

밴드 드레인의 품질과 연약지반 개량효과와의 관련

RELEVANCE OF BAND DRAIN QUALITY TO EFFECTIVENESS OF GROUND IMPROVEMENT

김 상 규, SANG-KYU KIM

동국대학교 교수, Professor, Dongguk University

SYNOPSIS : The use of band drains for ground improvement has been increased throughout the world during the past 15 years. Apart from other ground improvement techniques, the quality of band drains affects greatly the effectiveness of ground improvement. This paper reviews all factors affecting the quality of band drains and describes criteria for its use. In order to compare the well resistance of drains, discharge capacity and clogging tests for four drains selected are carried out and the quality is examined.

1. 서론

연약지반의 개량을 위하여 현재까지 가장 많이 사용되어 왔던 압밀촉진 공법은 샌드 드레인과 인공 배수재(페이퍼 드레인)이다. 전자는 1926년 미국 캘리포니아주에서 최초로 시공을 하였고, 후자는 스웨덴의 Kjellman이 1930년대 중반에 특허를 얻었으므로 이 두가지 공법은 거의 동시에 개발되었다고 할 수 있다.

Kjellman이 인공적으로 개발한 최초의 배수재는 띠 모양의 마분지(cardboard)를 사용하였으므로 'Kjellman 심지 드레인(wick drain)'이라는 이름으로 불리었다. 그러나 이것은 모래에 비해 단가가 비싸고 마분지는 쉽게 훼손되기 때문에 유럽과 일본에서 가끔 사용하였을 뿐, 다른 나라에서는 40년 동안 사용한 실적이 없다. 1971년에 Kjellman과 함께 일한 적이 있었던 Wager라는 분이 마분지 대신 골 모양의 플라스틱 코어를 사용하여 이것을 개량하였다. 이것을 Geodrain이라고 하며, 오늘날까지도 이 상품명으로 인공배수재가 생산되고 있다. 최초의 모델로 사용한 필터는 Kraft 종이인데, 지금도 Geodrain중 한 종류는 필터로서 종이를 사용하고 있다. 1980년대에 이르러 polymer의 개발로 인공적으로 값싼 배수재의 생산이 촉진되어 샌드 드레인 공법과 경쟁이 될 수 있게 되었다. 인공 배수재의 수요 급증에 따라 과거 15년 동안 각국에서는 경쟁적으로 인공배수재를 개발하여 현재 세계적으로 50종 이상이 생산되고 있다고 한다(Holtz et al., 1991).

이와 같은 인공 배수재는 페이퍼 드레인(paper drain), 밴드 드레인(prefabricated band drain), 인공 수직배수재(prefabricated vertical drain), 심지 드레인(wick drain), 프라스틱 드레인(plastic board drain), 띠 드레인(strip drain) 등 다양한 이름으로 불려지고 있다. 이 중, 페이퍼 드레인이 우리 귀에 익은 이름이나 실제로는 종이를 써서 만든 배수재는 거의 사용하지 않고 있을 뿐더러, 모든 인공 배수재가 허리띠 모양을 하고 있기 때문에 (최근에는 십자형도 개발하였으나 실용화되어 있지 않음) 세계적으로 밴드 드레인이라는 이름을 선호하는 것 같다. 여기서도 이것을 밴드 드레인으로 부르기로 한다.

현재 세계적으로 생산되고 있는 밴드 드레인의 폭은 95 - 100mm, 두께는 3 - 6mm이므로 이것을 원형의 직경으로 환산하면 불과 62 - 68mm 밖에 되지 않는다. 더욱이 Rixner(1986)와 Hansbo(1987) 등에 의한 최근의 연구에 의하면 유효 환산직경은 배수재의 폭과 두께를 합친 값의 반($d_w=(b+t)/2$)으로 보는 것이 실제와 부합하는 것으로 보고 되고 있으므로, 이 분들의 주장을 따른다면 환산직경은 49 - 53mm로 줄어든다. 따라서 300 - 400mm 직경의 샌드 드레인과 비교해 보면 여기서 과연 물이 빠져나올 수 있을까 하는 의구심과 함께 개량효과가 후자와 동일할 수 있을 것인가 하는 의문이 생길 것이다. 그러나 이것으로 이미 40m의 깊이까지도 타설하여 성공한 예가 있고 (Hansbo, 1992), 현재 시공중인 싱가포르 공항의 제 3활주로에서도 개량깊이가 40m이며, 제4활주로에서는 60m의 깊이까지 타설예정으로서 있다 (Sung, 1994).

샌드 드레인과 밴드 드레인 양 공법중 어느 것이 더 개량효과가 좋으나 하는 문제는 오래전부터 논란거리가 되어왔다. GCO(1991)에서는 세계의 여러 사례를 통해 개량효과를 비교 하였는데, 분명한 우열의 구별은 어려우나 시공자의 경험과 시공능력에 따라 개량효과가 좌우되는 것으로 결론 짓고 있다. 그러나, 두 공법 모두 만족스런 시공을 했다고 하면, 이론적으로나 또는 실제적으로 개량효과는 동일하다고 보는 것이 옳을 것이다. 국가별로 선호도를 보면 밴드 드레인을 개발한 유럽국가와, 홍콩, 태국, 싱가포르 등 동남아시아에서는 밴드 드레인을 주로 사용하는 것 같고, 일본과 한국은 현재까지 샌드 드레인을 더 좋아하는 것 같이 보인다. 경제적으로 보면 밴드 드레인이 단연 앞선다. 어느 나라나 할 것 없이 모래 값은 해마다 증가하는 반면, 밴드 드레인은 상대적으로 훨씬 저렴한 재료의 개발이 가능하였기 때문이다. 또 시공장비의 개발로 말미암아 후자의 시공속도가 현저하게 빨라졌다. 이의 실적을 보면 8시간당 10,000m를 관입하는 것이 보통이며, 최대 1m/s까지 가능하다고 한다.

이와 같은 밴드 드레인인 장점에도 불구하고 왜 우리나라에서는 잘 보급되지 않았는가 하는 의문이 생긴다. 비록 외국의 제품(Castleboard)을 사용하고 일본 기술자의 도움을 받았지만, 사실상 밴드 드레인 공법은 최초로 1975년 창원 적현단지의 연약지반 처리에 적용되었다(김, 1994). 그 이후에도 국산 밴드 드레인이 개발되어 여러 현장에서 사용되었지만 개량효과면에서 실망하여 이의 사용을 기피하여 온 것이 사실이다. 그 이유는 국산제품의 품질상의 문제와 이에 관련되는 연구가 거의 이루어지지 않았다는데 기인한 것으로 생각된다. 이 공법은 다른 공법과는 달리 배수제의 품질이 가장 중요하다라는 것을 이해할 필요가 있을 것이다. 여기서는 이것이 연약지반의 개량효과에 어떠한 영향을 주는가에 대해서 집중적으로 기술하기로 한다.

2. 밴드 드레인의 종류와 특성

밴드 드레인의 종류는 크게 둘로 나눌 수 있다. 첫째는 부직포 배수재(non-woven drain)이고 두번째는 복합 배수재 또는 토시형(포킷형) 배수재(composite drain, sleeve drain)이다. 전자는 두께가 약 5mm인 니들 펀치 부직포(needle punched non-woven geotextile)의 판을 약 100mm의 폭으로 잘라 만든 것인데(Zanten, 1986), 코어와 필터는 열융합으로 부착되어 있어서 일체로 되어 있다. 후자의 밴드 드레인은 코어(core)와 필터(filter)로 구성되고 후자가 전자에 토시처럼 끼워 있어서 분리할 수 있다. 코어의 재료는 주로 폴리에틸렌(polyethylene)과 폴리프로필렌(polypropylene)을 사용한다. 코어는 제품에 따라 여러 모양이 있는데, 이들을 대별하면 (1) 돌기모양(studded core, Alidrain, Flodrain 등), (2) 골 모양(grooved core, Mebradrain, Geodrain 등), (3) 필라멘트 모양(filament core, Colbond CX 1000 등)으로 나누인다(그림 1 참조). 골 모양은 단면이 사다리꼴과 네모꼴로 나눌 수 있고, 돌기모양과 필라멘트 모양은 3차원 흐름을 유발하기 때문에 밴드 드레인이 구부러지거나 휘어졌을 때 통수능력(discharge capacity)이 더 커진다고 이들의 제조회사는 주장하고 있다. 그러나 대부분의 제품은 골 모양으로 생산되고 있다(표 1 참조).

필터의 재료는 주로 폴리에틸렌(polyethelene), 폴리프로필렌(polypropylene), 폴리에스터(polyester)인 부직포(non-woven material)로 만드나, 아직도 종이 사용하는 것이 있다(Geodrain 중 일부제품). 필터는 그 두께가 대단히 얇아서 보통 0.2mm - 0.5mm 밖에 되지 않으며, 간극이 일정하지 않다. 표 1은 세계시장에 나와 있는 밴드 드레인의 종류와 특성을 보인다.

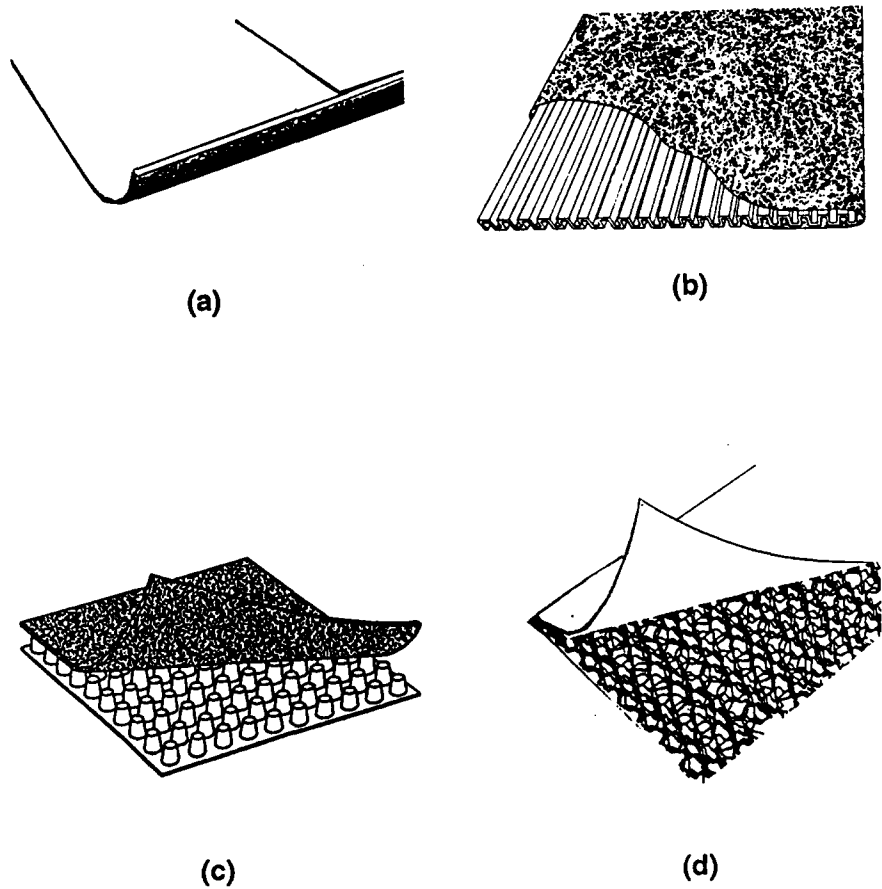


그림 1. 코어의 여러 가지 모양

표 1 몇가지 밴드 드레인 종류와 특성

| 드레인종류 (생산지) | 코어 | | 필터 | |
|--|--------------------------|-----------|------------------------------------|--------------------|
| | 재료 | 형상 | 재료 | 간극치수 |
| Alidrain (캐나다) | polyethylene | 돌기 | polyester | 50(AOS) |
| Ameridrain 407 (미국) | polypropylene | 굴 | polypropylene | 100(AOS) |
| Castleboard Colbond CX 1000 (네덜란드) | polyolefine polyester | 굴 필라멘트 | polyester polyester | 75(AOS) 80(AOS) |
| Flodrain FD4 (말레이시아) | polyolefine | 굴 | polypropylene | 140(AOS) |
| Geodrain (스웨덴,일본) | polyethylene | 굴 | polyester, paper, polypropylene | - |
| Mebradrain MD 7007 (네덜란드) | polypropylene | 굴 | polypropylene | - |
| Tafnel (일본) | - | - | polypropylene | - |
| Vivadrain (한국) | polyester | 굴 | polypropylene | - |
| Civilon 77, 88 (한국) | polypropylene | 굴 | polypropylene polyester | - |

