액의점성, 모래의 투수성, 밀도 등의 영향을 실험적으로 검토한 것이다. 더욱, 여기에서 대상으로 하는 할렬압이

*정회원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수.

란 주입공 주변에 할렬을 발생시키는 데 필요한 압력으로 한정하며 할렬이 더욱 신장되어 멀리 진전시키는 압력은 대상에서 제외한다.

2. 기존의 연구

결합력이 고도로 발달한 암석을 대상으로 하는 할렬현상에 관한 연구는 광물자원의 탐사방법으로⁽¹⁾ Hydrofracturing이 적극적으로 이용되고 있어 지금까지 많이 연구되어 왔다. Haimson & Fairhurst⁽²⁾나 Medlin & Masse⁽³⁾는 액의 침투에 따르는 공극수압의 증가를 고려하여 할렬압이 식(1), (2)로 나타낼 수 있음을 밝힌 바 있다.

$$\text{비침투형: } P_f - u_o = 3\sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_1 \quad (1)$$

$$\text{침투형: } P_f - u_o = \frac{3\sigma_2 + \sigma_3 + \sigma_1}{2 - \alpha \left[\frac{1 - 2\nu}{(1 - \nu)} \right]} \quad (2)$$

여기서, P_f : 할렬압

u_o : 초기공극수압

σ_2 : 중간유효 주응력

σ_3 : 최소유효 주응력

σ_1 : 인장강도

α : 비오정수

ν : 포아손비

그러나 식(1), (2)에서 쓰여지는 인장강도는 암석의 인장강도(일축인장시험 또는 Brazilian test)의 실험치 보다 크고 할렬압은 주입가압속도 등의 영향을 받는다고 보고되고 있다^(4, 5) 原田등⁽⁶⁾은 정적파쇄체에 의한 콘크리트의 할렬현상을 평균응력설에 기준하여 조사하였고 赤井⁽⁷⁾등은 투수성 연암의 할렬압을 조사한 바 있다. Lockner & Byerlee⁽⁸⁾는 높은 구속압에서 큰 축차응력이 작용하고 있는 조건하에서는 암석의 할렬을 구멍주변의 인장파괴 보다 오히려 전단파괴에 의하여 발생한다고 지적하고 있다.

Bjerrum등⁽⁹⁾이 원위치투수시험에 있어서 투수성에 미치는 할렬의 영향을 발표한 이래 토질공학에 있어서도 할렬현상은 중요한 문제로 되어 왔다. Massarsch & Broms⁽¹⁰⁾은 할렬현상은 토질안정의 응용에 대하여 기술하였다. Morgenstern & Vaughan등⁽¹²⁾은 주입에 따른 공극수압의 변화를 고려하여 주입공 주변의 흙의 전단파괴가 할렬을 발생시킨 것으로 가정하여 주입시의 허용주입압을 명확히 규정한 바 있다. Horsrud등⁽¹³⁾은 침투에 따

른 소성영역의 발생을 고려하여 할렬발생을 3차원 응력상태의 것으로 이론적으로 해석하였고 福島은 fill dam core재의 할렬현상을 조사한 바 있다⁽⁶⁾.

Jaworski등⁽¹⁵⁾은 다짐흙에 대한 할렬시험을 행하여 전응력표시의 할렬압 P_f 가 식(3)으로 나타내어짐을 보였고 Vauhan⁽¹⁶⁾은 식(3)의 정수 m 은 1~2범위에 있음을 보고하였다.

$$P_f = m\sigma_h + \sigma_u \quad (3)$$

여기서, m : 정수

σ_h : 축압

σ_u : 결보기 인장강도

여기서 σ_h 는 $P_f \sim \sigma_h$ 그림에 있어서 선형관계가 성립할 경우의 직선부의 종축 P_f 의 절편이며 그 크기는 흙의 전단강도 보다 매우 크고 σ_u 의 역학적 의미는 불명확하다.

