

비회와 저회의 적정 혼합비로 다짐한 석탄회의 동상성

The Frost-Susceptibility of Compacted Coal Ash with Proper Mixing Ratio of Fly Ash to Bottom Ash

천병식* · 강인성** · 고용일***

Chun, Byung Sik · Gang, In Sung · Koh, Yong Il

Abstract

The most appropriate mixing ratio of fly ash to bottom ash obtained from compaction characteristics and CBR values is varying from 5:5 to 6:4. But these mixed ashes are frost-susceptible materials according to judging by the particle-size distribution because of a lot of silty-size particles

In this study, the frost-susceptibility of compacted coal ash with proper mixing ratio is examined experimentally for use of subgrade materials. And, the efforts have been made to find proper cement addition in making these mixed ashes frost-insusceptible.

It was revealed that these mixed ashes are frost-susceptible, and 4% of cement content is required to be made frost-insusceptible. It was found that amount of frost heave of these mixed ashes decreases with the unconfined compressive strength, and increases with $\log k$ if the permeability coefficient k is as low as the water into the freezing front of these mixed ashes is restricted.

요 지

다짐특성과 CBR값에 의해 얻어진 비회와 저회의 적정 혼합비는 5:5 또는 석탄회 재질에 따라서 6:4 까지도 가능하였다. 그러나 이들 혼합회에는 실트 크기의 입자를 상당히 많이 함유하게 되어, 입도분포등의 종래 기준에 의하면 동상현상에 의한 동해를 받기 쉬운 것으로 여겨진다.

본 연구는 적정비로 혼합한 석탄회를 노상재로서 사용하기 위하여 다짐할 경우의 동상성에 대해 실험적으로 검토한 것이다. 또한, 이들 혼합회를 동상의 피해에 대해 안전한 재료로 만들기 위하여 필요한 적정 시멘트 첨가량도 구하였다.

적정비로 혼합한 석탄회는 동상현상에 의한 동해를 받기 쉬운 재료이지만, 4% 정도의 시멘트를 첨가함으로써 동상량은 만족할 만큼 크게 줄일 수 있었다. 동상량은 혼합회의 강도와는 반비례적인 관계에 있고, 시료의 동결선속으로 공급되는 수분을 제한할 수 있을 정도의 작은 투수계수 k 내에서는 동상량과 $\log k$ 는 비례관계에 있다고 할 수 있다.

1. 서 론

대기의 온도가 0°C 이하로 지속되는 겨울철에

* 정회원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수
** 정회원 · 수원전문대 토목공학과 조교수
*** 정회원 · 한양대학교 산업과학연구소 선임연구원

동결선이 노상 이하로까지 떨어지게 되면 수분이 얼어 흙속에 빙층들이 발생하여⁽¹²⁾ 포장면까지 상승하는 동상현상(frost heaving)이 생기고, 봄철의 융해기에는 빙층들이 융해됨에 따라 이들 흙에 포함된 과잉의 수분이 배수되지 않아 연화현상(frost boiling)이 발생함으로써 도로의 균열파손이나 구조적 파괴까지 야기시킬 수 있게 된다.

한편 비회는 통일분류법에 의하면 대부분 ML에 속한다. 따라서 이들 비회는 입도분포등의 종래 기준에 의하면 동상현상에 의한 동해를 받기 쉬운 것으로 여겨지고 있는데, 이것이 비회가 포졸란 반응에 의한 비교적 큰 강도를 발휘하고 적은 압축성과 경량성을 갖는 등 공학적 특성이 우수함⁽³⁻⁷⁾에도 불구하고 성토재 및 채움재 그리고 특히 도로 노상재 등으로 선듯 활용하지 못하고 있는 주요 이유중의 하나인 것으로 보인다.

또한 비회와 저회의 적정혼합비 산정시에는 석탄회 활용을 극대화하기 위하여 석탄회 발생량의 대부분을 차지하는 비회를 되도록 최대한 사용하도록 하고 있으므로 적정비로 혼합한 석탄회에는 실트 크기의 입자를 상당히 많이 함유하게 되어 많게는 50% 이상 함유하게 된다. 따라서 이들 혼합회를 상부 노상층이나 더 나아가서는 동상방지층까지로의 사용을 위해서는 적정비로 혼합하여 다짐한 석탄회의 동상에 관한 성질에 대한 검토와 이들이 동상현상의 피해에 대해 안전한 재료로 되기 위한 시멘트 첨가량을 구하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 이를 위하여 Croney and Jacobs⁽⁸⁾가 현장조건과 잘 일치하도록 고안·개발한 것을 모델로 제작된 실험장치를 이용하여 동상시험을 실시하였다.

