

페타이어를 이용한 지반동상 방지

The Control of the Ground Frost Heave by Using the Scrap Tire

김 영 진*¹

Kim, Young-Chin

강 병 희*²

Kang, Byung-Hee

Abstract

It was investigated whether the scrap tire can be recycled as a construction material for controlling the frost heave of the ground. Some frost heave tests and a frost penetration depth test in the laboratory were performed on the weathered granite soil mixed with variable amount of scrap tire powder under the atmospheric temperature at -17°C to find the basic effects of the scrap tire on the control of frost. The frost heave control layer of the crushed stone mixed with scrap tire chips directly below the subbase in the bituminous pavement was found to be effective for practical use. And the equation for the required thickness of this frost heave control layer with freezing index was suggested.

요 지

페타이어가 지반의 동상방지 건설재료로서 재사용될 수 있는지를 연구하였다. 동상방지에 대한 페타이어의 기본적인 효과를 검토하기 위해 화강풍화토에 페타이어가루를 몇 가지의 비율로 혼합해서 준비한 시료로서 영하 17°C 하에서 동상시험과 화강풍화토에 대한 동결깊이시험을 실내에서 수행하였다. 역청포장의 보조기층 바로 아래에 페타이어조각을 혼합한 쇠석층을 동상방지층으로 들으므로 실용상으로 효과적이라는 사실을 알게 되었다. 그리고 이 동상방지층의 소요두께와 동결지수와의 관계식을 제안하였다.

Keywords : Frost heave, Frost penetration depth, Recycling of scrap tire, Frost heave control layer, Bituminous pavement

1. 서 론

계절동토지역인 우리나라에서는 겨울철 및 봄철에 도로, 철도, 매설관 등이 동상이나 융해

침하에 의한 피해를 받고 있다. 지금까지 국내 도로에는 동상을 방지하기 위해 동상성(frost susceptibility)의 흙을 비동상성 재료인 자갈

*¹ 정희원, 한국건설기술연구원 지반연구실 수석 연구원

*² 정희원, 인하대학교 공과대학 토목공학과 교수

이나 쇄석으로 치환하는 방법을 이용하여 왔다. 즉, 도로의 보조기층과 노상토 사이에 자갈이나 쇄석의 동상방지층을 설치하여 동상의 피해를 방지하고 있다. 그러나 최근 대형건설공사로 인해 쇄석 및 자갈의 수요가 늘어나므로 동상방지층에 포설할 대체재료의 개발을 고려할 필요가 있다.

대체재료로서 열전도율이 낮은 페타이어조각, 페스티로폴조각 및 제강슬래그 등의 산업부산물을 쇄석 및 자갈과 혼합하여 이용할 경우 도로의 동상을 효과적으로 방지할 수 있을 뿐만 아니라, 발생량이 급격하게 증가하고 있는 산업부산물을 처리할 수 있으므로 환경문제 해결에도 큰 도움이 될 것으로 예상된다.

본 연구에서는 이들 산업부산물 중 페타이어조각을 선정하여 이를 쇄석과 혼합하여 동상방지층으로 이용할 경우의 효과에 대해 연구하였다. 이를 위해 페타이어가루를 혼합한 화강풍화토에 대한 동상시험 및 동결깊이시험을 시행하고 아울러 도로 노상토에 대한 페타이어조각-쇄석 동상방지층의 효과 및 필요두께에 대한 시험을 실시하여 결과를 분석하였다.

2. 동상 및 동결깊이

2.1 동상

대기온도가 0℃이하로 장기간 지속되면 지표면 부근의 간극수는 차츰 얼기 시작한다. 이때 모관압력에 의해서 얼지 않은 지중으로부터 물이 동결면으로 이동하여 동결하므로서 빙편(ice lens)이 생기고, 이 빙편이 점점 커지고 수량도 증가하므로서 지반이 팽창하여 융기되는 현상을 동상이라고 한다. 동상량은 흙의 입도에 의해서 크게 좌우되는데 토립자 입경이 0.1mm 이상의 사질토에서는 잘 일어나지 않으며 0.05~0.1mm 범위에서 동상이 일어나기 시작하고 0.002~0.05mm 범위의 흙에서 동상량이 가장 크게 발생한다. 그러나 입경이 이보다 더 작으면 투수성이 작아져서 오히려 동상은 잘 일어나지 않는다. 그리고 동상량은 0℃이하

의 대기온도의 지속시간과 지하수위에 의한 물보급원의 유무에 따라 크게 좌우된다. 또한 상재암이 클수록 그리고 간극수의 점성이 클수록 동상량은 감소한다. 동상량이 최대가 되는 시기는 최대동결깊이가 되는 시기와 일치하지 않고 대부분이 그 이전에 일어난다(일본토질공학회, 1982).