필자^(7, 8)은 포화점성토의 할렬압을 실험적으로 조사한 결과 할렬방향은 주입공에 대해 반대방향의 균열이 생기는 수직할렬 만이 아니고 경사 및 수평방향의 할렬이 발생한다는 것을 밝힌 바 있다. 그래서 할렬압 P_f 는 할렬방향에 관계치 않고 토층의 최소주응력을 σ_{min} 점성토의 일축강도를 q_u 로 하면 전응력표시로 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f = \sigma_{min} + q_u \quad (4)$$

3. 고결사의 할렬발생압

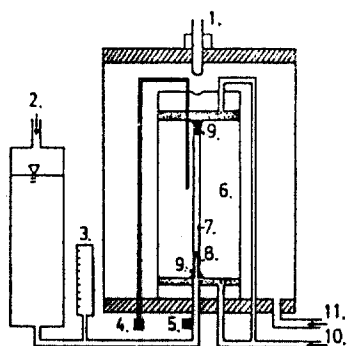
3.1 공시체의 제작

자연지반으로 부터 고결된 균질한 사질토를 샘플링 하는 것은 매우 곤란하므로 물유리 약액을 써서 모래를 고결시킨다. 고결사 공시체의 투수계수는 삼축투수시험에 의해 구하여 $k = 1 \times 10^{-7}$ (cm/sec), 1×10^{-5} (cm/sec)의 2종류를 사용하였으며(표-1 참조) 직경 75mm, 높이 150mm 로서 2개로 분할된 mold에 주입공용 직경 4mm 파이프를 세워서 35% 물유리 약액을 넣고 이 속에 건조사를 낙하투입하여 소정의 공극비가 얻어지도록 다져서 제작 한다. 시료 상부에는 공극수압 측정목적은 직경 3mm 파이프를 주입공으로 부터 5mm의 위치에 삽입한다. 또한 공시체의 일축강도나 인장강도(Brazilian test)를 구한다.

공시체는 고결시켜 1일간 수증양생한 공극수압측정용 파이프를 삽입하여 공시체에 고무스리브를 씌

표 1. 고결사의 종류

시료	일축강도 σ_0 (kgf/cm ²)	인장강도 σ_t (kgf/cm ²)	투수계수 k (cm/sec)
고결사A	3.80	0.45	1×10^{-7}
고결사B	2.30	0.25	1×10^{-5}



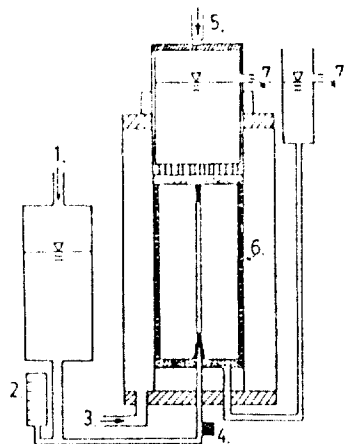
1. 축압 2. 주입가압 3. 유량계 4. 간극수압계 5. 주입압
6. 공시체 7. 보어호울(내경 4mm) 8. 주입파이프 9. 프라스틱점토 10. 배압 11. 축압

그림 1. 고결사 A의 할렬실험장치

우고 구속압과 배압(back pressure)을 작용 시킨다. 압밀 완료 후 주입 파이프로부터 Rhodamine 착색액을 사용하고 주입압을 높여 간다. 주입 가압속도 P_R 은 0.01 kgf/cm^2 씩 단계적으로 올리며 주입속도는 flow-meter로 측정하고 공극수압 및 주입압을 측정한다. 할렬압의 결정은 주입압과 주입량의 관계에 있어서 급격한 유량증가점에 맞는 주입량을 할렬압으로 한다.

$k = 1 \times 10^{-5} \text{ (cm/sec)}$ 은 공시체는 약액과 모래를 소정의 배합으로 불포화 ($S_r = 80\%$)상태로 혼합시켜 제작하였다. 공시체의 투수성이 좋고 가압주입하면 할렬시에 상당한 액이 유출하는 바 주입수를 자유로이 배수시키기 위한 검토가 필요하다. 그림 2에서와 같이 공시체의 둘레벽에 두께 5mm의 배수층을 설치하였다. 주입액은 이 층을 통하여 cell 밖으로 배출 된다. 따라서 이 시험에서 배압은 항상 0으로 된다. 주입가압속도는 0.01 kgf/cm^2 을 5, 30초 간격으로 단계적으로 올린다. 공시체의 직경, 높이는 각각 65mm, 120mm이다.