2. 동상의 원리⁽⁹⁻¹¹⁾

동결선이 지반속으로 진행하게 되면, 얼음선은 흙입자들에 의해 방해받기 때문에 공극을 따라 형성되기 위하여 곡면으로 형성되게 된다.(그림 1 참조)

흙입자의 흡착수는 표면장력과 분자간 인력으로 인하여 공극수보다 더 낮은 동결점을 갖기 때문에 얼음선과 흙입자 사이에는 얼지않은 물이 존재할 수가 있고, 얼음의 결정화가 계속되는 과정에서는

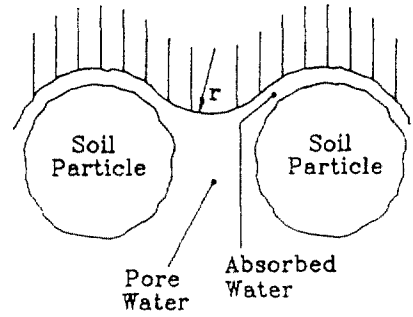


그림 1. 빙층의 생성

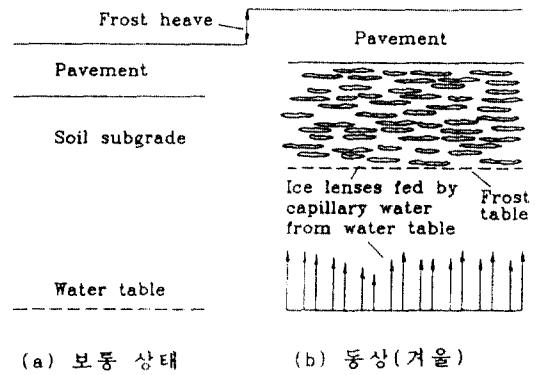


그림 2. 지반의 동상현상

얼음선 가까이에 있는 물은 계속 얼음으로 결정화 되고, 빙결된 양만큼의 물은 좀더 높은 온도의 물이 모관압에 의해 이곳으로 이동되어 계속적인 물의 공급을 받아 빙층이 형성되어 가는 것이다.

따라서 물이 계속 공급되고 온도경사가 충분하며, 투수계수와 같은 다른 필요조건들이 만족된다면 얼음의 결정화가 계속되어 빙층이 발달하게 되고 이 빙층의 두께와 거의 비슷하게 지반은 융기된다. 여기서 기온이 더욱 내려가 동결선이 지반속으로 더욱 깊이 내려가게 되면, 이미 생긴 빙층보다 더 아래에 새로운 빙층이 형성되어 지반의 융기는 더욱 커지게 된다.(그림 2 참조)

3. 동상시험

3.1 동상시험장치⁽¹²⁾

동상시험장치는 6개의 시료가 윗 부분은 동결할

수 있는 낮은 온도의 공기에 접할 수 있게 되어 있고
아랫부분은 얼지 않는 물과 접촉할 수 있게 되어
있는데, 이 때 물속에 온도조절장치가 달린 열선을
설치하여 온도조절장치로는 +4℃로 하였으나 실제
측정된 물의 온도는 +2℃ 정도를 유지하였다. 이
실험장치의 내부 구성도는 그림 3과 같고, 상세 설
계도는 그림 4와 같다.

3.2 시료 준비 및 실험방법

서천 화력발전소의 무연탄 석탄회와 삼천포 화력
발전소의 유연탄 석탄회를 대상으로 실험을 실시하
였다. 이들 비회와 저회를 적정 비율인 5:5와 6:4로
혼합한 것과 이들 혼합회에 시멘트를 첨가한 것으로
시료를 준비하였다. 그리고 함수비를 최적함수비로
하여 D-2 다짐에 의해 $\phi 15.2 \times 11.6$ cm 크기의 공
시체를 제작한 다음, 시료를 동상시험장치속에 넣
기전에 $23 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 14일간 습윤 양생하였다. 앞선
연구에 의하면⁽³⁾ 양생기간에 의한 석탄회의 자경효
과는 양생 초기에 발휘되기 때문에 시공성을 고려
해서 볼 때 양생기간을 14일 정도로 함이 적절하다고
보았다.