2.2 동결깊이

지표면의 대기온도가 0℃보다 낮아지게 되면 간극수의 동결은 지표면으로부터 시작해서 점차 깊이가 깊어지게 된다. 동결은 온도하강이 클수록 그리고 흙의 열전도율이 클수록 빠르게 진행되고 흙의 열용량이 클수록 서서히 진행된다. 동결깊이를 산정하는 몇 가지 식을 열거하면 아래와 같다.

2.2.1 Stefan 이론식

Stefan(1890)은 동결과 비동결영역 사이에서의 물의 온도는 0℃이고, 지표면 온도는 대기온도와 같고, 동결영역에서의 온도는 선형적으로 변화하고, 얼음과 물의 밀도는 동일하다고 가정하고 동결깊이 Z(m)를 식 (1)과 같이 나타내었다.

$$Z = \sqrt{\frac{2K}{Lw\gamma_s}(T_r - T_s)t} \quad (1)$$

식(1) 중에서 K는 동결토의 열전도율(Kcal/m h °C), L는 물의 잠열(Kcal/kg), w는 함수비(%), γ_s 는 흙의 건조밀도(kg/cm³), T_r는 물의 결빙온도(0℃), T_s는 지표면의 온도(℃), t는 동결지속시간(hr)이다.

2.2.2 수정 Stefan의 이론식

식(1), 즉 Stefan의 식은 동결 및 비동결 조건 하에서 흙의 체적열용량을 무시하기 때문에 실제보다 과대한 값을 나타내므로 Aldrich와 Paynter(1953)는 이를 고려한 수정계수 λ 를 도입하여 식(2)와 같은 수정 Stefan의 식을 제안하였다.

$$Z = \lambda \sqrt{\frac{48KF}{Q_L}} \quad (2)$$

식(2) 중 F는 동결지수 (T, t : °C day), Q_L는 흙의 체적잠열(L w γ_a : Kcal/m³), λ는 온도비와 용해정수에 의해서 결정되는 계수로서 1.0보다 작은 값이다(Aldrich와 Paynter, 1953; Sanger, 1963).

2.2.3 Terada(寺田)의 경험식

Terada(寺田)는 기상관측자료로부터 동결깊이 Z(cm)를 구할 수 있는 경험식을 간단하게 식(3)과 같이 제시하였다(일본도로협회, 1979).

$$Z = C\sqrt{F} \quad (3)$$

식(3)중 C는 함수비, 건조밀도, 동결전후의 지표면온도 등에 의해서 결정되는 흙의 열적정수로서 보통 4.0을 취하며 F는 동결지수(°C day)이다.

2.2.4 국립건설시험소 경험식

국립건설시험소는 1980년부터 1989년까지 10년동안 전국 각 지역에 대한 동결깊이를 조사하여 식(4)와 같은 동결깊이 Z(cm)에 대한 산정식을 제안하였다(국립건설시험소, 1989).

$$Z = 14F^{0.33} \quad (4)$$

식(4) 중 F는 동결지수(°C day)이다.

3. 실험

3.1 시료의 성질

3.1.1 흙시료

본 연구에서 사용한 흙시료는 우리나라 어디에서든지 쉽게 발견할 수 있는 화강풍화토로서 토립자 비중이 2.63이고 균등계수가 13인 실트질 모래(SM)로서 다짐시험에 의한 최대건조밀도는 1.82 g/cm³이고 최적함수비는 14.8%이다. 그러나 물의 공급여부에 따른 동상량시험에서는 시료 부족으로 인해 비중 2.69, 균등계수 85, 최대건조밀도 1.83 g/cm³, 최적함수비 16.4%인 다른 화강풍화토를 사용하였다.

3.1.2 페타이어 조각 및 가루

페타이어조각은 3~5cm 크기의 판상으로서 모양이 불규칙하고 가루는 1~2mm 크기의 비교적 일정한 모양을 갖는 입방체이다. 페타이어에 포함되어 있는 유해물질이 용출되어 지하수의 오염을 발생시킬 것인지를 확인하기 위해 페타이어에 대한 회분석용출시험(batch leaching test)을 시행하였으며 그 결과는 표 1에서 볼 수 있는 바와 같이 각종 유해물질의 함유량은 환경기준치 이하이다.