3. 수평배수에 대한 압밀이론

Barron(1948)은 Terzaghi의 1차원 압밀이론을 근거로 하여, (1) 지표면에서의 수직응력이 변형시 일정하게 남아 있는 경우(free vertical strain)와 (2) 지표면에서의 변형이 균등하게 발생하는 경우(equal vertical strain)에 대하여 방사선방향으로 배수되는 이론을 개발하였다. 그의 이론은 샌드 드레인의 설계에 현재까지도 잘 이용되고 있다. 밴드 드레인에 적용할 수 있는 이론은 Hansbo(1979)가 Barron(1948)의 이론을 근거로 수정하여 제안하였다. 수평방향의 평균압밀도는 다음과 같이 주어진다.

$$U_{hz} = 1 - \exp\left[-\frac{8T_h}{\mu}\right] \tag{1}$$

$$\mu = \left[\ln\left(\frac{D}{d_s}\right) - 0.75\right] + \left[\left(\frac{k_h}{k_s}\right) \times \ln\left(\frac{d_s}{d}\right)\right] + \left[\pi z(2l-z) \frac{k_h}{q_w}\right] \tag{2}$$

= 배수재의 간격 항 + 스미어(smear)항 + 웰 레지스턴스(well resistance)항

여기서, U_{hz} : 깊이 z에서의 평균압밀도

$$T_h = c_h t / D^2$$

t : 압밀시간

c_h : 수평방향 압밀계수

D : 1.13S (정사각 배치), S : 드레인 간격

D : 1.05S (삼각배치)

l : 배수길이

k_h : 수평방향 투수계수

k_s : 스미어 존의 투수계수

q_w : 배수재의 통수능력

위의 (2) 식에서 첫째항은 배수재의 간격 배치에 대한 것이므로 설계와 관련되고, 둘째항은 스미어 존에 관한 것이므로 시공성 즉 시공장비와 시공능력에 관련된다. 마지막항은 배수재의 통수능력과 길이, 및 연약지반의 특성에 관한 것이므로 배수재의 품질과 관련되는 데, 배수재의 통수능력에 대해 방해하는 모든 요소를 웰 레지스턴스(well resistance)라고 한다. 만일 스미어도 없고 웰 레지스턴스도 없는 이상적인 경우라면 (2)식은 다음과 같이 쓸 수 있을 것이다.

$$\mu = \ln\left(\frac{D}{d_s}\right) - 0.75 \tag{3}$$

여기서는 제 (3)항에 관련되는 품질의 문제에 대해서만 다루기로 한다.

4. 밴드 드레인의 지중에서의 거동

밴드 드레인은 맨드릴(mandrel)에 의해 소요깊이까지 지중으로 삽입된다. 삽입직후에는 직선으로 남아 있지만, 지반 위에 성토를 하여 압밀이 진행되면 지반침하에 따라 밴드 드레인의 변형이 생긴다. 압밀의 진행과 더불어 밴드 드레인은 구체적으로 어떤 거동이 일어날 것인가 하는 것은 그림 2에 잘 설명되어 있다.

밴드 드레인을 삽입할 때에는 맨드릴의 보호를 받지만, 최소한 두루마리를 잡아당길 수 있는 인장력을 가져야 한다. 밴드 드레인이 토시형일 때에는 코어와 필터가 인장력에 동등하게 저항하여야 하며, 물과 접촉했을 때에는 인장력이 감소할 수도 있다. 때로는 밴드 드레인이 인장력을 받아 과도하게 늘어나거나 찢겨질 수도 있을 것이다.

밴드 드레인의 삽입 후 맨드릴을 제거하면 곧 배수재는 팽압을 받는다. 팽압은 토압, 수압 그리고 과재하중으로 인해 증가된 압력으로 이루어지며, 그 크기는 대략 깊이에 비례한다. 깊이 20m아래에 있는 밴드 드레인은 지하수위와 성토의 무게에 따라 다르지만 대략 $30t/m^2$ 의 팽압을 받는 것으로 추정할 수 있다. 필터의 원료인 폴리머는 작은 압력에서도 쉽게 신장할 수 있으므로, 배수재가 높은 팽압을 받을 때에는 코아쪽으로 휘어져서 [그림2(c) 참조] 코아의 배수단면을 축소시킨다.

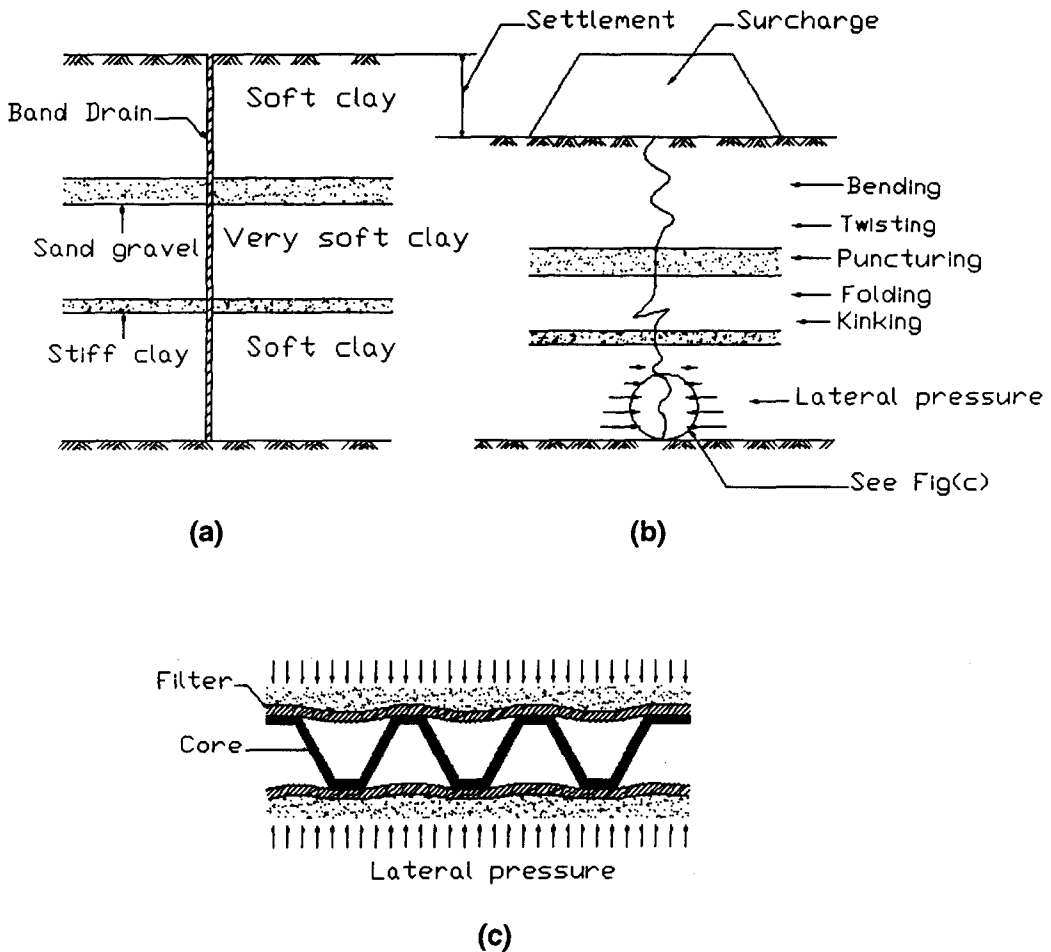


그림 2. 압밀이 진행되는 동안의 밴드 드레인의 변형

균질한 연약지반에서는 초기의 직선상의 밴드 드레인은 휘어지거나(bending), 뒤틀리거나(twisting), 접히거나(folding), 때로는 밧줄처럼 꼬이기(kinking)도 한다. 이러한 변형과정에서 배수재의 기능이 저하되리라는 것은 충분히 예상할 수 있다. 굳은 지층과 연약한 지층이 교대로 있을 때에는 변형의 상이로 말미암아 인장력을 받을 수도 있다. 배수재가 샌드 심(sand seam)이나 모래층과 같은 입상의 흙속에 삽입되었다면, 횡압을 받아 이것이 찢겨질 수도 있다.

위와 같은 변형의 정도는 연약지반의 성질에 따라 달라진다. 특히 유기질토, 이탄, 쓰레기 매립층 등 압축성이 대단히 큰 연약지반에서는 과도하게 변형이 일어날 뿐만 아니라 손상의 우려도 훨씬 크다. 이러한 변형과 손상은 밴드 드레인에 의한 개량효과를 감소시키는 중요한 요인이 되므로 성공적인 개량효과를 거두기 위해서는 배수기능이 저하될 수 있는 여러 상황에 대한 품질시험을 통하여 철저히 대비해야 할 것이다.

5. 품질시험을 위한 시험기와 시험방법

5.1 시험의 필요성

배수재에 대하여 품질시험을 하는 목적은 앞서 설명한 배수재의 지중으로 타입시 및 압밀이 진행되는 동안에 발생할 수 있는 파열, 변형, 인장, 통수능력 등에 대하여 시험하고 연약지반 개량효과에 영향을 주지 않는 기준치를 만족하는가 판단하는데 있다. 우리나라는 물론 어느나라의 제품이나 할 것 없이 기준에 미달되는 제품들이 생산될 수 있으므로 이러한 모든 조건에 대한 철저한 시험 없이는 개량효과와 확실한 보장이 힘들 것이다.