양생 후 내부의 공기온도가 -17°C 인 동상시험장

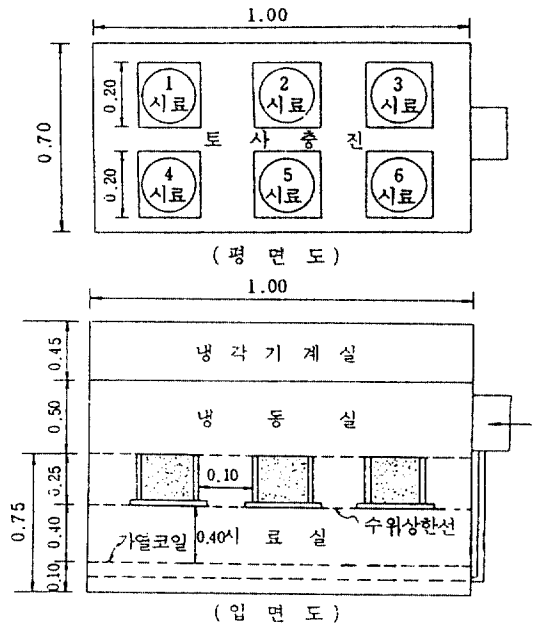


그림 3. 동상시험장치의 내부 구성도(단위:m)

치속에 시료를 넣고, 동상량의 측정은 하루에 1번씩
10일간 계속하였다.

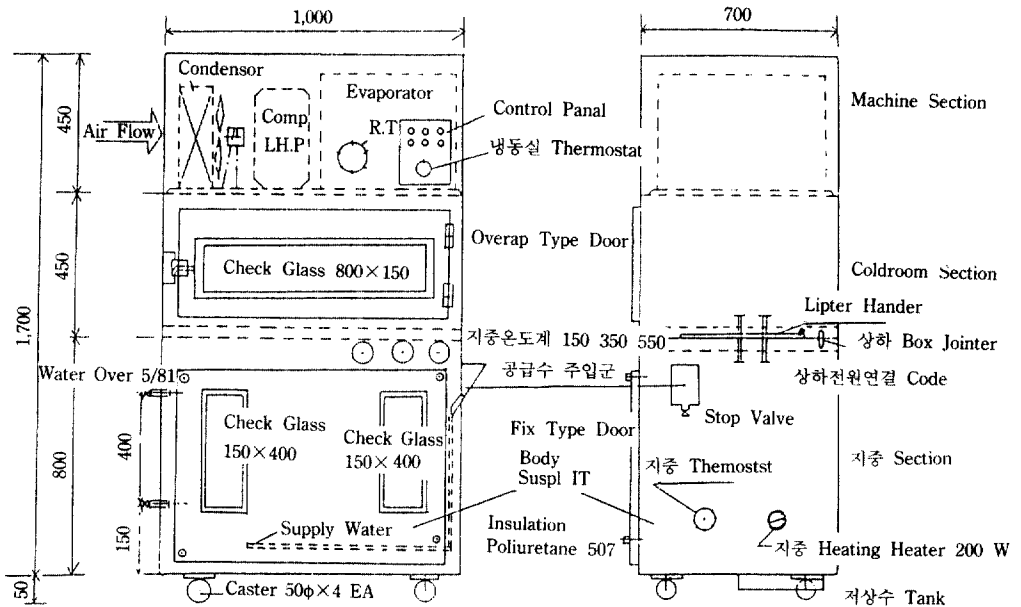


그림 4. 동상시험장치 상세도(단위:mm)

4. 실험결과 및 고찰

그림 5~그림 8은 동상시험에서 측정한 동상량의 변화를 나타낸다.