구속압을 σ_3 , 구멍벽의 공극수압을 u , 고결사의 인장강도를 σ_t 로 하면 주입전의 구멍벽에 작용하는 할렬저항압 σ_R 은 두꺼운 pipe의 탄성론⁽⁹⁾에 의해



1. 주입가압 2. 유량계 3. 축압 4. 유입압 5. 축압 6. 배수층 7 over flow

그림 2. 고결사 B의 할렬실험장치

다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_R = \sigma_3 + \sigma_t - u \quad (5)$$

또, 주입압 P 에 의해 생긴 공벽의 인장응력은 $\sigma_0 = P$ 로 된다. 따라서, 공벽의 인장파괴가 할렬을 일으킨다고 가정하면 할렬발생시의 주입압 P 는 σ_R 과 같게 된다.

할렬시의 공벽의 공극수압 u 는 시료토의 투수성 등에 따라 다르나 주입압 P 와 배압 u_0 의 사이에 있으며 따라서 유효할렬압 $P'_1 (= \text{할렬압 } P_1 - \text{배압 } u_0)$ 의 상한치, 하한치는 주입전의 유효구속압을 $\sigma'_3 (= \sigma_3 - u_0)$ 로 하면 식(6), (7)로 나타낼 수 있다.

$$u = u_0 \text{에서; } P'_1 = 2\sigma'_3 + \sigma_t \quad (6)$$

$$u = P_1 \text{에서; } P'_1 = \sigma'_3 + \sigma_t/2 \quad (7)$$

그림 3은 투수성이 작은 고결사 A의 할렬압 P'_1 와 구속압 σ'_3 의 관계를 나타낸다. 할렬압은 σ'_3 의 극히 작은 범위를 제외하고 식(6), (7)로 나타난 공벽의 인장파괴에 기준하여 할렬압의 상한선과 하한선 사이에 있다.

주입가압속도가 작아지면 할렬압도 작게 되나 이

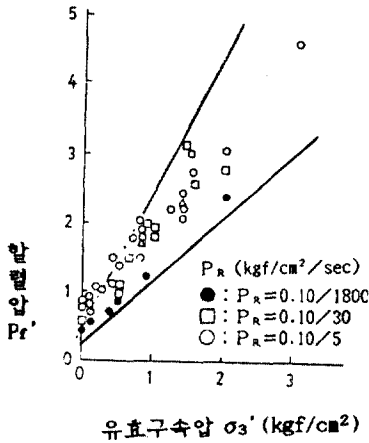


그림 3. 고결사 A의 할렬압과 구속압의 관계

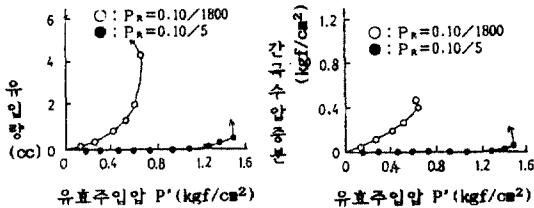


그림 4. 고결사 A의 가압과정의 주입압 P와 유입량 V, 공극수압변화의 관계 ($\sigma_3' = 0.60 \text{ kgf/cm}^2$)

것은 P가 작을수록 주입공 주변의 공극수압이 증가하여 식(7)의 성립하는 조건이 얻어지기 쉽기 때문이다. 그림 4에는 유입량 V와 주입공으로부터 수평거리 5mm 위치에서 측정된 공극수압의 증분 u_s' 와 유효주입압 P'에 미치는 주입가압속도 P_R 의 영향을 나타낸 것이다. $P_R = 0.01/5 (\text{kgf/cm}^2/\text{s})$ 에서는 u_s' 는 대략 변화하지 않으나 한 편 $P_R = 0.01/1800 (\text{kgf/cm}^2/\text{s})$ 에서는 u_s' 는 가압중 크게 증가한다.