5.2 실내시험에 대한 공업규격

표 2는 배수재를 시험하는 한국공업규격과 미국재료공업협회규격(ASTM)을 보인다. 한국공업규격은 현재까지 배수재의 중량, 폭, 두께 등 극히 기본적인 것 밖에 없고, 더욱이 이에 대한 시험도 한국원사직물시험검사소에서만 실시하고 있다. 가장 중요한 통수능력에 관계되는 시험은 현장 또는 시험소에서 실시하지 않고 있으며, 아직 공업규격도 제정되어 있지 않다.

표 2에 보인 배수재의 무게, 폭, 인장강도 등은 간단한 시험기구로 쉽게 시험할 수 있다. 따라서 여기서는 웰 레지스턴스에 대한 시험에 대해서만 언급하기로 한다.

표 2. 배수재 시험 방법

| 재료의 특성 | 한국공업규격 | ASTM규격 |
|--------------|---------------|---------------|
| 중량 | KS K 0515 | ASTM D3776-85 |
| 폭 | KS K 0505 | ASTM D3774-89 |
| 두께 | | ASTM D5199-91 |
| 인장강도 | KS K 0411 | ASTM D4632-91 |
| 파열강도 | KS K 0541 | ASTM D4533-91 |
| 통수능력(직선) | | ASTM D4716-87 |
| (굴곡) | | ASTM D4716-87 |
| 겉보기간극치수(095) | | ASTM D4751-87 |
| 투수계수 | KS F 2322(준용) | ASTM D4491-89 |

5.3 웰 레지스턴스(well resistance)에 대한 시험

웰 레지스턴스, 즉, 배수재의 통수를 방해하는 것은 (1) 배수재의 코어(core)가 변형이 없을 때는 물론, 접히거나, 휘거나, 횡압을 받았을 때 통수능력이 저하하는 경우와, (2) 필터와 코어를 통해 배수될 때 작은 입자의 통과로 인해 물 구멍이 막힐 가능성(clogging potential)의 두 가지로 나누어 생각할 수 있다.

(1)의 경우에 대한 시험은 배수재를 멤브레인으로 싸서 삼축압축시험에서와 같이 횡압을 가하고, 횡압의 크기를 바꾸어가면서 시험하는 것이다. 동국대에서 연구용으로 제작한 통수능력에 대한 시험기구는 그림 3에 보인다. 이 중 하나는 횡압의 변화에 따른 직선상에 대한 통수능력을 시험하는 기구인데[그림 3(a) 참조], 배수재를 멤브레인으로 싸고 그 바깥쪽에서 횡압을 가하게 되어 있다. 배수재를 통해 흘러나온 수량은 메스실린더에서 측정된다.

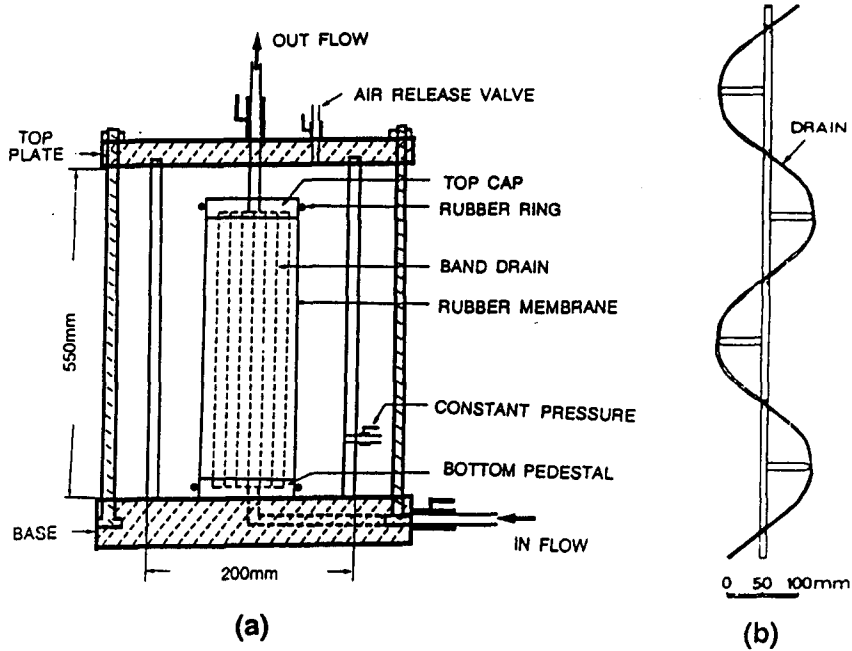


그림 3 (a) 직선상의 배수재에 대한 통수능력 시험기구

(b) 곡선상을 시험 하기 위한 프레임

멤브레인 대신 배수재 주위에 연약한 흙으로 넣어 시험하는 방법도 있다. 그림 4는 이태리 미란의 Enel-Cris에서 개발한 시험기구인데(Holtz et al., 1991), 배수재를 연약한 흙 속에 삽입한 다음 횡압을 가하고 배수재를 통해 아래에서 위로 물을 통과시킨다. 배수재를 멤브레인으로 직접 싸서 시험한 결과와의 차이는 아직 규명되지 않은 것 같다.

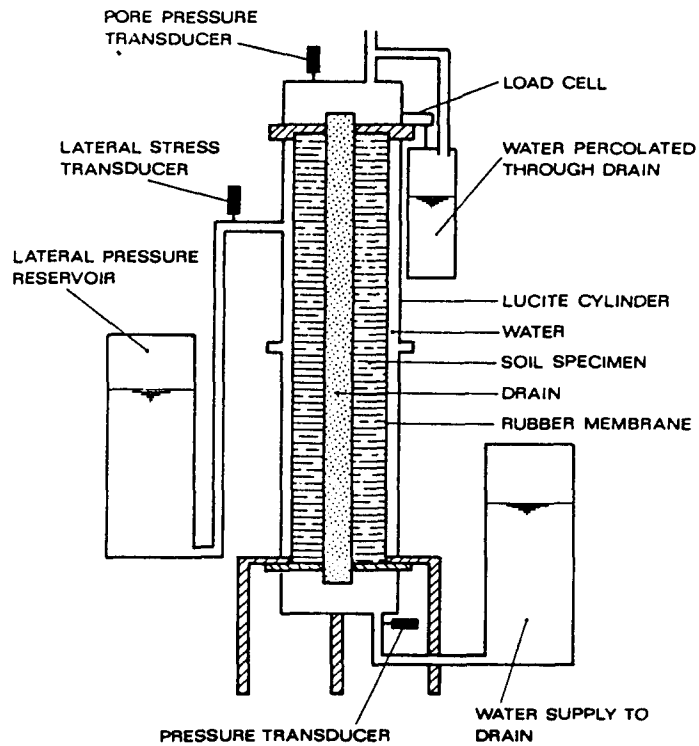


그림 4 Enel-Cris시험실의 통수능력 시험기구

싱가폴의 난양대학에서는 압밀시험기를 개조하여 통수능력을 시험할 수 있는 기구를 개발하였다(Broms et al., 1994). 그림 5에 보인 바와 같이 이것은 배수재를 수평으로 놓고 그 상하에는 점토를 깔아 상부에서 횡압에 대응하는 압력을 가한다. 이 방법은 추를 이용할 수 있으므로 수압을 이용하여 횡압을 가하는 경우보다 훨씬 간편하다는 장점이 있다.

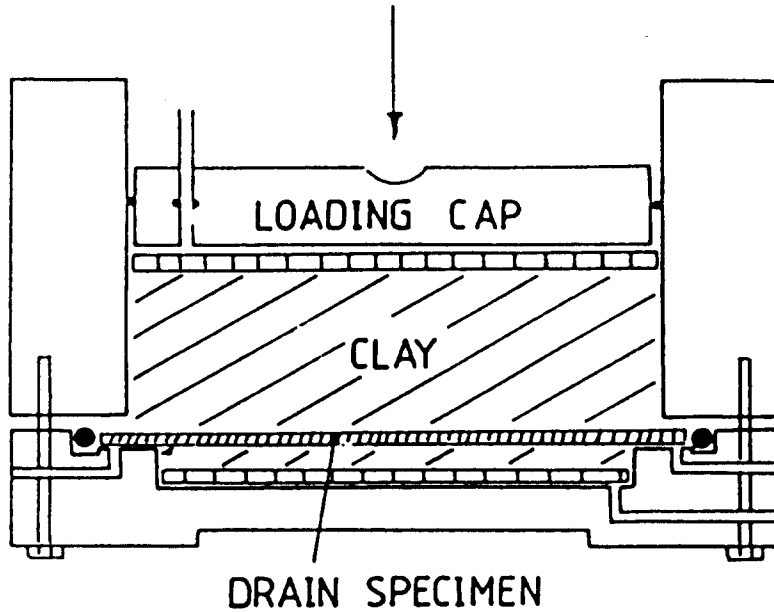


그림 5 난양대학에서 개발한 통수능력 시험기구

위에서 설명한 것은 모두 직선상의 배수재에 대해 통수능력을 시험하는 기구이다. 배수재가 규칙적으로 변형하였을 때에 대한 시험은 그림 3(b)에 보인 바와 같은 프레임에 배수재를 감아 압력실에 넣고 시험하면 된다. 집진 상태에 대한 시험은 배수재의 중간을 집게로 집어서 시험할 수 있다(그림 6 참조). Lawrence and Koerner(1988)는 밴드 드레인이 부분적으로 압착되었을 때를 모델화할 수 있는 시험기구(kinking test)를 개발하였다. 이것은 그림 7에 보인 바와 같이 나사를 돌려 배수재에 압력을 가하여 통수시험을 하는 것이다.