이들 그림에서는 모든 경우에 있어서 시멘트 첨가에 의한 동상량 감소 효과를 확실히 보여 주고 있다. 즉, 비회와 저회를 적정 비율로 혼합하여 시멘트를 첨가하지 않고 다짐한 석탄회는 동상율이 31.9~38.2%로 동상의 피해를 받을 것으로 사료되지만 이들 혼합회에 시멘트를 첨가하여 다짐한 경우에는 동상량이 현저히 줄어 들어서, 시멘트 4% 첨가에 의해 동상율은 4% 이하 까지로 감소하기 때문에 동상의 피해에 대해 안전한 재료로 개량되었다고 볼 수 있다. 이는 이들 혼합회에 시멘트를 첨가함으로써 혼합회 속으로 공급되는 물의 양을 제한할 수 있을 만큼 충분히 혼합회의 투수계수를 감소시

키고, 또한 동상력에 견딜만큼 충분한 결합강도를 발휘하도록 한 석탄회의 활발한 포졸란 반응 때문인 것으로 보인다. 참고로 본 실험과 같은 온도 조건의 실험 결과로 부터 채택된 시료토의 동상에 대한 영국의 기준은 다음과 같다.⁽⁸⁾(시료의 높이는 10in. 이고 측정은 250시간 동안 실시하였다.)

동상량	동상정도
0.5in.이하	비동상성
0.5~0.7in.	중간정도의 동상성
0.7in.이상	큰 동상성

실험에 사용한 혼합회의 일축압축강도와 투수계수 그리고 동상율은 표 1과 같다.

그림 9, 그림 10에서는 일축압축강도와 동상량, 투수계수와 동상량의 관계를 검토해 보았다.

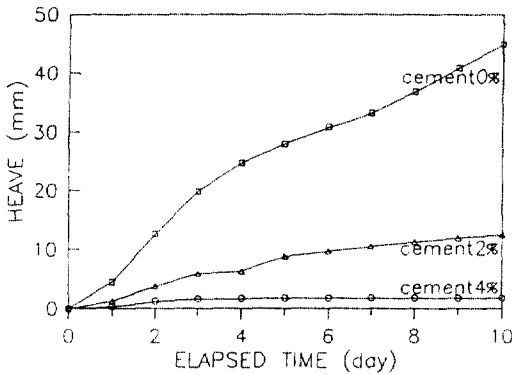


그림 5. 동상시험결과(서천 화력발전소 비회:저회=5:5)

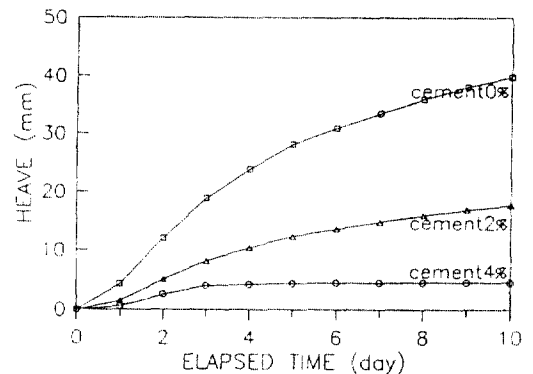


그림 7. 동상시험결과(삼천포 화력발전소 비회:저회=5:5)

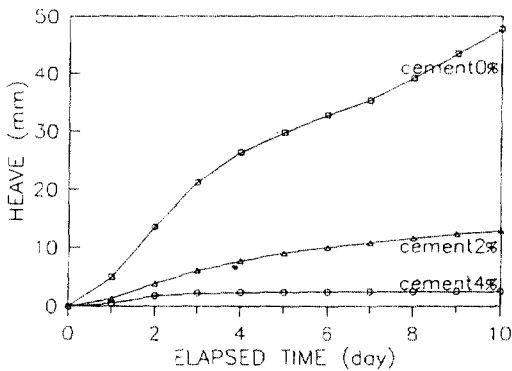


그림 6. 동상시험결과(서천 화력발전소 비회:저회=6:4)

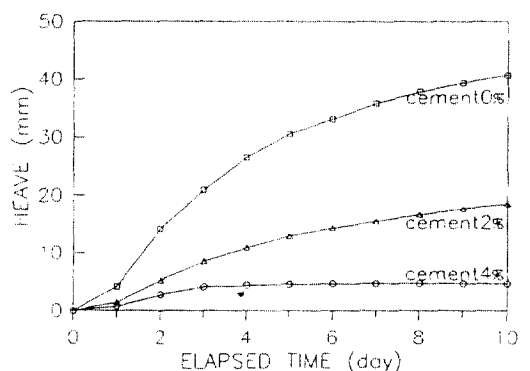


그림 8. 동상시험결과(삼천포 화력발전소 비회:저회=6:4)

