

시멘트 경화체의 반투과성에 따른 삼투압의 발생에 관한 검토

Osmotic Pressure Induced by Semi-Permeability of Hardened Cement Paste and Cement Mortar

○배기선*

Bae, Kee-Sun

김용로**

Kim, Yong-Ro

박선규***

Park, Sun-Gyu

김무한****

Kim, Moo-Han

ABSTRACT

Osmotic pressure induced by semi-permeability of hardened cement paste and cement mortar was studied, which was considered to be a cause of failures such as separation and blistering of floor coatings or wall coatings from the concrete substrate. The specimens with a water cement ratio of 45,60 and 75% were installed between the solution of sodium chloride and distilled water.

First, we measured water flux from distilled water to sodium chloride and the ion flux of Na^+ and Cl^- through the specimens. Then, we measured osmotic pressure induced by semi-permeability of the specimens using an apparatus which was specially developed for this study. It was made clear that hardened cement paste and cement mortar have properties of semipermeability, and the osmotic pressure is closely related to their water cement ratio.

Finally, we calculated the osmotic pressure according to Staverman's equation, which was obtained for organic membranes, and tried to explain quantitatively the observed pressure.

키워드 : 삼투압, 경화시멘트페이스트, 수분의 이동, 반투과성, 시멘트모르타, Staverman식

KEY WORDS : Osmotic Pressure, Hardened Cement Paste, Water Flux, Semi-Permeability, Cement Mortar, Staverman's equation

1. 서 론

시멘트경화체는 불균질한 다공체이며 반투과성을 가지고 있다는 연구가 보고되고 있다.^{1~4)} 따라서, 시멘트 경화체를 중심으로 농도가 다른 용액을 배치하여 두면 농도가 높은 용액쪽으로 수분이 이동하는 삼투현상이 발생하게 된다. 그러나 이러한 삼투현상은 투과하는 물질의 종류·성질, 시멘트 경화체 내에 존재하는 공극의 물리적 성상 및 공극표면의 화학적 성질등에 영향을 받는 것으로 알려지고 있다.^{1,5~7)}

여기서, 반투과막이라는 것은 Fig 1에서와 같이 용매분자인 수분은 통과하지만 용질분자인 NaCl 용액은 통과하기 어려운 막이다. 이러한 반투과막에 있어서 용액상의 II측과 순용매상의 I측을 분할하면 용매분자는 I측에서 II측으로 삼투에 의한 이동이 일어나게 된다.

* 정희원, 배재대학교 토목건축공학부 겸임교수·공박

** 정희원, 충남대학교 건축공학과 석사과정

*** 정희원, 충남대학교 건축공학과 박사과정

**** 정희원, 충남대학교 건축공학과 교수·공박

따라서, 본 연구에서는 시멘트 경화체의 반투과성에 따른 고농도 용액측에 발생하는 삼투압을 측정하고, Staverman⁵⁾의 막투과 이론식을 이용하여 삼투압을 검토하였다. 이를 위하여, 먼저 개방계 실험 장치를 사용하여 시멘트 경화체의 삼투현상에 의한 수분 이동량 및 이온의 투과량을 측정하였으며, 시멘트 경화체의 반투과막적 성질에 관해 서도 검토하였다.

2. 실험개요

시멘트 경화체의 반투막적 성질을 평가하기 위한 본 연구는 삼투현상에 의한 수분의 이동량 및 이온의 투과량을 측정하는 실험과 폐쇄계 실험장치에서 발생하는 삼투압을 측정하는 실험의 2가지로 구성되어 있다.

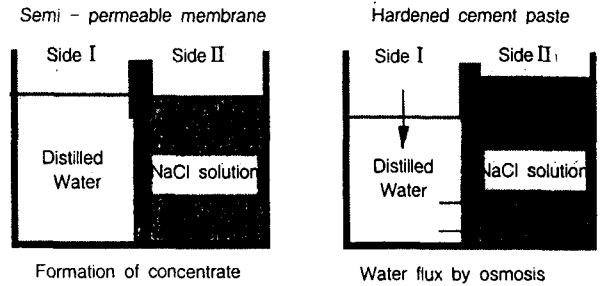


Fig 1. Semi-Permeability

2.1 시험체의 제작

삼투현상은 시멘트 경화체의 내부구조 및 전기적 성질에 영향을 받기 때문에, 경화시멘트 페이스트와 모래/페이스트 용적비가 55%인 표준사 모르타의 2종류에 대하여 각각의 물시멘트비(이하 W/C라 함)를 45, 60, 75%의 3종류로 변화시켜 총 6종류의 시험체를 제작하였다. 각 시멘트 경화체는 기계비밀후 블리딩을 억제하기 위하여 10분간격으로 30분간 교반하였다. 이것을 $\phi 10 \times 10\text{cm}$ 공시체에 타설하고 24시간 후 탈형하여 3개월 이상 수증양생(20°C)을 하였다.

또한, 시험체는 Fig 2와 같이 중층부에 한정하여 디스크형의 시험체를 2~3매 절단하여 샌드페이퍼를 사용해 두께를 5mm로 조정하고 측면을 에폭시계 접착제로 실링(Sealing)하였다.