Table 1. Hazardous chemical constituents of scrap tire powder from leaching test(after Kim and Hong, 1994) (mg/l)

Items	Contents	Allowable contents
Cadmium(Cd)	0.0016	0.1
Lead(Pb)	0.04	0.1
Six valence chromium(Cr ⁶⁺)	0.003	0.5
Copper(Cu)	not detectable	3.0
Cyanogen(CN)	<0.001	1.0
Organic phosphorus(P)	<0.1	1.0
Mercury(Hg)	<0.001	0.005
Polychloride di-benzene(PCB)	<0.003	0.03
Arsenic(As)	<0.1	0.5

3.1.3 페타이어 혼합토의 역학적 성질

페타이어조각 또는 가루를 화강풍화토와 혼합하여 준비한 시료를 다짐시험, 일축압축시험 및 직접전단시험을 시행한 결과는 다음과 같다.

화강풍화토에 페타이어가루를 중량비로 0.2, 0.6, 1.2 및 2.0% 혼합하여 A 다짐시험을 한 결과 다짐곡선은 2.0%를 제외하고는 모두 거의 일치하였으며 최적함수비 14.8%에서 1.82 g/cm³의 최대건조밀도를 나타내었다. 그러나 혼합비가 2.0%인 경우에는 최적함수비와 최대 건조밀도가 각각 15.2%와 1.80 g/cm³이었다.

페타이어가루를 혼합한 화강풍화토의 일축

3.1.4 페타이어 혼합토의 열전도율

본 연구와 관련되는 모든 재료들에 대한 열전도율은 QTM식 Probe를 이용하여 측정하였으며 그 결과는 표 2에 제시하였다.

그리고 함수비를 다르게 해서 정적다짐하여 준비한 공시체(직경 10cm, 높이 15cm)를 상온 상태와 -10℃에서 동결시킨 후에 측정한 열전도율은 그림 3에서 나타내었다. 즉 다짐함수비가 증가할수록 열전도율은 증가하고 동결토가 미동결토보다 크다는 사실을 보여주고 있다. 이는 공기의 열전도율이 0.019 Kcal/mh℃로서 가장 작고 얼음의 열전도율이 1.994 Kcal/mh℃로서 물의 0.513 Kcal/mh℃ 보다 훨씬 크기 때문이라 판단된다.

압축강도시험 공시체는 최적함수비 상태에서 정적다짐에 의해서 제작하였으나 페타이어가루를 2% 이상 혼합하였을 경우 공시체가 형성되지 않았다. 일축압축강도는 그림 1과 같이 페타이어가루의 혼합량이 증가할수록 거의 직선적으로 감소하였다.

전단상자크기가 30cm×30cm인 대형 직접전단시험기를 이용하여 구한 페타이어가루 및 페타이어조각을 혼합한 화강풍화토의 내부마찰각은 그림 2와 같이 페타이어 혼합물이 증가할수록 크게 감소하였으며, 점착력은 0.03~0.09 kg/cm² 정도로서 혼합물과 관계없이 비교적 작게 측정되었다.

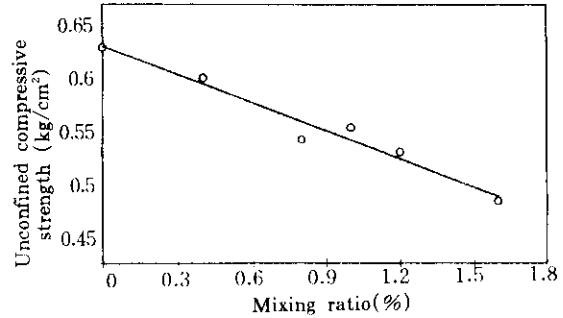


Fig 1. Relationship between unconfined compressive strength and mixing ratio of the scrap tire powder

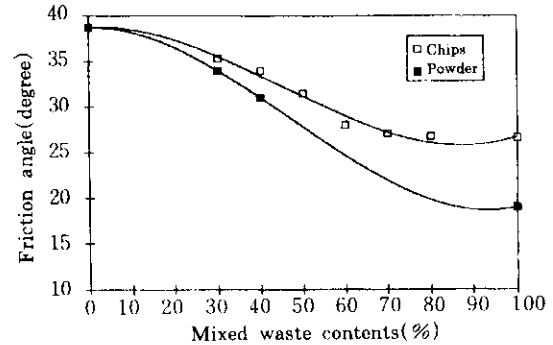


Fig 2. Friction angle of weathered granite soils mixed with scrap tire chips and powder