표 1. 서천, 삼천포 화력발전소 혼합회의 일축압축강도, 투수계수, 동상물

구 분		비회 : 저회 = 5 : 5			비회 : 저회 = 6 : 4		
		일축압축강도 (kg/cm ²)	투수 계수 (cm/sec)	동상물 (%)	일축압축강도 (kg/cm ²)	투수 계수 (kg/cm ²)	동상물 (%)
서 천	시멘트 0%	0.93	1.44×10^{-4}	36.0	0.87	1.21×10^{-4}	38.2
	시멘트 2%	16.85	5.58×10^{-6}	10.0	11.03	4.16×10^{-6}	10.3
	시멘트 4%	28.51	3.12×10^{-7}	1.4	17.61	1.57×10^{-7}	2.0
삼천포	시멘트 0%	1.30	6.76×10^{-4}	31.9	1.26	5.01×10^{-4}	2.6
	시멘트 2%	6.11	9.76×10^{-6}	14.2	5.84	8.64×10^{-6}	4.8
	시멘트 4%	16.97	6.95×10^{-7}	3.6	16.87	6.29×10^{-7}	3.8

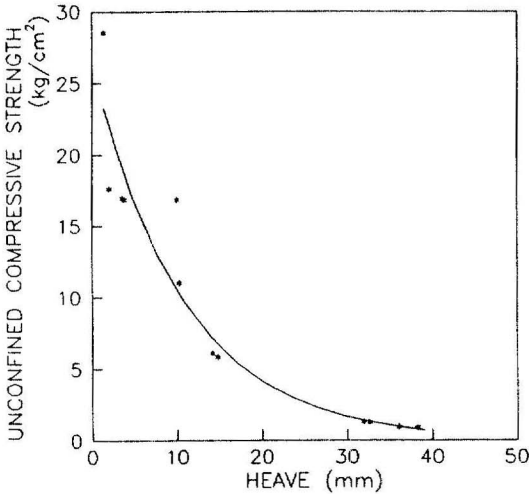


그림 9. 일축압축강도와 동상량의 관계

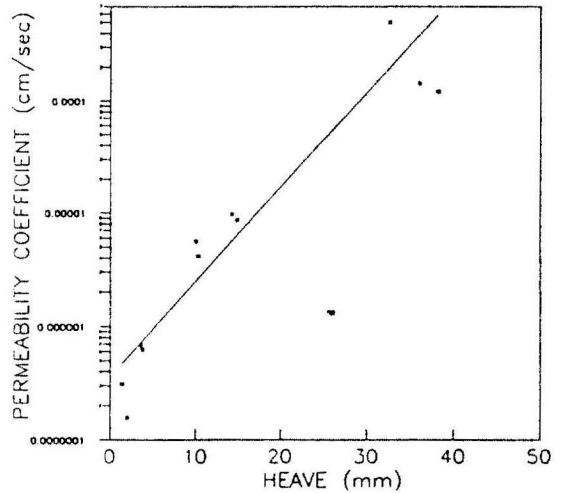


그림 10. 투수계수와 동상량의 관계

그림 9에서 일축압축강도와 동상량의 관계는 압축강도가 증가할수록 동상량은 줄어드는 경향으로 나타나는 데, 공시체의 증가된 결합력이 동상 압력을 억제하는 역할도 한다는 사실을 확인할 수 있었다.⁽¹⁴⁾ 또, 그림 10에서의 투수계수와 동상의 관계는 투수계수 k 가 작아질수록 동상량도 감소하는 경향 즉, “동상량 $\propto \log k$ ”의 관계를 나타내는 데, 이것은 투수계수가 어느 값 이하로 작아지면 시료의 동결 선속으로 공급되는 수분을 제한하기 때문에 생기는 현상으로 판단된다.

5. 결 론

다짐특성과 CBR값에 의해 얻어진 비회와 저회의 적정비는 5:5 또는 석탄회 재질에 따라서 6:4 까지도 가능하였다. 그러나 이들 혼합회에는 실트 크기의 입자를 상당히 많이 함유하게 되어, 입도분포등의 종래 기준에 의하면 동상현상에 의한 동해를 받기 쉬울 것으로 여겨진다. 이들 적정비로 혼합하여 다짐한 석탄회를 대상으로 동상시험을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 비회와 저회를 적정 비율로 혼합하여 다짐한

석탄회는 이들의 입도분포로부터 예상했듯이 동상 현상에 의한 동해를 받기 쉬운 재료로 볼 수 있다.