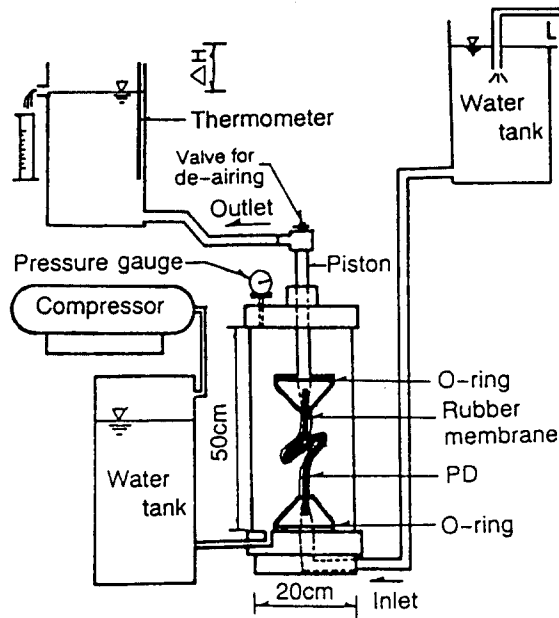


그림 6 변형상태에 대한 통수능력 시험기구(박, 1994)

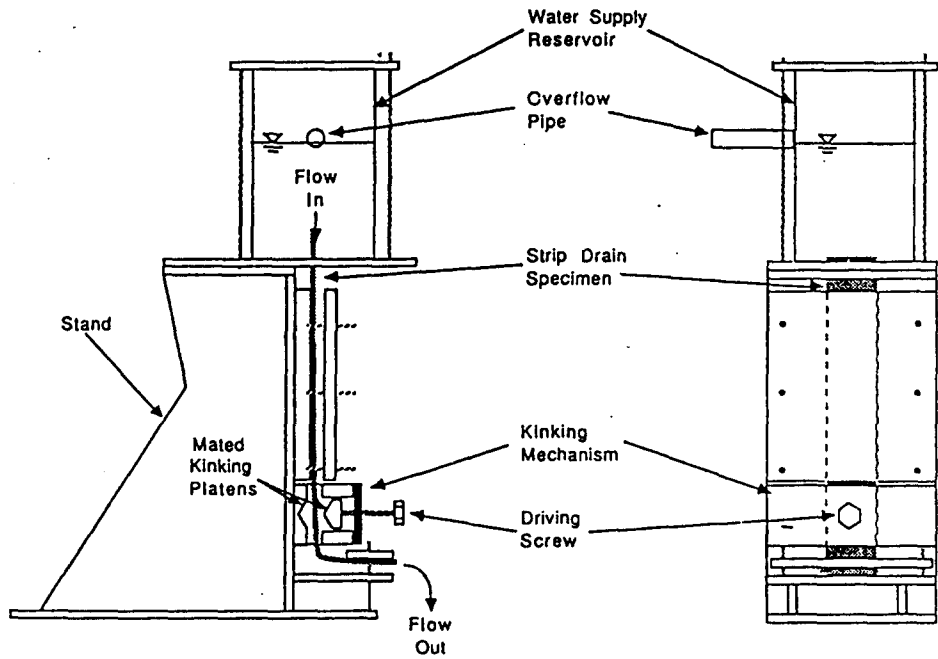


그림 7 Kinking test를 위한 시험기구(Lawrence and Koerner, 1988)

점토시료 속에 밴드 드레인을 넣고 압밀로 인한 변형이 발생한 후 통수시험을 할 수 있다. Enel-Cris에서는 20%를 압밀시킨 다음 통수시험을 시행하였다. 이와같이 하면 압밀시간이 많이 소요되므로 시험기간이 오래 걸리나, 배수재의 변형은 앞서와 같이 인위적이 아니고 자연적인 형상으로 휘어진 다. 여러기관에서 이와 같은 변형시험을 수행한 후의 밴드 드레인의 변형상태는 그림 8에 보인다(Madhav, 1995)

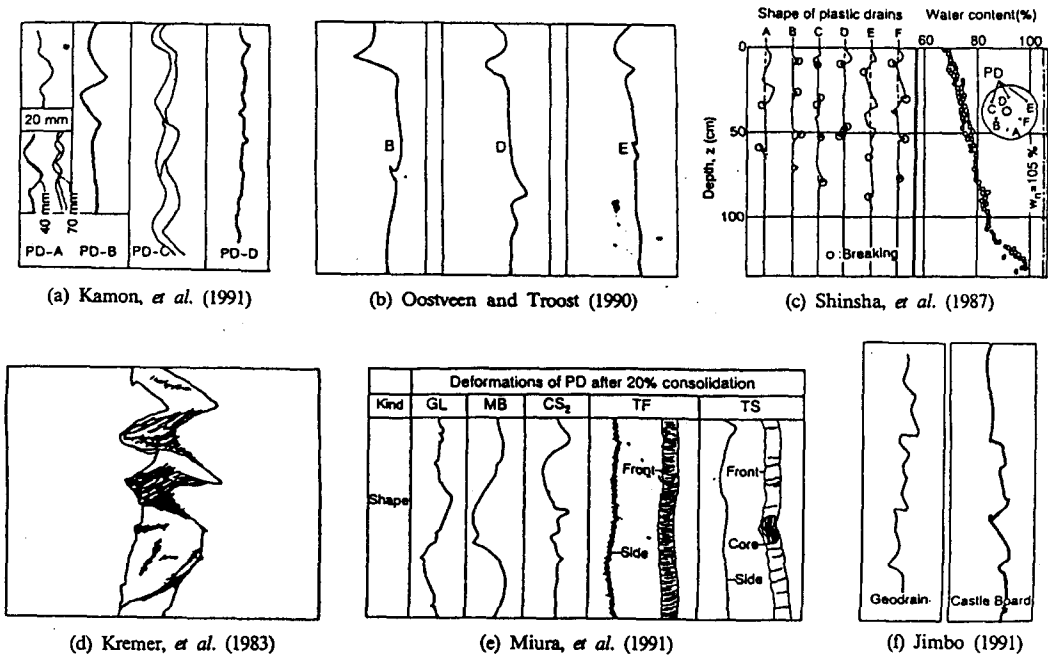


그림 8 변형시험을 수행한 후의 밴드 드레인의 변형(Madhav, 1995)

(2)의 경우 즉, 필터의 막힘가능성에 대한 시험에 있어서는 필터위에 점토를 두고 보통 동수경사가 1, 2.5, 5, 7.5, 10이 되도록 하여 흙을 통해 필터로 물을 유과시킨다. 그림 9는 ASTM에서 제안한 공업규격으로 제작한 이를 위한 시험기구이다. 배수과정에서 필터의 구멍이 적절하지 않다면, 작은 흙입자에 의해 구멍이 부분적으로 막혀 통수능력을 저하시킬 것이다.

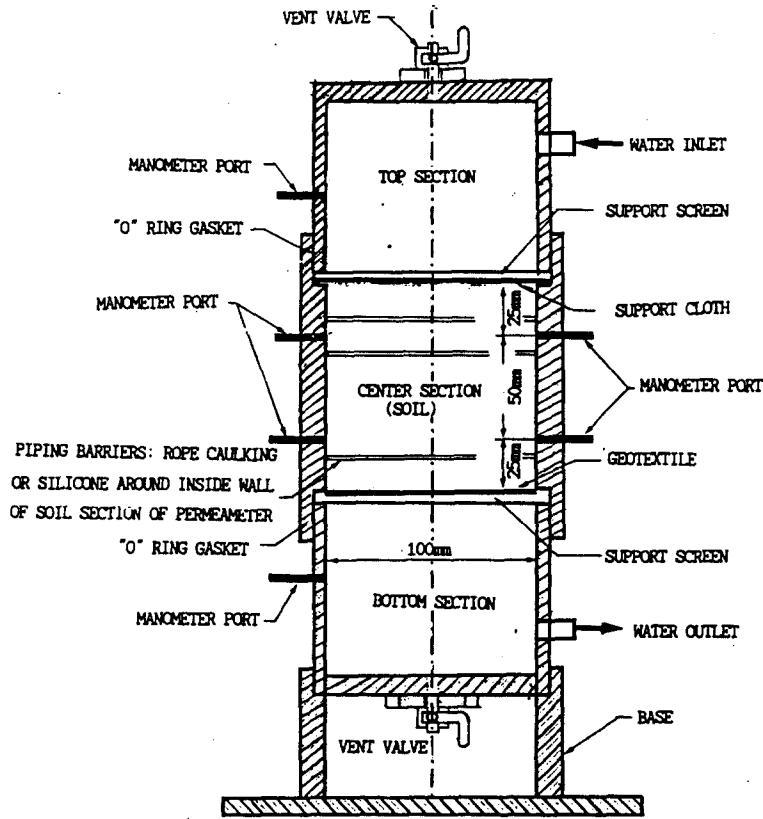


그림 9 필터의 막힘에 대한 시험기구

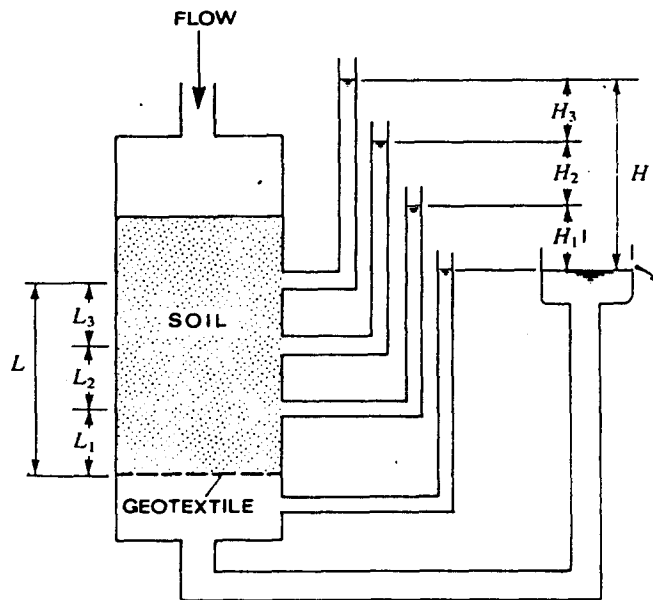


그림 10 동수경사비 시험의 원리

그림 10에 보인 바와 같이, 필터를 수평으로 깔아 그 위에 흙을 덮고 유과시키면 필터가 막히게 될 때에는 동수경사가 감소하게 될 것이다. 따라서 필터가 흙 입자에 의해 막힐 수 있는 가능성에 대한 판단은 동수경사비(gradient ratio, GR)로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$GR = \frac{\frac{H_1}{L_1}}{\frac{(H_2+H_3)}{(L_2+L_3)}} \quad (4)$$

윗식의 기호는 그림 10에 잘 설명되어 있다.

6. 통수능력(discharge capacity)에 대한 시험 결과

통수 능력은 단위동수경사에 대한 유출율로 정의된다. 이것은 (1) 코어의 형상과 체적, (2) 횡방향 토압, (3) 배수재의 접힘(folding), 휨(bending), 꼬임(kinking), (4) 필터로의 미립자의 침투, 그리고 (5) 생화학적인 열화 등에 의해 크게 영향을 받는다. 이 중에서 첫째 및 둘째 인자에 대한 영향을 검토하기 위하여, 널리 쓰여지고 있는 외산 밴드 드레인 3가지(Mebrandrain, Geodrain, 및 Colbond)와 국산 드레인(Viva)을 선택하여 시험하였다. 이 시험의 본래의 목적은 지금까지 통수능력이 전혀 밝혀지지 않았던 국산 배수재에 대한 시험을 하여 외산의 성능과 비교하기 위한 것이다.