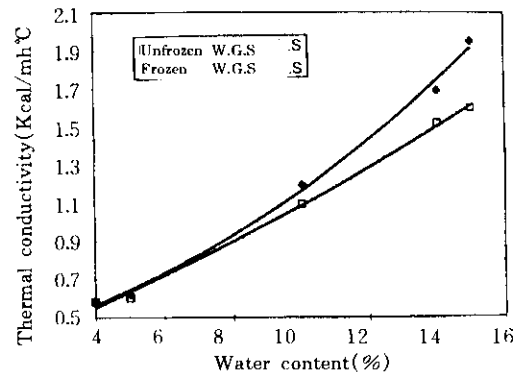


Fig 3. Comparison for thermal conductivity of frozen and unfrozen weathered granite soils

Table 2. Thermal conductivity of materials

Materials	Thermal conductivity : Kcal/mh°C	Temperature : °C (Water content)
Air*	0.019	22
Gravel	0.216	22
Weathered granite soil	0.243	22(0%)
Crushed stone	0.305	22
Scrap tire chips(100%)	0.080	22
Scrap tire chips+crushed stone (7:3)	0.095	22
Scrap tire chips+crushed stone (5:5)	0.118	22
Sand	0.280	22 (0%)
Water*	0.513	-
Asphalt concrete	1.184	22
Ice*	1.994	-10
Quartz*	5.15	22

* Thermal conductivities from references(최인규 등, 1989 ; Jumikis, 1966 ; Frivik, 1980)

3.2 동상시험

동상시험기는 영국교통 및 도로연구소(Transportation and Road Research Laboratory)에서 사용하고 있는 것과 동일하게 제작하였다. 그림 4에서 나타낸 바와 같이 동상시험기는 시료용기를 넣는 시료적재부, 물을 공급하는 수조부, 동상량 및 동상력 측정계기를 설치하는 측정부의 3부분으로 나눌 수 있다. 시료적재부에는 가로 90cm, 세로 90cm, 높이 25cm의 목재 공시체 적재상자를 놓고 그 바닥에는 직경 11.2cm의 구멍이 9개가 뚫어져 있다. 이 구멍에 황동제 용기(직경 10.21cm, 높이 6.75cm)를 넣고 이 속에 직경 10cm, 높이 15cm 크기의 공시체를 넣는다. 공시체를 넣기 전에 황동제 용기 바닥에는 다공석판(porous disc)이 놓이고 공시체 상부에는 뚜껑이 덮이게 된다. 공시체 적재상자 바닥의 구멍과 황동제 용기 바닥의 뚫린 구멍을 통해서 하부의 수조로부터 물이 계속 공급될 수 있도록 설계되었다. 수조내의 물은 항상 3.0~4.5°C의 일정한 온도를 유지하도록 한다. 측정부에는 동상량과 동상력을 측정할 수 있도록 9개의 다이얼게이지

와 1개의 로드셀(load cell)이 설치되어 있다.

찬 공기는 상부벽체 내측의 냉각코일(cooling coil)로부터 공급되고 최저 -40°C에서 최고 +30°C까지 임의로 온도의 크기, 지속시간 및 간격을 조정할 수 있으며 내부온도 측정용 감지기 2개, 공시체의 온도변화 측정용 감

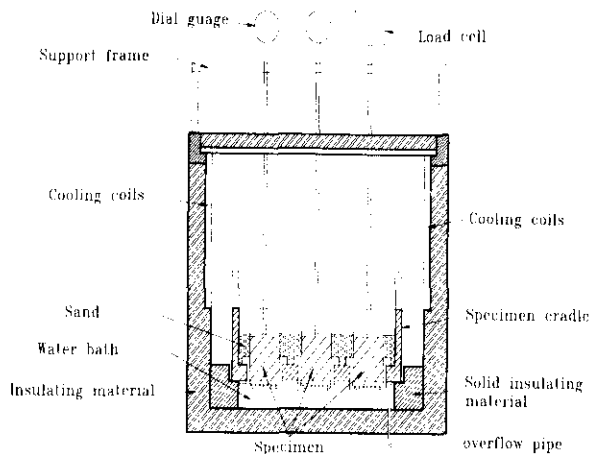


Fig 4. Schematic diagram of the frost heave test apparatus

지기 7개, 수조내 온도측정용 감지기 2개, 시험기 내부 습도측정용 감지기 1개 등 총 12개의 감지기가 부착되어 있으며 이 감지기의 정밀도는 0.1℃이고 자동기록장치에 연결되어 10초 간격으로 연속적으로 온도 및 습도를 측정할 수 있도록 되어 있다.

동상시험시의 공기온도는 -17℃ 또는 -30℃의 일정한 온도로 유지하였으며 물의 온도는 4℃로 하고 측정시간은 48시간 또는 96시간으로 하였다. 동상량은 매시간 측정하였으며 시험이 완료된 후 공시체내에 생긴 빙편의 크기 및 위치등을 확인하고 이를 촬영기록하였다.