표 2는 투수계수 $k = 1 \times 10^{-5} (\text{cm}/\text{sec})$ 의 고결사 B의 실험결과를 나타낸 것이다. 고결사 B의 인장강도는 고결사 A에 비하여 매우 작음에도 불구하고 할렬압은 동등 또는 그 이상으로 되었다. 이것은 투수성이 작지 않는 한 할렬은 공벽의 인장파괴에 의해서만 발생하지 않고 여분의 압력이 필요함을 뜻한다.

이상은 주입액에 물을 사용한 실험에 의한 할렬

표 2. 고결사의 할렬압에 따른 투수성의 영향

시료	구속압 σ_3' (kgf/cm ²)	가압속도 P_R (kgf/cm ² /sec)	할렬압 P_c (kgf/cm ²)
고결사A	0.0	0.10/5	0.75
고결사B	0.0	0.10/5	0.85
고결사A	1.0	0.10/5	2.30
고결사B	1.0	0.10/5	2.15
고결사A	2.0	0.10/5	3.00
고결사B	2.0	0.10/5	4.15
고결사A	3.0	0.10/5	4.60
고결사B	3.0	0.10/5	6.15
고결사A	0.0	0.10/30	0.60
고결사B	0.0	0.10/30	0.58
고결사A	1.0	0.10/30	1.70
고결사B	1.0	0.10/30	1.92
고결사A	2.0	0.10/30	2.75
고결사B	2.0	0.10/30	3.75

표 3. 고무풍선에 따른 고결사 A의 할렬압 P_c

유효구속압 σ_3'	P_b	P_s	P_c
0.00	8.0	8.0	8.0
0.50	10.5	17.3	12.6
0.80	11.8	23.0	15.6
1.00	12.9	26.7	17.8

압이다. 표 3에는 주입액에 고무풍선을 사용한 할렬실험의 결과를 나타내고 있다. 고무풍선($\phi 3 \text{ mm}, H 10 \text{ cm}$)은 그림 1에 보인 주인 파이프에 연결하여 이중관 buret에 의해 풍선속을 액체로 가압한다. 할렬압의 결정은 가압에 의해 큰 풍선의 체적팽창량을 buret에 의해 측정하여 급격한 팽창이 확인되는 단계의 압력을 할렬압 P_c 로 하였다. 또 표 3에는 평균응력설에 기준한 할렬압 P_c^0 와 극한 공동내압의 이론치 P_c^{∞} 도 보였다. P_b 는 P_s 보다도 P_c 에 가깝게 되었으나 액체에 의한 할렬압 P'에 비해 확실히 크다. 풍선에 의한 가압에서는 공벽이 인장파괴하여 균열이 생겨도 균열내에 액이 침투하여가는 썩기작용은 생기지 않으므로 할렬압 P_c 가 크게 되는 것으로 보인다.

4. 균열의 진전과 모래의 투수성

할렬의 발생은 주입관 주변에 생긴 균열에 액이 침투하여 그 균열을 늘려 확대 시키는 썩기작용의 원인으로 생각되는 바 여기에서는 할렬압에 미치는 썩기작용의 영향을 검토하기로 한다.