6.1 동수경사의 영향

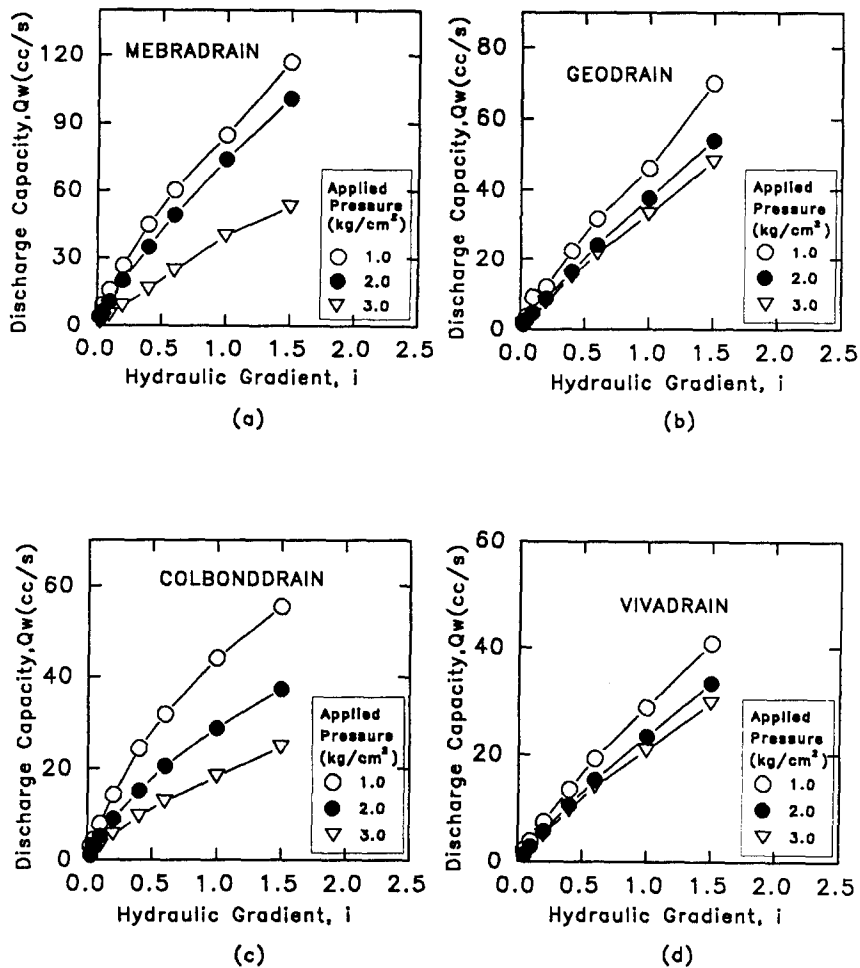


그림 11 여러가지 배수재 대한 동수경사와 통수능력과의 관계

그림 11은 위의 4가지 배수재에 대한 동수경사에 따른 통수능력의 변화를 보인다. 이 시험에 있어서 구속압력을 1.0 kg/cm^2 부터 3.0 kg/cm^2 까지 변화시켰다. Darcy의 법칙에 의하면, 침투수량은 동수경사에 비례하므로 이론적으로는 모든 측정들이 일직선상에 있어야 하나, 시험결과는 동수경사가 클수록 통수능력은 약간 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 경향은 모든 배수재에서 거의 동일하게 나타났다.

여기서 통수능력에 대한 시험에 있어서는 동수경사를 얼마로 정할 것인가 하는 문제가 생긴다. 현장에서 밴드 드레인을 타설한 후 과재하중 (surcharge)이 완전히 제하되었을때 과잉간극수압은 최대가 될 것이므로, 이때 동수경사는 최대가 될 것이다. 그런데 통수능력의 시험에 있어서는 일반적으로 1을 표준으로 하는 것 같다. 여기서도 동수경사를 1로 정하여 수행하였다.

6.2 경과시간의 영향

구속압력을 0 으로부터 4 kg/cm^2 까지 증가시키면서 통수능력의 변화를 측정하였다. 구속압력은 한단계 마다 24시간씩으로 하였는데, 각 구속압력에 대한 24시간동안의 통수능력의 변화는 그림 12에 나타나 있다. 이 그림을 보고 알 수 있는 바와 같이 압력이 클수록 시간의 경과에 따라 통수능력의 감소를 보인다. 이러한 경향은 4가지 배수재 중 Mebradrain이 가장 심한 것 같다. 이것은 필터가 시간이 지날 수록 그 기능이 떨어진다는 것을 말해주고 있다. 현장에서는 실제로 3개월 내지 1년이상 구속압력을 받는 상태로 방치하므로 배수재의 시간경과에 따른 통수능력의 저하를 대단히 주의깊게 관찰할 필요가 있다.

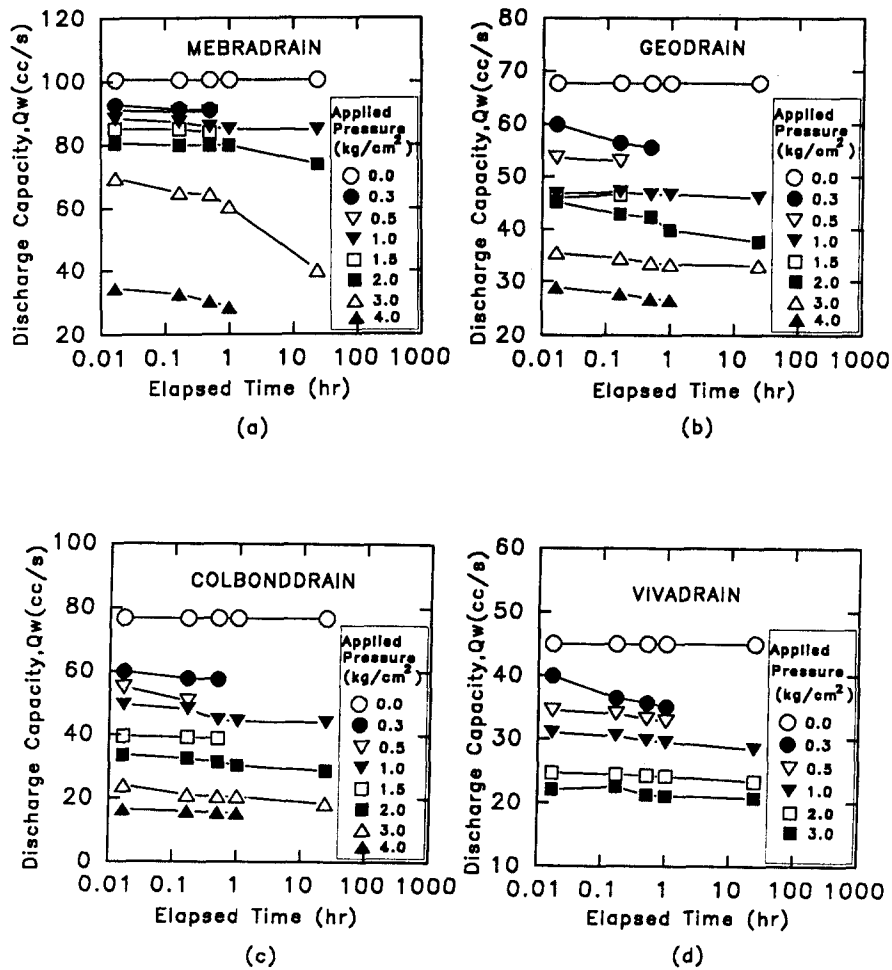


그림 12 통수능력에 대한 구속압력과 시간 경과의 영향

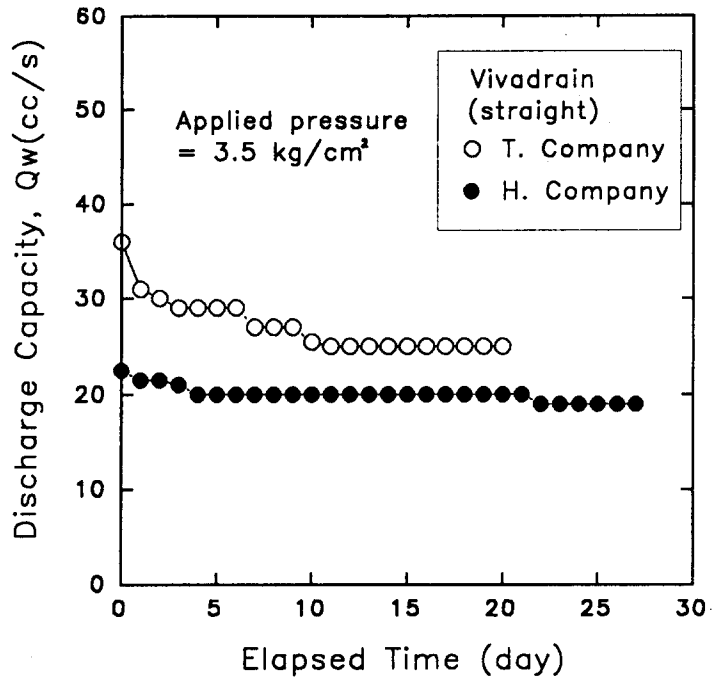


그림 13 두 국산 배수제에 대한 경과시간과 통수능력의 관계

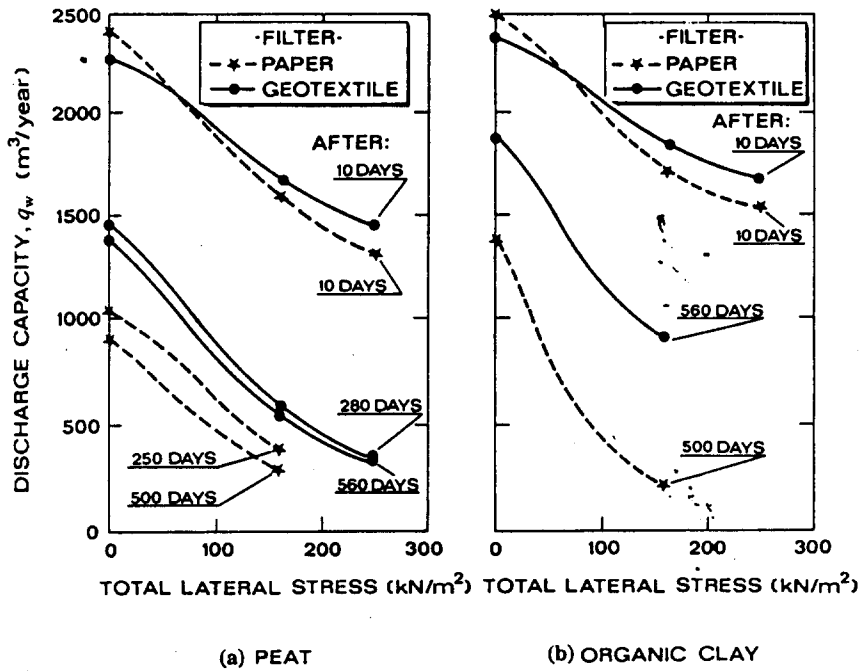


그림 14 장기간의 경과시간에 대한 통수능력의 변화(Koda et al., 1986)

그림 13은 국산 밴드 드레인 중 제조회사가 다른 두가지 제품에 대해 통수시험을 한 결과이다. 두가지 모두 구속압력을 3.5kg/cm²로 두고 약 1개월간에 걸쳐서 통수능력을 측정하였다. 두가지 모두 1개월의 방치기간 중 10% 이상 30%까지 그 능력이 저하된다는 것을 이 그림은 보여주고 있다. 위의 시험에서는 불과 1개월 정도의 경과시간에 대한 시험이었지만, 만일 현장에서의 실제의 경과시간에 대해서는 어떻게 될 것인가 하는 의문이 생긴다. Holtz et al.(1989)의 연구에 의하면 땅 속에서 1,000일 방치후 q_w의 값은 원래 값의 10%이하로 감소하였고, polyester 필터의 경우에는 구속압력의 증가에 따라 감소정도가 더 민감하였다고 한다.