동상시험을 하고자 하는 흙 또는 흙과 페타이어조각을 혼합한 시료에 대해서는 3.1.3항에서 설명한 바와 같이 먼저 다짐시험을 실시하여 최적함수비와 최대건조밀도를 구하였다. 그리고 시료를 최적함수비 상태로 3층으로 나누어 동상시험용 공시체 제작 모울드 속에 넣고서 잭으로 정적인 다짐에너지를 가하여 직경 10cm, 높이 15cm의 공시체를 제작하였다. 다짐에너지를 가할 때 공시체의 윗면 및 아랫면에 균등한 에너지를 가하여 균질한 공시체가 되도록 하였다.

3.3 동결깊이시험

동상시험기 내부에 가로 90cm, 세로 90cm, 깊이 90cm되는 모형지반을 깊이 10cm씩 나누어 최적함수비로서 최대건조밀도의 85% 상대다짐을 하여 축조하였다. 모형지반 상부로 부터 매 10cm 깊이마다 thermocouple을 설치하고 공기온도는 -17℃로 유지하면서 지반내 각 위치에서의 동결발생 시점을 측정하였다. 동결발생 시점은 지반내에 매설되어 있는 thermocouple의 온도가 0℃되는 시점으로 하였다.

3.4 페타이어조각-쇄석 동상방지층 두께시험

도로포장설계에서 노상토에서의 동상발생을 방지하기 위해 동결깊이로부터 표층, 기층 및 보조기층 두께를 뺀 두께 만큼 자갈층 또는 쇄석층의 동상방지층을 포설해 주고 있다. 동상

방지층의 역할은 외부의 찬 공기가 노상토까지 침투하는 것을 차단하는 한편 모세관현상에 의해 지하수가 상승하는 것을 막아 주는 것이다. 이러한 동상방지층의 두께는 그 지역의 기온에 따라 다르나 경기도 북부지방이나 강원도 지방에서는 60cm에 달하는 곳도 있다.

본 연구에서는 동상방지층으로서 페타이어 조각과 약 7cm 크기의 쇄석을 혼합하여 사용하였다. 이 경우 페타이어조각의 혼합비율은 동상방지층이 보조기층 역할을 하기 때문에 건설교통부 도로공사 표준시방서상의 보조기층 지반반력계수의 기준치인 20 kg/cm²을 충족하도록 하였다. 20cm 두께의 쇄석보조기층 아래에 40cm 두께의 동상방지층을 포설하고 보조기층상에서 평판재하시험을 실시하여 지반반력계수를 측정된 결과 동상방지층으로서 페타이어조각과 쇄석을 7:3의 체적비율로 혼합 포설하였을 경우 20.5 kg/cm²의 지반반력계수를 얻었다. 이에 따라 페타이어조각과 쇄석을 7:3의 체적비율로 혼합한 재료를 동상방지층 재료로 결정하였다.

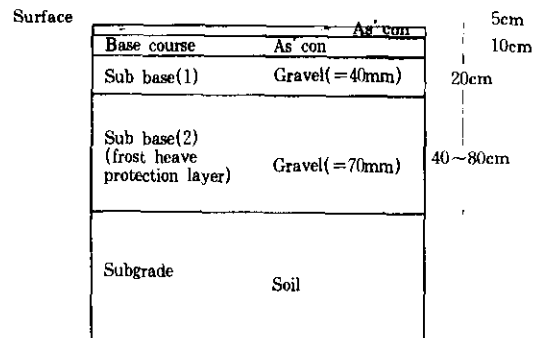


Fig 5. Typical cross section of the road asphalt pavement susceptible to frost heave

이 혼합재료의 열전도율은 표 2에서 나타낸 바와 같이 0.095 Kcal/mh℃로서 쇄석 만의 0.305 Kcal/mh℃보다 훨씬 작다. 아스팔트 포장노면상의 대기온도에 따라 필요한 페타이어 조각-쇄석 동상방지층의 두께를 구하기 위해서 이미 언급한 동상시험기내에 그림 5에서 나

타낸 단면을 갖는 포장을 설치하였다. 먼저 화강풍화토를 최적함수비로 다져서 높이가 19, 16, 14, 10 및 5cm되는 공시체를 제작하여 이들을 동상시험기의 시료적재함에 넣고 그 위에 동상방지층을 각각 6, 9, 11, 15 및 20cm 두께로 포설하여 공시체의 높이가 25cm가 되도록 하였다. 공시체 사이와 시료적재함의 틈새는 스티로폼 알갱이로 채워 단열시켰다. 그리고 그 위에 두께 20cm의 쇠석층의 보조기층과 두께 15cm의 표층 및 기층의 asphalt concrete를 포설하였다. thermocouple은 동상방지층과 하부의 노상층과의 경계점에 매설하고 asphalt 표층상부의 대기온도를 -17°C 를 유지하면서 매 시간마다 각 thermocouple 위치의 온도를 자동온도기록장치에 의해서 측정하고 온도가 0°C 가 되는 시간을 구하였다.