그림 5, 6에서는 삼축압축장치를 써서 우선 할렬

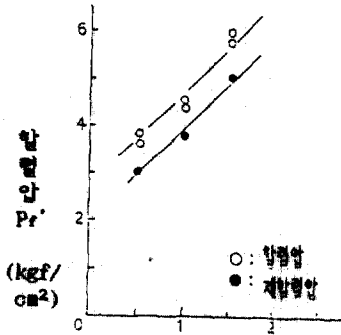


그림 5. 시료 A(조)의 재할렬압

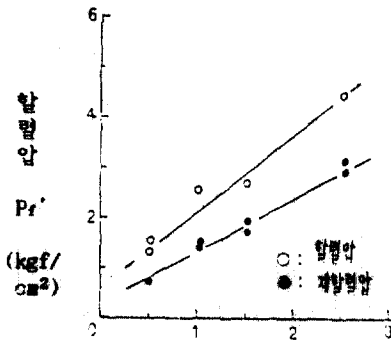


그림 6. 시료 D(세사)의 재할렬압

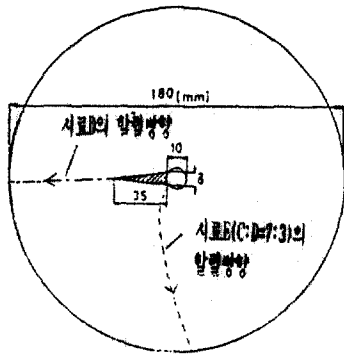


그림 7. 썰기의 크기

시험을 행하고 다시 압밀시킨 것에 대한 재할렬압을 보인것이다. 재할렬압과 할렬압의 차는 투수성이 큰 그림 5의 시료 C (조사, $k=2 \times 10^{-3} \text{cm}^2/\text{sec}$, $\gamma_s=1.73 \text{g/cm}^3$)에서는 작고, 기존 할렬면의 영향은 작다. 그러나 그림 6의 시료 D (세사, $k=2 \times 10^{-5}$

m^2/sec , $\gamma_s=1.45 \text{g/cm}^3$)에서는, 그 차는 크고 재할렬압이 유효구속압 보다 다소 크게 저하하고 있다.

앞장에서는 할렬압이 모래의 투수계수에 영향을 미치는 것을 검토하였으나, 재할렬압도 모래의 투수계수에 크게 좌우 되었다. 그 원인으로서는 균열(기존 할렬면)의 액압은 균열이 깊을수록 저하하고 주변의 모래의 투수성이 큰 경우는 균열선단압이 주입압에 비교하여 보다 작게 되기 쉽고 균열이 진전하지 않기 때문으로 생각된다.

할렬압에 미치는 기존균열의 영향을 조사하기 위하여, 그림 7에 보이는 바와 같이 주입공에 접하고 투수성이 큰 모래시료 F (입경 2.0-1.0mm, $k=5 \times 10^{-1} \text{cm}^2/\text{s}$)를 썰기모양으로 만들어 이 썰기를 갖는 시료 E (C:D=7:3), 시료 D의 할렬압을 조사하였다. 주어진 썰기의 길이는 주입관에서 수평거리 35mm이다. 더욱, 주입액은 함께 130 cps 액으로서 구속압 $\sigma'_s=0.5 \text{kg/cm}^2$ 이다. 그림 8, 9에는 그 균열압을 보인 것이다. 그림 8의 투수성이 큰 시료 E에서는 할렬압은 썰기의 존재에 그다지 좌우되지 않고 구속압과 비교하여도 매우 크다. 한 편 그림 9의 투수성이 작은 시료 D에서는 할렬압은 썰기의 존재의 영향이 크고 주입압이 구속압 보다 조금 큰 정도에서 할렬이 발생하였다. 이들 결과로부터도 투수성이 큰 모래에서는 균열이 존재하여도 썰기작용에 의하여 할렬이 진전하기 쉽다고 생각된다. 그림 7에는 균열의 진전상황을 스케치하고 있으나 시료 E에서는 기존 균열이 존재에 관계없이 할렬이 생긴다.

대형삼축주입장치를 써서 균열선단압과 균열 주변의 모래의 투수계수의 관계를 검토하였다. 주입액은 물을 사용하고, 주입관의 유출구는 썰기의 방

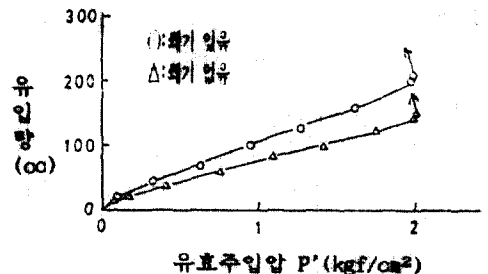


그림 8. 시료E의 할렬압에 미치는 영향 ($\sigma'_s=0.50 \text{kg/cm}^2$)