Koda et al.(1986)은 Geodrain 배수재를 오랫동안 땅 속에 관입시켜둔 다음 주위에 있는 흙과 함께 샘플링하여 경과시간에 대한 통수능력시험을 수행하였다. 이 시험은 이탄과 유기질토의 두가지 연약지반에 대해 실시하였는데, 그 시험결과는 그림 14에 보인다. 시간의 경과에 따라 통수능력은 감소하나, 특히 종이필터를 사용한 것이 현저히 감소된다는 것을 알 수 있다.

6.3 구속압력의 영향

그림 15는 전술한 4가지 배수재에 대해 횡압과 통수능력의 관계를 보여주고 있다. 이 그림을 보면 모든 배수재는 횡압의 증가에 따라 통수능력이 현저히 감소한다는 사실을 알 수 있다. 예컨대, Mebradrain의 경우에 있어서는 횡압이 없을 때의 통수능력 100cc/s이었으나, 4kg/cm²로 횡압이 증가했을 때에는 30cc/s까지 급격하게 감소한다는 사실을 알 수 있다. 이것은 앞서 설명한 바와 같이 횡압이 클수록 필터가 코아쪽으로 휘어져서 통수를 방해하기 때문이다.

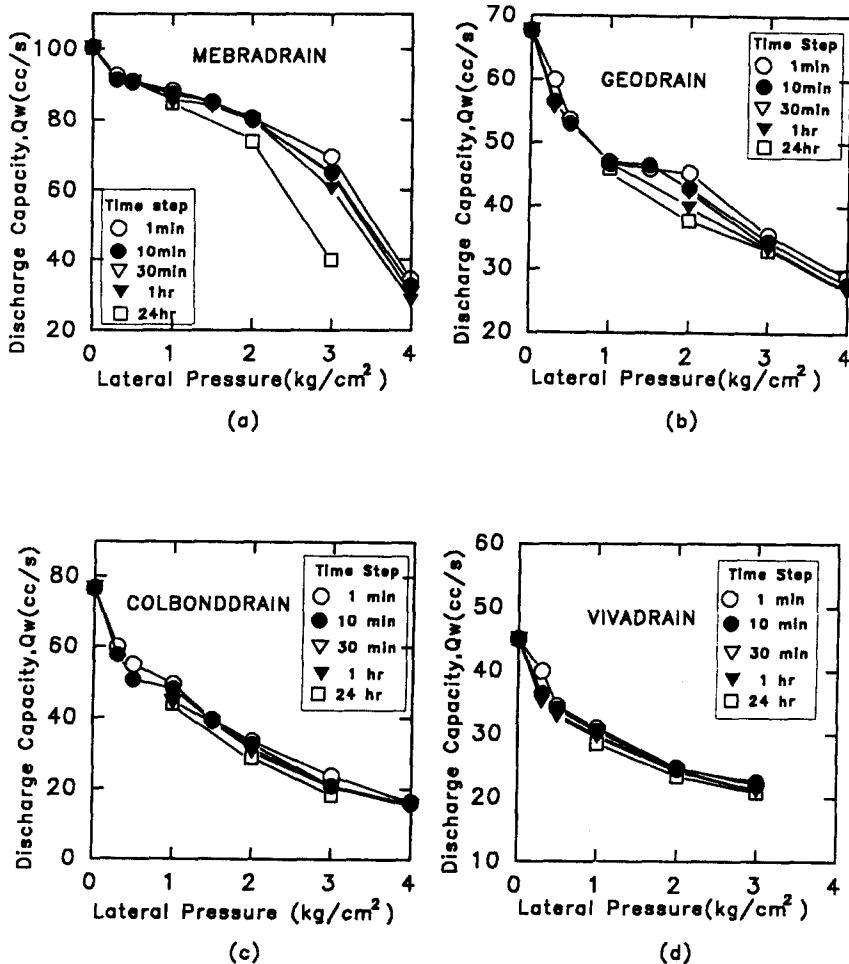


그림 15 여러가지 배수재에 대한 횡압력의 영향

위의 4가지 배수재에 대한 통수능력과 횡압력의 증가에 따른 통수능력의 비교는 그림 16에 나타나 있다. 본 시험에 있어서는 Mebradrain의 배수능력이 가장 뛰어나고 국산 배수재는 그 능력이 다른 배수재에 비해 많이 떨어진다는 사실을 알 수 있다.

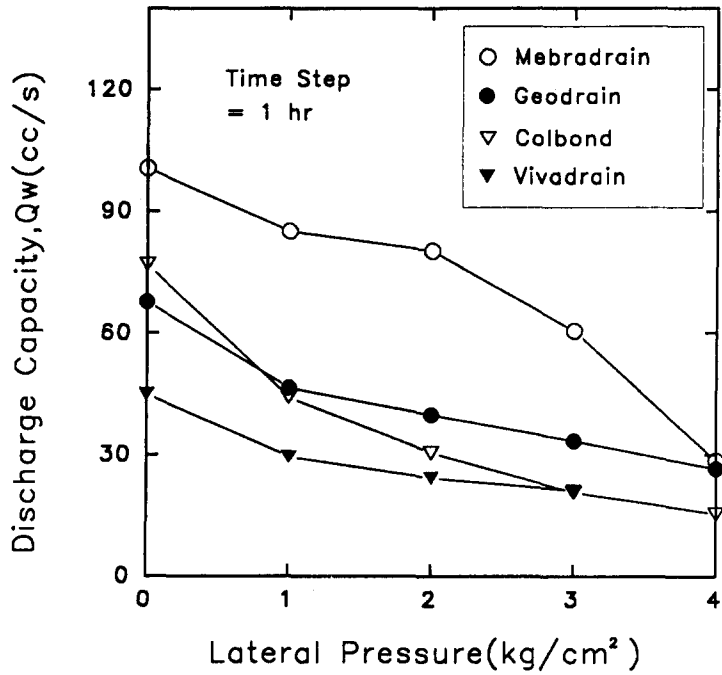


그림 16 배수재가 직선상일 때 통수능력의 비교

6.4 배수재가 변형을 받았을 때의 통수능력

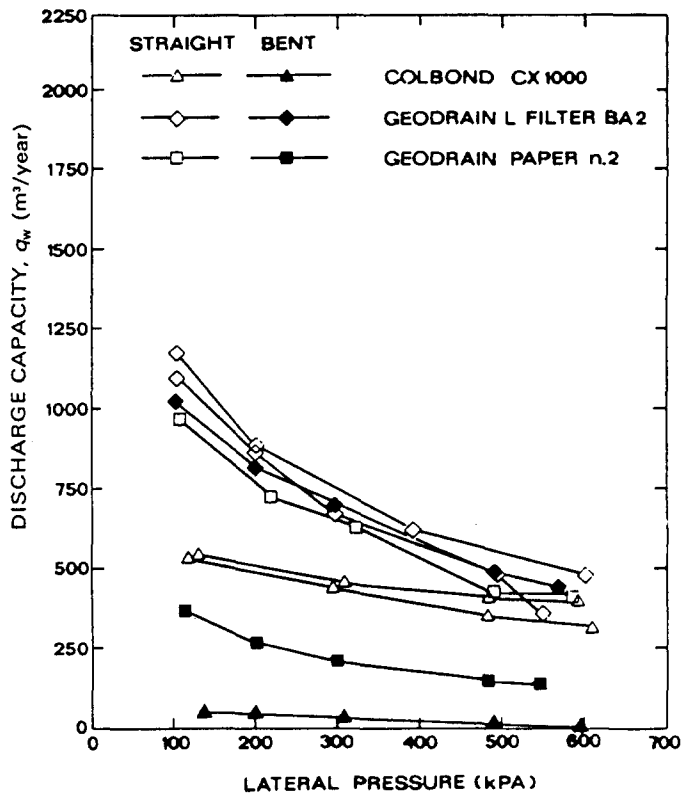


그림 17 20% 변형을 받았을 때의 통수능력의 감소(Holtz et al., 1989)

배수재가 변형을 받았을 때의 통수능력의 변화에 대해서는 Holtz et al.(1989)에 의해 수행되었다. 이 시험은 Enel-Cris 시험소에서 수행되었는데 배수재 주위에 연약한 점토를 두고 변형률이 20%가 되도록 압밀시킨 다음 통수시험을 하였다. 이 시험은 Colbond, Geodrain filter, Geodrain paper의 3가지 재료에 대해 시험하였는데, 그림 17에 보인 바와 같이 모든 배수재는 20% 변형시 통수능력이 상당량 감소되며, 그 감소량은 배수재에 따라 많은 차이가 있다는 사실을 알 수 있다.

Kinking시험을 한 결과에서도 통수능력은 현저히 감소된다. Lawrence and Koerner(1988)의 시험결과를 보면 가장 낮은 kinking force에서도 통수능력이 9%에서 72%까지 감소하였고, 가장 높은 압력에서는 32%부터 99%까지 감소하였다고 보고하고 있다(90° 세기형인 경우).

Holtz et al.(1989)은 세계 여러 제품을 수집하여 통수시험을 해 본 결과 제품마다 차이가 있고 그 차이는 무려 100배까지 이르는 것으로 보고하고 있다. 심지어 동일 회사의 제품도 10배의 차이가 있는 것을 발견하였으며, 보통 동일상표에서 10 - 15%정도의 차이는 존재한다고 하였다. 따라서 상품명과 모델번호만으로 배수재의 성능을 판단하는 것은 극히 위험하다고 할 수 있다.

6.5 필터의 막힘 가능성

필터의 막힘가능성(clogging potential)에 대해서는 외국산 3가지 종류에 대해 시험을 수행하였다. 동수경사는 1, 5, 10으로 바꾸어서 시험하였는데, 그 결과는 그림 18에 나타나 있다. 동수경사가 1일때의 Geodrain을 제외하고는 모두 GR값이 1 또는 그 이하로 떨어진다. GR<1인 경우는 흙입자가 빠져 나간다는 뜻이 됨으로 주위에 있는 흙의 파이핑 가능성을 시사하고 있다. 이 시험에서 사용된 점토는 영종도의 해성점토를 공기건조시켜 조제한 것이다.