2) 비회와 저회를 적정 비율로 혼합한 석탄회에 소량의 시멘트를 첨가함으로써 이들 혼합회의 동상량을 크게 줄일 수 있다.

3) 동해를 야기시키는 이들 혼합회의 동상현상은 시료의 공시체 강도와는 반비례적인 관계에 있고, 시료의 동결선(freezing front)속으로 공급되는 수분을 제한할 수 있을 정도의 작은 투수계수내에서는 동상량과 투수계수 k 는 “동상량 $\propto \log k$ ”의 관계가 있음을 알 수 있다.

4) 비회와 저회를 적정 비율로 혼합한 석탄회에 중량 백분율로 4% 정도의 시멘트를 첨가하여 어느 정도의 경화작용(포졸란 작용)이 일어나게 한 후부터의 동상량은 이들 혼합회가 동상현상에 의한 동해의 피해에 안전한 재료로 볼 수 있을 만큼 충분히 줄어들었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구비(과제 번호 90-16-00-08)지원에 의하여 이루어졌음을 밝히며 동 재단에 깊은 감사를 드리는 바이다.

참 고 문 헌

1. Taber, S., "The Growth of Crystals under External Pressure", American Journal of Science, Vol. 41, 1916, pp. 544-545.
2. Beskow, G., "Soil Freezing and Frost Heaving with Special Application to Roads and Railroads", Swedish Geological Society, Series C, No. 375, 1935.
3. 김수삼, 김동울, 신민호, "석탄회의 토질 공학적 특성에 관한 실험적연구", **대한토목학회 1987학술발표 개요집**, 1987. 10, pp. 376-381.
4. 천병식, 고용일, 오민영, 권형석, "산업폐기물로 발

- 생되는 석탄회의 토질역학적 특성에 관한 연구", **대한토목학회논문집**, Vol. 10, No. 1, 1990. 3, pp. 115-124.
5. 천병식, 정형식, 고용일, 이형수, "약액처리된 석탄회의 동적 감쇠특성", **대한토목학회논문집**, Vol. 11, No. 1, 1991. 3, pp. 145-151.
6. 천병식, 고용일, "석탄회의 도로성토재 및 노상재로서의 활용을 위한 비회와 저회의 적정혼합비", **대한토목학회논문집**, Vol. 12, No. 1, 1992. 3, pp. 177-186.
7. 정승용, "석탄회의 압밀과 전단거동에 대한 기초적 연구", 중앙대학교 대학원, 공학석사학위논문, 1992. 6.
8. Croney, D., Jacobs, J. C., "The Frost Susceptibility of Soils and Road Materials", Road Research Laboratory, *RRL Report LR 90*, England, 1967, 68pp.
9. Penner, E., "The Mechanism of Frost Heaving in Soils", *Highway Research Board, Bull.* No. 225, 1959, pp. 1-22.
10. Osler, J. C., "The Influence of Depth of Frost Penetration on the Frost Susceptibility of Soils", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 4, No. 3, 1967, pp. 335-346.
11. Hoekstra, P., "The Physics and Chemistry of Frozen Soils", *Highway Research Board, Special Reprint* No. 103, 1969, pp. 78-83.
12. 한국 토지 개발공사, "화강암질 풍화토의 기층 및 보조기층 이용방안 연구", 한국토지개발공사 기술연구소, 1991, pp. 130-144.
13. 천병식, 이은수, 고용일, "비회와 저회의 적정혼합비로 다짐한 석탄회의 강도와 내구성", **대한토목학회논문집**, Vol. 12, No. 3, 1992. 9, pp. 207 -213.
14. Gray, D. H., Lin, Y. K., "Engineering Properties of Compacted Flyash", *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE Vol. 98, No. SM4, Proc. Paper 8840, April 1972, pp. 361-380.
15. Sutherland, H. B., Gaskin, P. N., "Factors Affecting the Frost Susceptibility Characteristics of Pulverized Fuel Ash", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 7, 1970, pp. 69-78.

(接受 : 1992. 7. 27)