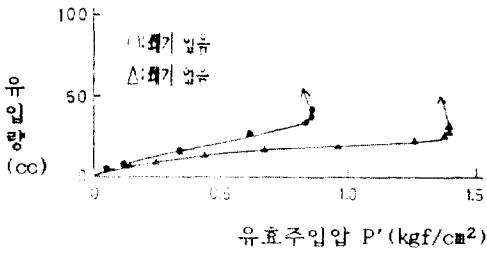


그림 9. 시료 D의 할렬압에 미치는 영향
($\sigma_3 = 0.50 \text{ kgf/cm}^2$)

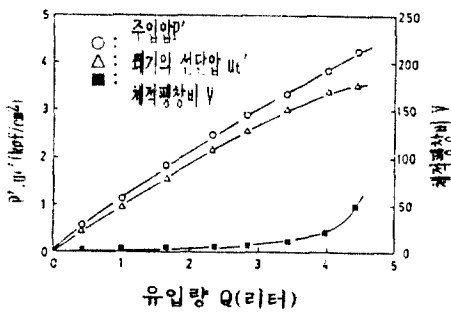


그림 10. 시료 G의 주입압·주입량에 미치는 실패기의 영향
($\sigma_3 = 0.50 \text{ kgf/cm}^2$)

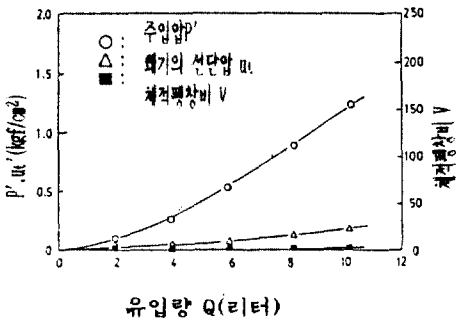


그림 11. 시료 G의 주입압·주입량에 미치는 실패기의 영향
($\sigma_3 = 0.50 \text{ kgf/cm}^2$)

향만 열리도록 하였다. 실패기의 내부에는 그림 6과 같은 모양의 주입관 주변에 길이 10cm정도 시료 F를 다져서, 실패기선단에는 쇠파이프를 세워서, 주입압과 실패기선단압의 관계를 구하였다. 그림 10, 11에는 시료 G (C:D=5:7) 및 시료 E (C:D=8:2)에 있어서 주입압 P' , 실패기선단압 u' 및 시료의 체적신장량 V 와의 관계를 보인 것이다. 구속압 $\sigma_3 = 3.0 \text{ kgf/cm}^2$, 배압 $u_0 = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$ 이다. 더욱 주입압 P' , 선

단압력 u_0 는 각각 배압으로 부터의 증분이다. 투수계수 k 가 $(0.8 \sim 5) \times 10^{-4} \text{ cm/sec}$ 정도로 작은 그림 10의 경우에는 주입압 P' 와 선단압 u_0 의 차는 거의 없고, U_0' 가 구속압 $\sigma_3' (= 2.50 \text{ kgf/cm}^2)$ 보다 크게 되는데 대하여 시료의 체적신장이 생긴다. 체적신장은 할렬이 주변의 흙을 눌러 넓히는 것을 의미하는 것으로서 선단압이 구속압정도로 되면 할렬이 진전한다고 본다. 한편 투수성이 큰 시료의 그림 11에서는, 선단압 u_0' 는 주입압 P' 보다도 근소하게 작게 되어 있다. 착색수를 써서 침투상황을 검토한 결과에 대하여 그림 10에서는 실패기의 주변에 균등한 침투가 보였으나 그림 11에서는 대략 주입관주변에 동심원상의 침투가 보였다. 주입압과 실패기선단압의 차가 클수록 동심원상의 침투가 얻어지기 쉬우므로 침투상황으로부터 시료 E에서는 선단압이 저하하고 있는 것을 알 수 있다.