4. 실험결과 및 토론

4.1 동상량

4.1.1 물의 공급에 따른 동상량

동일한 공시체 저부에 물을 계속해서 공급해주는 개방형시험과 물을 공급하지 않는 폐쇄형 시험을 실시한 결과를 그림 6에서 비교하여 나타내었다. 이는 최대건조밀도가 $1.83\text{g}/\text{cm}^3$ 이고 최적함수비가 16.4%인 화강풍화토를 최적함수비로서 정적다짐해서 준비한 직경 10cm, 높이 15cm 크기의 공시체를 -17°C 의 대기온도하에서 48시간동안 동상시험한 결과이다. 개방형시험의 경우 24시간 및 48시간 경과후의 동상량은 각각 20mm 및 30.5mm로서 폐쇄형 시험의 2.2mm 및 2.5mm보다 약 10배 이상 크다. 동상량은 폐쇄형시험의 경우 24시간 이내에 거의 대부분이 발생하고 그 이후에는 증가되지 않는 대신 개방형시험의 경우에는 24시간 이후에도 계속해서 증가하였다. 본 논문에서 나타내지는 않았으나 보충시험자료에 의하면 증가속도는 점차 감소하기는 하나 동상량은 48시간이 경과된 이후에도 계속해서 증가하는 경향을 볼 수 있었다.

개방형시험에서 48시간 경과후에 발생한 동상량 30.5mm의 크기는 공시체 길이 15cm의 약 20%로서 대단히 큰 양이다. 따라서 동상방지층을 설치하여 모관압력에 의한 지하수의 상승을 차단하는 것이 대단히 중요함을 보여준다.

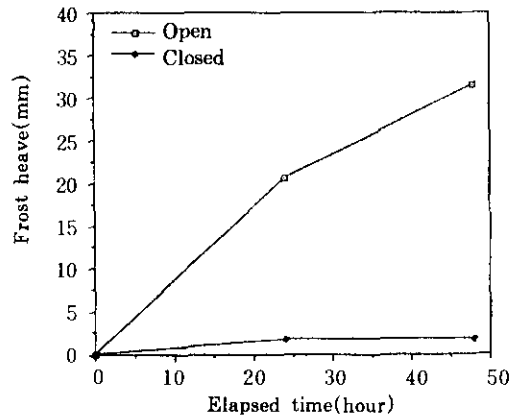


Fig 6. Comparison for frost heave of the weathered granite soils in open and closed system tests

4.1.2 폐쇄형시험에서의 함수비에 따른 동상량

물을 공급하지 않는 폐쇄형시험에서 10.4, 12.4, 14.8, 16.4, 18.4 및 20.4%의 함수비에서 다짐하여 준비한 공시체가 -30°C 에서 48시간 동안에 발생된 동상량을 그림 7에서 나타내었다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 다짐함수비가 클수록 동상량은 크게 발생하였다. 특히 최적함수비 16.4% 보다 큰 습윤측에서 다진 공시체는 동상량이 크게 발생하였으나 건조측에서 다진 공시체는 오히려 수축하였다. 그리고 최적함수비와 비슷한 함수비에서 다진 공시체에서는 소량의 동상량이 발생하였다. 함수비가 20.4%인 공시체를 제외하고는 모두 24시간이 경과된 이후에는 동상량의 변화는 일어나지 않고 거의 일정함을 보여주고 있다. 이는 공시체 내부에서의 모관압력에 의한 간극수의 이동이 없음을 뜻한다. 동결수축이 일어나는 현상은 Taber(1929)의 실험에서도 일어났으며 이는 결빙에 따른 간극수의 팽창량의 대부분은 간극내에서 흡수되어 흙의 팽창량은 거의 무시할

정도로 적게 일어나며 또한 온도가 낮아질수록 토립자 자체의 체적이 수축하기 때문인 것으로 생각된다.