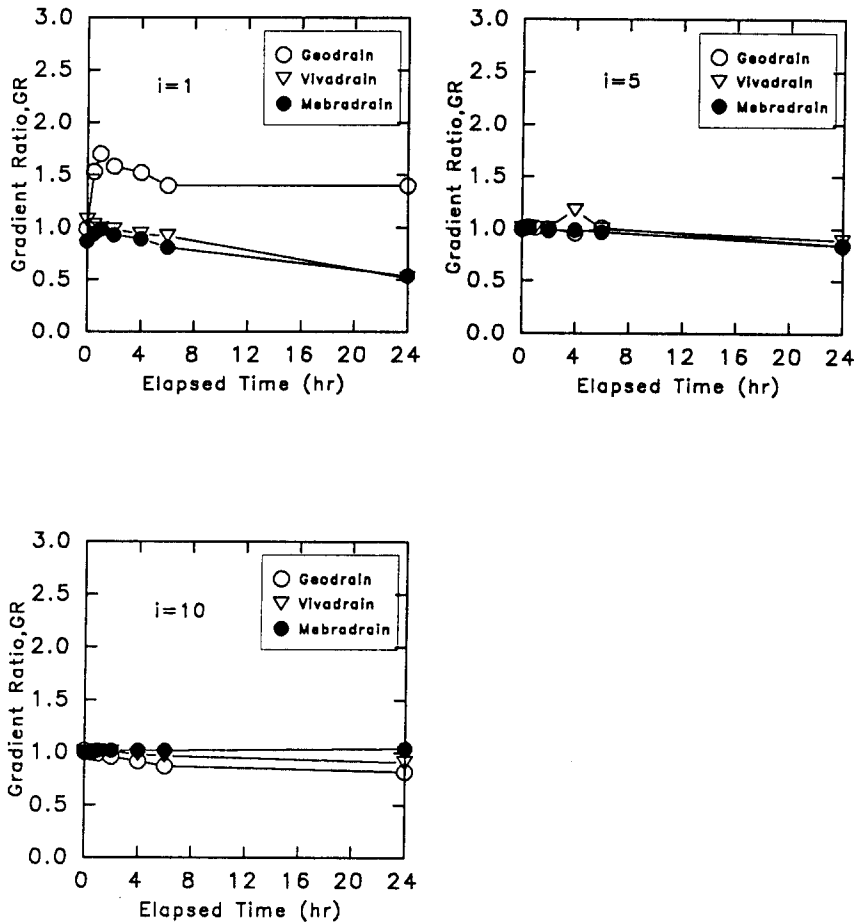


그림 18 세가지 배수재에 대한 필터의 막힘가능성시험 결과

7. 배수재 품질에 관한 기준

7.1 인장강도 및 파열강도

인장강도는 밴드 드레인 전체에 대한 것과 필터에 대한 것으로 나누어 생각할 수 있다. Kremer et al.(1982)의 연구에 의하면, 전자에 대해서는 인장강도가 어떤 경우에 대해서도 0.5kN이상이어야 하고 파괴시의 변형율은 2%이상 10%이하를 권장하고 있다. 가끔 시공중에 밴드 드레인을 연결하는 경우가 있는데 이 때에도 위의 기준은 적용되어야 할 것이다.

필터에 대해서는 물에 민감한 것(필터가 종이인 경우)과 그렇지 않은 것으로 나누인다. 물에 민감한 필터는 쉽게 연화되어 젖으면 강도가 저하되고 약간의 인장력에 대해서도 쉽게 늘어났다. 이것을 시험할 때에는 시험 전에 시료를 충분히 포화시켜야 하고, 이 경우에 대한 기준을 Kremer et al. (1982)은 다음과 같이 정하고 있다.

- (1) 최대인장강도는 1.2kN/m이상
- (2) 파괴시 변형율은 2%이상 10%이하

물에 민감하지 않은 밴드 드레인에 대해서도 24시간 포화시켜 폭방향으로 인장력을 가한다. 그 기준은 다음과 같이 정하고 있다.

- (1) 최대인장강도는 변형율 2%에서 0.750kN/m이상
- (2) 또는 10% 변형율에서 0.375kN/m이상

그림 19는 Kremer et al. (1982)가 제안한 기준과 몇가지 페이퍼 드레인에 대한 시험 결과를 보인 것이다.

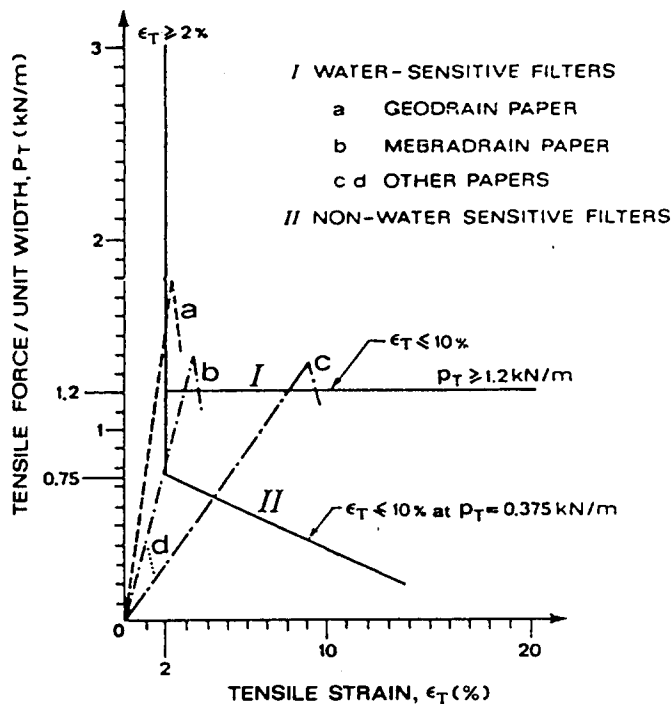


그림 19 밴드 드레인의 인장시험의 기준치(Kremer et al., 1982)

한편, Christopher and Holtz(1985)는 그들의 연구결과로부터 다른 기준치를 제안하고 있다(표 3 참조). 영국토목학회에서도 이미 이에 대한 기준이 제정된 것으로 알고 있으나 여기서는 수록하지 못하였다.

표 3은 지오텍스타일 필터의 물리적 특성에 대해 Christopher and Holtz(1985)가 제안한 최소기준치이다.

표 3 지오텍스타일 필터의 물리적 특성의 기준(Christopher and Holtz,1985)

| 특성 | 공업규격 | 최소기준치 |
|-------------------|-------------|----------------------|
| Grab strength | ASTM D 4632 | 350N |
| Puncture strength | ASTM D 4833 | 100N |
| Burst strength | ASTM D 3786 | 900kN/m ² |
| Traezoid tear | ASTM D 4533 | 100N |

7.2 통수능력

위에서 언급한 바와 같이 배수재는 여러 원인에 의하여 그 기능이 감소된다는 사실을 알 수 있었다. 그러므로 밴드 드레인에 의한 지반 개량효과가 전혀 지장을 받지 않으려면, 어느 범위까지 용납되는 것인가 하는 것이 문제될 수 있다. Holtz 등(1991)은 그들의 연구에서 어떠한 경우에도 최소로 요구되는 통수능력은 동수경사 1에 대하여 100 - 150m³/year(3.17 - 4.76cc/s)이고, 개량지반의 수명방향 투수계수(k_w)를 고려한다면, q_w/k_w>1,000 - 1500m² 이 되면 웰 레지스탕스는 문제되지 않는다고 주장하고 있다. 여기서 q_w는 통수능력이다.

요구되는 통수능력은 배수재의 품질은 물론 개량지반의 흙의 투수성에도 관련된다. 투수성이 크면 압밀의 속도는 빠르지만, 단위시간당 배수량이 크므로 요구되는 통수능력도 더 커야 할 것이다.

Lawrence and Koerner(1988)는 요구되는 통수능력을 다음과 같이 제안하였다.

$$q_{act} = (3.14 \frac{D^2}{4}) (\frac{S}{t}) \quad (4)$$

$$q_{req} = q_{act} \times F_s \quad (5)$$

여기서, q_{act} : 계산상 필요한 통수능력
 D : band drain의 배치간격
 S : 압밀도 U에서의 침하량
 t : 압밀도 U까지의 시간
 q_{req} : 설계통수능력
 F_s : 안전율, 보통 3을 적용

7.3 필터에 대한 기준

필터의 기능은 그 주위에 있는 흙입자와 깊이 관련된다. 필터가 만족한 기능을 하려면, 이의 구멍이 충분히 작아서 가는 흙입자를 투과시켜서는 안되고, 반면 구멍이 충분히 커서 물을 자유롭게 투과시켜야 한다. 첫째 기준을 만족하기 위해서는 부직포 지오텍스타일인 경우 O₉₅ < 1.8 D₈₅ 를 만족하고, 또한 실보기 눈금 칫수(AOS)는 0.3mm보다 작아야 한다. 여기서 O₉₅는 지오텍스타일의 눈금크기중 95%가 이보다 작은 눈금이고, D₈₅는 흙입자의 85%가 이보다 작은 입경이다. 두번째 기준을 만족하기 위해서는 지오텍스타일의 투수계수가 충분히 커야 한다. 투수문제가 대단히 중요한 경우에는 k_{geo}>10 k_{soil}이고, 그렇지 않은 경우에는 k_{geo}>k_{soil}이면 된다.

위에 적은 것은 Christopher and Holtz(1985)가 제안하는 기준이지만, Hansbo(1992)는 일반적인 연약지반의 경우 요구되는 필터의 투수계수를 다음과 같이 제시하고 있다. 즉, 그 두께가 0.2mm인 경우 0.03m/year(10⁻⁷cm/sec)이상, 두께 0.5mm인 경우 0.1m/year(3×10⁻⁷cm/sec)이상이어야 한다.

위의 기준에 추가해서 한가지 더 중요하게 고려해야 할 사항이 있다. 그것은 얇은 두께의 필터가 흙의 작은 입자의 통과로 말미암아 막히게 될 수 있는 가능성(clogging potential)이다. 이것은 앞서 설명한 동수경사시험(gradient ratio test, GR)으로 가능하다. Christopher and Holtz(1985)가 제안하는 기준은 k>10⁻⁷m/s인 흙(실트, 점토질 모래 및 실트질 모래)에 대해서는 GR<3이면 만족스러운 것으로 간주하고 있다. 그러나 투수계수가 이보다 낮은 흙에 대해서는 장기간의 시험이 요구된다.

막힘 가능성에 대해 기준을 정하는 원칙은 지오텍스타일의 구멍이 충분히 커서 흙의 가는 입자가 통과해야 한다는 것이다. 따라서 지오텍스타일의 큰 구멍뿐만 아니라 작은 구멍의 칫수도 중요하므로 다음의 기준도 적용될 수 있다.

- (1) $O_{95} > 3D_{15}$
- (2) $O_{15} > 2-3D_{15}$

표 4는 싱가포르 창이공항에서의 밴드 드레인에 대한 시방서이다. 여기서는 Colbond드레인을 사용하였고, 해성점토의 평균 액성한계는 90 - 100%, 소성한계는 대략 40%정도가 된다(Choa, 1994). 표 5는 홍콩의 연약지반에 재하여 Sung(1994)이 제안하는 기준치이다.