5. 할렬발생기구

지금까지의 결과에서 모래의 투수성이 클 경우에는 실패기주변으로 부터 액이 침투하기 때문에 실패기 선단의 압력이 주입압보다도 꽤 작게 되고, 할렬이 진전하기 쉬운 것을 알 수 있었다. 제3장에서 기술한 바와 같이 고결사의 경우에도 투수성이 큰 쪽이 작은 쪽 보다 큰 결과로 되었다. 공벽의 인장파괴만에서는 할렬의 발생에 관계치 않고, 투수성이 큰 경우는 여분의 압력이 더욱 필요하게 된다. 따라서 사질토의 할렬압 P 는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_f = m \cdot \sigma_3' + \sigma_1 + R \quad (8)$$

여기서, m : 정수

σ_3' : 유효측압

σ_1 : 인장강도

R : 균열진정저항

여기서, m 은 1~2범위에 있고 내부공극수압의 증가가 무시될 수 있는 가압속도가 크거나 투수성이 작은 경우에 최대 2로 되며, 공벽주변의 공극수압이 주입압에 가깝게 될 경우는 1에 가깝다. 식(8)의 좌변 제1항과 제2항의 합은, 공벽에 인장파괴를 일으키는 데에 필요한 압력을 의미한다. 균열진정저항 R 은 모래의 투수성을 강하게 의존하고 있다. 투수성이 매우 작은 경우는 주입공벽의 인장파괴가 실패기작용을 일으켜 더욱 균열을 저하시키기에 충분

하고 R은 0에 가깝다. 한편 투수성이 큰 경우에는 공벽에 균열이 생겨도 균열선단에서의 압력이 상당히 저하하기 때문에, 균열은 간단히는 진전하지 않고 큰 R값을 갖게 된다. 즉 제1항과 제2항의 합으로서 인장파괴되나 그대로는 할렬하지 않고 균열진전저항에 대해 압력이 추가될 때에는 할렬로 진전된다. 주입액의 점성이 증가하면 침투량이 감소하여 내부의 공극수압의 증가가 작게 되고, 또 균열내의 압력저하도 점성이 클수록 크게 되므로 m, R은 함께 증가한다. 모래의 투수성이 클수록 R은 증가하므로 할렬압도 크게 되나 실험적으로 보아 할렬압의 최대치는, 극한공동내압 정도로 된다고 생각된다.(단, m, R은 액의 점성이나 주입가압속도의 영향을 고려한 정량적 결정은 곤란하다.)

더욱, 제시된 식(8)은 Jaworski등의 다짐도에 대한 식(3)과 유사하나 결보기 인장강도 σ_m 는 불명확하므로 쓰지않고, σ_m 는 σ_1 와 R의 합에 상당하며 더욱 m을 결정하는 조건을 명확하게 하고 있다.

6. 결 론

본 연구는 석탄회 지반개량을 위한 연구의 일환으로 약액주입에 있어 큰 문제점으로 등장한 Hydraulic Fracturing에 대한 문제 해결을 위해 고결사의 할렬방생기구를 실험적으로 검토한 것으로서 연구 결과 중 주요 사항 만 요약하면 다음과 같다.

고결토의 할렬압 P는 다음식으로 간단히 나타낼 수 있다.

$$P_f = m\sigma_3 + \sigma_1 + R$$

여기서, P_f: 유효수압과쇄압

m: 상수 (1 ≤ m ≤ 2)

σ_3 : 유효구속압

σ_1 : 인장강도

R: 균열진전저항치

할렬압의 크기는 투수성에 크게 영향을 미치는 바 투수성이 크게 됨에 따라서 할렬압도 크게 되는 경향이다. 할렬압에 미치는 모래의 밀도나 축차응력의 영향은 적다. 모래의 투수성이 작은 경우 주입공주변의 인장파괴로 생긴 균열내의 압력의 저하는 작으며 균열은 진전하기 쉽다. 한편 모래의 투수성이 크면 균열의 폭이 크게 되지 않는 한 균열의 측면으로부터 액이 모래에 침투하므로 균열내의 압력저하가 크게 되어 쇄기작용이 생기기 쉽기 때

문에 큰 균열압이 필요하게 된다.

할렬압은 액의 점성이 증가함에 따라 증가하나 이것은 침투에 따른 내부의 공극수압의 증가가 작고, 더욱 균열내의 압력저하도 점성이 클수록 커지기 때문으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구비지원에 의하여 이루어진 연구일부임을 밝히며, 아울러 본 논문의 완성에 있어 실험, 자료등 여러 면에서 적극 협조해 준 Waseda대학 MORI AKIRA교수의 후의에 깊은 감사를 드리는 바이다.