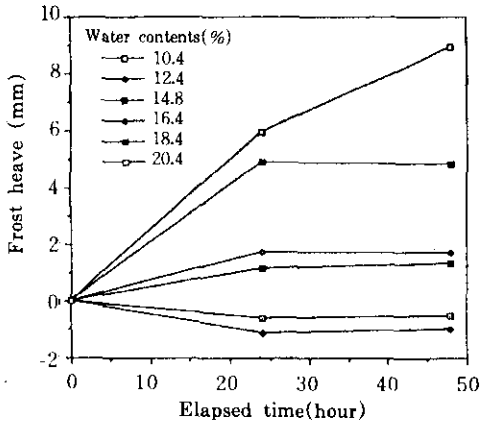


Fig. 7. Variation of frost heave with elapsed time for several different water contents in closed system tests

4.1.3 페타이어가루 혼합에 따른 동상량

화강풍화토에 페타이어가루를 중량비로 0, 0.6, 1.0, 1.6, 및 2.0% 혼합하여 화강풍화토의 최적함수비인 14.8%에서 다진공시체에 물을 공급하면서 -17°C 하에서 96시간 동안 개방형 동상 시험한 결과를 그림 8에 나타내었다.

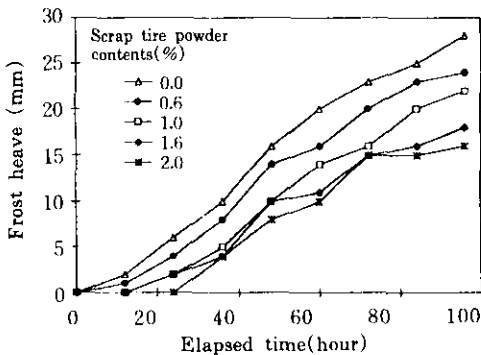


Fig. 8. Variation of frost heave versus elapsed time relationships for different contents of scrap tire powder

페타이어가루의 혼합율이 증가할수록 동상량은 감소되었다. 이는 페타이어가루의 열전도율이 $0.08\text{Kcal/mh}^{\circ}\text{C}$ 로서 화강풍화토의 $0.243\text{Kcal/mh}^{\circ}\text{C}$ 에 비해 훨씬 낮기 때문이다. 따라서 페타이어조각을 동상방지층에 혼합하여 사용함으로써 큰 효과를 거둘 수 있을 것으로 확인되었다.

4.2 동결깊이

페타이어가루를 포함하지 않은 화강풍화토에 대해 실내실험에 의해서 구한 동결깊이와 동결지수와의 관계곡선을 널리 이용되고 있는 몇 가지의 기존식과 비교해서 그림 9에 나타내었다. 실험곡선은 기존식과 비슷한 경향을 보이고 있으나 Stefan식과 Terada식의 중간 값을 보여 주고 있어 Stefan식에 의한 동결깊이는 과다하게 추정하게 되는 것으로 확인되었다. 그러나 본 실험은 실내의 모형시험에 의한 결과일 뿐만 아니라 동결지수의 범위가 충분하지 않으므로 장기간의 동결에 대해서는 판단하기 어렵다.

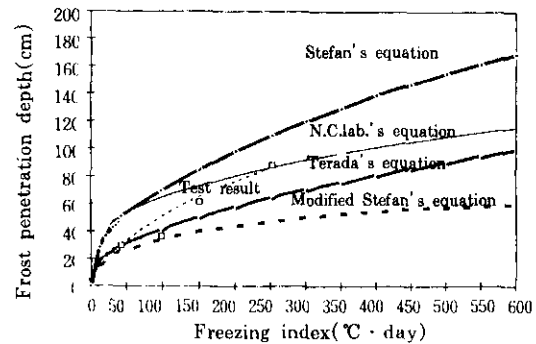


Fig. 9. Comparison of the measured curve and predicted curve for frost penetration depth versus freezing index relationships

4.3 페타이어 조각-쇄석 동상방지층 두께

노상토 표면에서 온도가 0°C 가 되는 시점에서 동상이 시작된다고 간주하고 구한 페타이어조각-쇄석 동상방지층의 두께와 동결지수와

의 관계를 그림 10과 같이 나타내었다. 그리고 이 관계를 식으로 나타내면 아래 식(5)와 같다.

$$Z=1.1\sqrt{F} \quad (5)$$

식(5) 중 Z는 페타이어조각-쇄석 동상방지층 두께(cm)이고, F는 동결지수 ($^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$)이다. 이 식(5)는 동결지수가 $400^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ 이내에서 유효하나 이보다 큰 범위에서도 동상방지층의 대략적인 두께를 추정하는데 있어서 도움이 될 것이라고 생각된다. 그러나 이 식을 이용하여 구한 두께는 동상방지 목적으로는 충분하나 보조기층으로서 지지력을 확보하기 위해서는 페타이어조각-쇄석 동상방지층의 두께는 40cm 이상으로 설계되어야 한다.