표 4 싱가포르 창이공항의 Colbond드레인에 대한 품질 시방서

| 재료특성 | 단위 | 최소치 | 시험조건 |
|------|----------------------|----------|---|
| 전체 | 통수능력 | m^3/s | $> 25 \times 10^{-6}$ 횡압 350kN/m ² |
| | (직선) | m^3/s | $> 60 \times 10^{-6}$ 4주 경과후 |
| | (변형시) | m^3/s | $> 10 \times 10^{-6}$ * 변형율 25% |
| | 인장강도(건조시) | kg/10cm폭 | > 100 2% < 변형율 < 10% |
| | (습윤시) | kg/10cm폭 | > 100 2% < 변형율 < 10% |
| | 흡입자 저지능력(O_{90}) | μm | < 75 |
| 필터 | 신장율 | % | < 10 100kg/10cm |
| | 인장강도(건조시) | kg/cm | > 3 |
| | (습윤시) | kg/cm | > 3 변형율 1%/min, 48시간 10°C의 물속에서 포화후 |
| | 투수계수 | m/s | $> 5 \times 10^{-6}$ |
| | 신장율(건조 및 습윤) | % | 10 3kg/cm |

*ASTM Specification

표 5 홍콩의 기준의 제안(Sung, 1994)

| 재료특성 | 단위 | 최소치 | 시험조건 |
|----------------------|---------|-----------------------|----------------------------------|
| 인장강도 | kN | > 1 | 신장율 2%일 때(최대 10%) |
| 통수능력(직선) | m^3/s | $> 25 \times 10^{-6}$ | 횡압 350kN/m ² , 4주 경과후 |
| (변형) | | 직선상시험에 대한 75%이상 | 25% 변형시 |
| 흡입자 저지능력(O_{90}) | μm | > 90 | 대단하가는 균등입자 |
| | μm | < 125 | 입경이 불균질한 흙 |
| 투수계수 | m/s | $> 10^{-6}$ | |

7.4 배수재의 열화

앞서 설명한 장기간의 시험결과에서 보는 바와 같이, 밴드 드레인에 작용하는 횡압력이 크고 장기간 적용할 때에는 통수능력이 현저히 떨어진다. 이는 분명하다. 이것은 배수재의 물리적 특성은 물론 생화학적 성질에 기인하는 것으로 생각될 수 있다. 폴리머는 다른 재료에 비해 일찍 노후화된다는 것은 공통적으로 인식하고 있는 사실이다. 이에 대한 확인은 현장시험으로 가능하나 장기간의 관측과 시험이 요구된다. 그 동안 여러 연구자들은 현장에 밴드 드레인으로 시공하고 수년후에 이것을 수거하여 노후화상태를 점검하는 방법으로 그 결과를 발표하고 있다(Hegg et al. 1983; Jamiolkowski et al., 1983; Kremer, 1983).

이들 시험결과에 대한 잠정적인 결론을 요약하면, 일반적인 상황하에서는 땅속에 묻힌 밴드 드레인은 산소의 결핍으로 생화학적 활동이 활발하지 않다는 것이다. 그러나 독성이 있는 곳이나 pH가 높은 환경하에서는 배수기능을 현저히 저하시킬 수 있는 화학적 및 생물학적 노후화가 예상된다. 밴드 드레인에 대해 가장 우려해야 할 사항은 자외선에 대한 노출이다. 제조회사가 중량비로 polyolyfin, polyester, 또는 polyamide의 성분이 최소85%가 되도록 하면, 자외선 노출시 밴드 드레인은 저항할 수 있다고 한다. 그러나 지오택스타일 필터는 제조부터 시공까지 30일 이상 햇빛(자외선)에 노출되어서는 안된다. 만일 자외선에 민감한 지오택스타일이라면 5일 이상 노출되어서는 안된다고 한다(Holtz et al., 1991).

8. 결론 및 제언

지금까지 밴드 드레인의 품질이 연약지반의 개량효과에 어떠한 영향을 끼치는가에 대해 알아보았다. 그 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

- (1) 배수재는 압밀이 진행되는 동안 지속적으로 변형을 받는다. 이 변형은 지반의 압밀침하와 함께 배수재가 휘거나, 접히거나, 꼬이거나 하는 것이며, 이러한 변형으로 인해 통수능력이 현저히 감소된다.
- (2) 깊은 심도에 있는 배수재는 큰 횡압을 받는다. 이 횡압으로 필터가 코아쪽으로 휘어져서 코아의 배수단면은 줄어든다. 이로 인해 심도가 깊을수록 통수능력이 떨어진다.
- (3) 배수재는 지반에 삽입 후 시간이 지날수록 통수능력이 떨어진다. 이것은 필터가 크리프현상으로 늘어나거나 생화학적 작용으로 열화되기 때문이다.
- (4) 밴드드레인의 성분인 폴리머는 자외선을 받으면 쉽게 열화된다. 이것이 지중에 삽입되었을 때에는 산소의 결핍으로 열화정도가 낮지만, 생산직후부터 타입시까지의 보관시간이 길수록 열화의 우려는 더 커진다.
- (5) 성공적인 지반개량을 위해서는 위와 같은 모든 품질 저하 요인에 대해 시험하여 최소의 기준이 만족되도록 하여야 한다.

밴드 드레인은 세계 여러 나라에서 많은 종류가 생산되고 있다. 위에 적은 여러 특성에도 불구하고 외국에서 생산되고 있는 이름있는 상품은 이미 성능에 대한 실내시험 및 현장에서의 검증은 받았으므로 거의 안심하고 사용할 수 있다. 그러나 밴드 드레인의 품질은 제조회사에 따라서 크게 다를 뿐만 아니라, 동일한 상품명이라 하더라도 구성성분의 약간의 변경, 보관상태, 사용 시일에 따라 다를 수 있으므로 유명한 상품이라 하더라도 시험 직전 주기적으로 시험과 검사를 하는 것이 중요하다. 밴드 드레인의 품질을 평가할 수 있는 중요한 항목은 배수재의 물리적 특성, 통수능력, 필터의 투수 및 막힘 가능, 배수재의 생화학적 열화 등이다. 우리나라에서도 몇 가지 밴드 드레인이 생산되어 연약지반개량에 더러 적용하고 있지만, 물리적 특성 이외의 시험에 대해서는 실시하지 않고 있으며, 이에 대한 품질에 관한 시방서도 극히 개략적이다. 이 공법의 활발한 적용을 위해서는 웰 레지스턴스 및 관련되는 모든 시험을 수행하여 품질을 검증할 필요가 있다. 또한 품질시험에 대한 공업규격의 제정도 필요하다.

감사의 말

AIT에서 안식년을 보냈던 홍성완 박사로부터 이 논문에 인용된 많은 문헌을 입수할 수 있었던 것을 고맙게 여긴다. 외산 및 국산의 몇가지 배수재에 대한 시험은 각각 동국대 박사과정과 석사과정에 있는 김현태 군과 김학진 군이 수행하였다. 이 자리를 빌어 감사의 말씀을 드린다.

참고문헌

- 김수삼(1994), "적현단지에 한국 최초로 적용된 paper drain 공법", 한국지반공학 발자취, 한국지반공학회, pp. 221-228.
- 박영목(1994), 저평지에 퇴적한 해상점토의 토질특성과 연직배수공법에 의한 지반개량에 관한 연구(일본어), 박사학위 논문, 사가대학 대학원.
- Barron, R. A.(1948), "Consolidation of Fine-grained Soils by Drain Wells", Trans, ASCE, 2346, pp. 718-754.
- Broms, B. B. and Chu, J. and Choa, V.(1994), "Measuring the Discharge Capacity of Band Drains by a New Drain Tester", 5th Int. Conf. on Geotextile, Geomembrane and Related Products, Singapore, pp. 803-806.
- Choa, V. (1994), "Reclamation on Soft Ground for Port and Airport Development", Proc. Reclamation - Important Current Issues, Geotechnical Div., the Hong Kong Institution of Engineers, pp. 1-32.
- Christopher, B. R. and Holtz, R. D.(1985), Geotextile Engineering Manual, U.S. Federal Highway Administration, Washington, DC.
- Geotechnical Control Office(1991), Review of Band Drain, Geotechnical Control Office, Civil Engineering Service Department, Hong Kong.
- Hegg, U., Jamiolkowski, M., Lancellotta, R. and Parvis, E.(1983), "Behavior of Oil Tanks on Soft Cohesive Ground Improved by Vertical Drains", Proc. 8th European Conf. on SMFE, Vol. 2, Helsingki, pp. 627-632.
- Hansbo, S.(1979), "Consolidation of Clay by Band-shaped Prefabricated Drains", Ground Engg., Vol.12, No.5, pp. 16-25.
- Hansbo, S.(1992), "Preconsolidation of Soft Compressible Subsoil by the Use of Prefabricated Vertical Drains", Workshop on Applied Ground Improvement Technique, Southeast Asian Geotechnical Society.
- Holtz, R. D., Jamiolkowski, M., Lancellotta, R. and Pedroni, S.(1989), Behavior of Bend Fabricated Drains, Proc., 12th ICSMFE, Rio de Janeiro, Vol. 3, pp. 1659-1660.
- Holtz, R. D., Lancellotta, R., Jamiolkowski, M. and Pedroni, S.(1991), "Laboratory Testing of Prefabricated 'Wick' Drains", Geo-Coast '91, Yokohama, pp. 311-316.
- Holtz, R. D., Jamiolkowski, M., Lancellotta, R., and Pedroni, S.(1991). "Prefabricated Vertical Drains : Design and Performance", Construction Industry Research and Information Association.
- Jamiolkowski, M., Lancellotta, R. and Wolski, W.(1993), "Precompression and Speeding up Consolidation", Proc. 8th European Conf. of SMFE, Vol. 2, Helsingki, pp.1201-1226.
- Kamon, M., Pradhan, T. B. S. and Suwa, S.(1991), "Evaluation of Design Factors of Prefabricated Band-shaped Drains," Geo-Coast '91, Yokohama, pp. 329-334.
- Koda, E., Szymanski, A. and Wolski, W. (1986), "Laboratory Test on Geodrains : Durability in Organic soils", Proc., Seminar Laboratory Testing of Prefabricated Band-shaped Drains, Milan.
- Kremer, R., De Jageer, W., Maagdenberg, A., Meyvogel, I. and Oostveen, J. (1982), "Quality Standard for Vertical Drains", Proc. 2nd Int. Conf. on Geotextiles, Vol. 2, Las Vegas, Nevada, pp. 319-324.

- Kremer, R.(1983), Discussion, Speciality Session 2, Proc. 8th European Conf. on SMFE, Vol. 3, Helsingki, pp. 1235-1237.
- Lawrence, C. A. and Koerner, R. M.(1988), Flow Behavior of Kinked Strip Drains, Proc. of the Symposium of Geosynthetics for Soil Improvement, ASWCE Spring Convention, Nashville, Tenn., ASCE Geotechnical Special Publication, No. 18, pp.22-38.
- Madhav, M. R., Park, Y. M. and Miura, N.(1995), Mechanics of Kinking and Buckling of Plastic Board Drains, Structural Engineering and Mechanics, Vol. 3, No. 5, pp. 429-443.
- Rixner(1986) and Hansbo(1987), Design Aspects of Vertical Drains and Lime Column Installation, Proc, 9th Southeast Asian Geotechnical Society Conf., Bangkok.
- Sung, A.(1994), "Vertical Drains, Overview", Proc. on Ground Improvement Methods, the Geotechnical Div. of the Hong Kong Institute of Engineers, pp. 117-131.
- Zanten, R. V. V.(1986), Geotextile and Geomembranes in Civil Engineering, A. A. Balkema, pp. 527-573.