참 고 문 헌

1. Haimson, B. and Fairhurst, C., "In-situ stress determination at great depth by means of hydraulic fracturing", *Proc. 11th Symp. Rock Mech., AIME*, 1970, pp. 559-584.
2. Haimson, B. and Fairhurst, C., "Initiation and extension of hydraulic fractures in rocks", *Soc. Petrol. Eng. J.*, 7, 1967, pp.310-318
3. Medlin, W, L. and Masse, L., "Laboratory investigation of fracture initiation pressure and orientation", *Soc. of Pet. Eng. J.*, 1979, pp.129-144.
4. Zoback, M. D., Rummel, F., Jung, R. and Raleigh, C. B., "Laboratory hydraulic fracturing experiments in intact and pre-fractured rock", *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 14, 1977, pp.49-58.
5. 石島洋二, 木下重教. "水壓破碎に及ぼす對壓と流量について", *日本鑛業學會誌*, 96, 1113, 1980, pp.827-864.
6. 原田哲夫, 出光 隆・渡邊 明, "靜的破碎劑おを用いたコンクリートの解體に關する基礎的研究", *土木學會論文集*, No. 360, 1985. pp.61-70.
7. 赤井浩一・大西有三, "透水性軟岩の水壓破碎に關する室内實驗について", *第13回岩盤力學に關するシンポジウム講演論文集*, 1980, pp.71-74.
8. Lockner, D. and Byerlee, J. D., "Hydrofracture in weber sandstone at high confining pressure and differential stress", *Journal of Geophysical research*, Vol. 82, No. 14, 1977. pp.2018-2026.

9. Bjerrum, L., Nash, J. K. T. L., Kennard, R. M. and Gibson, R. E., "Hydraulic fracturing in field permeability testing", *Geotechnique*, Vol. 22, No. 2, 1972, pp.319-332.
10. Massarsch, K. R. and Broms, B. B., "Fracturing of soil caused by pile driving in clay", *Proc. 9th Int. Conf. on Soil. Mech. and Found. Eng.*, Vol. 1, 1977, pp.197-200.
11. 嘉門雅史・Massarsch, K. R., "ハイドロイラクチヤリソグの土質安定 への應用について", 第17回土質工學研究發表會, 1982, pp.2461-2464.
12. Morgenstern, N. R. and Vaughan, P. R., "*Some observations on allowable grouting pressure, Grouts and Drilling Muds in Engineering Practice*", London, Butterworths, 1963, pp.36-42.
13. Horsrud, P., Risner, R. and Bratli, R. K., "Fracture initiation pressures in permeable poorly consolidated sands", *Int. J. of Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, 1982. pp.255-266.
14. 福島伸二, "ハイドロフ クチヤリソグによるフイルタ"ムコア材の破壊規準", 土と基礎, Vol. 34, No. 12, 1982.
15. Jaworski, G. W., Duncan, J. M. and Seed, H. B., "Laboratory study of hydraulic fracturing", *Proc. ASCE, GT6*, 1981, pp.713-732.
16. Vaughan, P. R. "*The use of hydraulic fracturing tests to detect crack formation in embankment dam cores*", Initial report, Department of Civil Engineering, Imperial College, London, England, 1971.
17. 森嶋, 千柄植, "砂質地盤における割裂發生機構", 日本土木學會論文集 第388號/ -8, 1987. 12, . pp.61-70.
18. Mori, A. and Tamura, M., "Hydrofracturing pressure of cohesive soils", *Soils & Foundation*, Vol. 27, No. 1, 1987.
19. 千柄植, "不透水性 地盤에서의 縱割裂注入壓에 관한 基礎的研究", 大韓土木學會論文集, Vol. 6, No. 3, 1986. 9, pp.43-51.
20. Vesic, A. S. "Expansion of cavities in infinite soil mass", *Proc. ASCE, SM3*, 1972, pp.265-290.
(接受:1990. 9. 29)