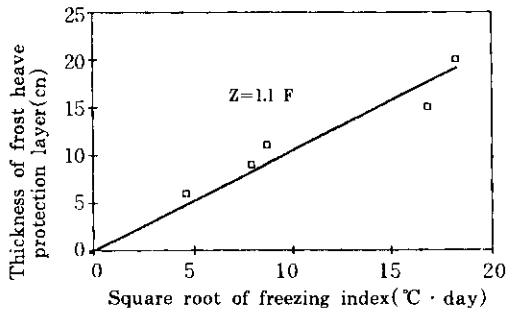


Fig 10. Relationship between the required thickness of scrap tire chips-crushed stone layer for frost heave protection and freezing index

5. 결 론

페타이어조각과 쇄석을 혼합하여 동상방지층으로 이용할 수 있는지를 확인하고 필요한 동상방지층 두께를 구하기 위하여 동상시험기를 제작하여 필요한 관련시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 화강풍화토의 동상시험에서 공시체 저부에 물을 계속해서 공급할 경우의 동상량은 물의 공급을 차단한 경우보다 훨씬 크다. 그리고 물의 공급을 차단한 경우에는 흙의 다짐함수비가 클수록 동상량은 크나

그 흙의 최적함수비보다 낮은 건조축 함수비에서 다진 공시체의 경우에는 오히려 동결수축하는 경향을 보였다.

- 2) 화강풍화토에 페타이어 가루를 중량비로 2%까지 혼합하여 다진 공시체의 동상량은 페타이어가루의 혼합률이 높을수록 적게 발생하였다.
- 3) 화강풍화토지반의 동결깊이는 동결지수가 증가할수록 증가하고 그 경향은 Stefan공식, Terada공식 등의 기존 공식과 유사하나 크기는 Stefan공식과 Terada 공식에 의한 계산치의 사이에 있음을 보여주었다.
- 4) 페타이어조각과 쇄석을 7:3의 체적비로 혼합한 재료를 동상방지층 재료로 이용할 수 있음을 확인하였으며 15cm 두께의 아스팔트 표층 및 기층과 20cm 두께의 쇄석보조기층 아래에 시공해야 할 동상방지층의 필요두께 Z(cm)와 동결지수 F($^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$)와의 관계식을 실내시험에 의해서 $Z=1.1\sqrt{F}$ 와 같이 나타낼 수 있었다. 이 관계식은 동결지수가 $400^{\circ}\text{C} \cdot \text{day}$ 이내에서 유효하나 이보다 큰 동결지수 범위에서도 대략적인 동상방지층 두께를 추정하는데 도움이 될 것이라 생각된다.

감사의 글

이 연구는 1995년도 인하대학교 연구비 지원에 의하여 수행되었음, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 김영진, 홍성환 (1994), 동토지역기초구조물의 최적설계, 시공기법개발연구(3차년도), 과학기술처, p.27.
2. 건설부 국립건설시험소 (1989), 동결심도 조사 보고서, No. 498. p.26.
3. 최인규, 조성환, 노승탁(1989), 열전도, 보성문화사, p. 676.

4. 日本道路協會(1987), 道路土工, 排水工指針, pp. 158~174.
5. 土質工學會(1982), 土の凍結-その制御と應用, 土質基礎工學 ライブラリ-23, 268P.
6. Aldrich, H. P., and H. M. Paynter. (1953), *Analytical Studies of Freezing and Thawing in Soils*, U.S. Army Corps Eng. Arct. Conster. Frost Eff. Lab., New English Div., Boston, Mass., First Interim Report.
7. Frivik, P. E.(1980), "Thermal Properties, Modelling of Process and Thermal Design," *Proc. 2nd Int. Symposium on Ground Freezing*, PP.354~373.
8. Jumikis, A. R. (1966), *Thermal Soil Mechanics*, Rutgers University Press, p.231.
9. Sanger, F. J.(1963), "Degree-days and Heat Conduction in Soils," *Proc. of Permafrost International Conference*, Purdue University, Lafayette, Indiana, National Academy of Science-National Research Council Publication 1287. Washington, D.C., pp.253~262.
10. Stefan, J.(1890), "Über die Theorie der Eisbildung, insbesondere Über die Eisbildung im polarmeere," vol. 98, no.IIa: Sitzungsberichte der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Classe der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. Vienna, pp. 965~983.
11. Taber, S.(1929), "Frost Heaving," *Journal of Geology*, Vol. 37, pp.428~461.

(접수일자 1997. 10. 10)