2.2 실험조건

본 연구에서는 삼투현상을 발생시키기 위하여 농도가 다른 용액으로서 이온 교환된 증류수(distilled water) 및 1mol/l의 NaCl용액을 사용하였으며, 실험은 온도 20°C 의 항온실내에서 실시하였다.

3. 시멘트경화체의 반투막적 성질에 관한 실험

3.1 삼투현상에 관한 실험

3.1.1 삼투에 의한 수분 이동량 측정

Fig 3에 나타난 개방계 아크릴수지로 제작한 장치를 각 시험체별로 2개씩 제작하여 증

Table 1. The testing factors and levels

Factor		Level
The terms of specimens	Hardened Cement	Cement paste
	W/C(%)	Mortar 45, 60, 75
Measuring items		Water Flux by Osmosis
		Concentration of ion
		Osmotic pressure
		Water permeability coefficient

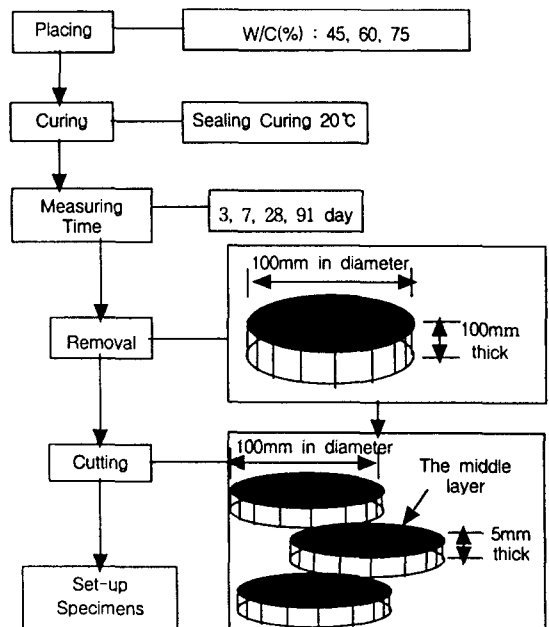


Fig 2. Procedure of Experiment

류수측(I 측)으로부터 시험체를 매개로 하여 NaCl 수용액측(II 측)으로 이동하는 수분의 이동량을 측정하였다. 측정은 시험체와 장치를 조립한 후 양측에 용액을 주입하여 매일 1회씩 정해진 시간에 양측 유리관내의 수두차로부터 수분 이동량을 측정하였다.

3.1.2 실험결과와 검토 및 분석

측정에 의해 얻어진 수분 이동량의 누적치를 Fig 4에 나타낸다. 모든 시험체는 재령의 경과와 함께 누적수분이동량이 직선적으로 증가하였고, 시멘트경화체가 투과성을 가지고 있다는 것이 명확하게 밝혀졌다. 또한, 측정된 투수량을 기초로 단위시간, 단위면적당 수분이동속도 J_v 를 구한 결과 Fig 5과 같이 재령에 따라 거의 일정 속도로 되는 것이 판명되었다. 각 시험체 모두 W/C가 클수록 삼투량이나 속도가 커지고, 또한 골재의 유무에 따라 영향을 받고 있음을 알 수 있다.

3.2 이온 투과에 관한 실험

3.2.1 이온 투과량의 측정

이온투과에 미치는 시멘트경화체의 영향과 이온의 거동과 삼투현상과의 관계를 검토하기 위해 각각의 시험체를 투과하는 이온 양을 측정하였다. 측정은 Fig 3의 장치를 이용하여 수분 이동량의 측정과 병행하여 행했다. 측정용 시료는 수분 이동량 측정 개시후 28, 56, 84일에 I 측에서 3cc씩 채취하고, Na^+ 이온은 원자흡광분석법을 Cl^- 이온은 이온 크로마토그래피 분석법을 이용하여 I 측으로 투과한 이온의 농도를 측정하였다.

3.2.2 실험결과 및 검토

재령의 경과에 따른 I 측의 이온농도변화를 Fig 6에 나타낸다. 측정결과로부터 다음의 3가지가 판명되었다. (1) W/C가 클수록 이온의 투과량이 많다. (2) Na^+ 에 비하여 Cl^- 의 투과량이 많다. (3) 골재의 혼입에 따라 이온의 이동량은 감소한다. 이러한 경향은 시멘트경화체 내부구조 및 전기적 성질에 따른 영향에 기인한다고 생각된다. 먼저 내부구조에 관해서는 세공구조의 영향과 골재의 혼입에 따라 이온투과 경로가 되는 세공의 변화에 기인하는 것으로 사료된다. 또한, 전기적 성질에 관해서는 시멘트경화체가 전기음성적 성질을 보이고 있기 때문에 세공중의 이온확산에 차이가 발생한다는 보고가 있고⁶⁾, 이 때문에 양이온인 Na^+ 의 투과가 억제되는 것으로 추정된다.

3.2.3 이온의 거동과 삼투현상에 의한 수분이동의 관계

이온의 거동과 수분 이동량은 비슷한 경향을 보인다. 즉, 이온 이동량이 커짐에 따라 수분 이동량도 크게 되는 경향이 나타났다.

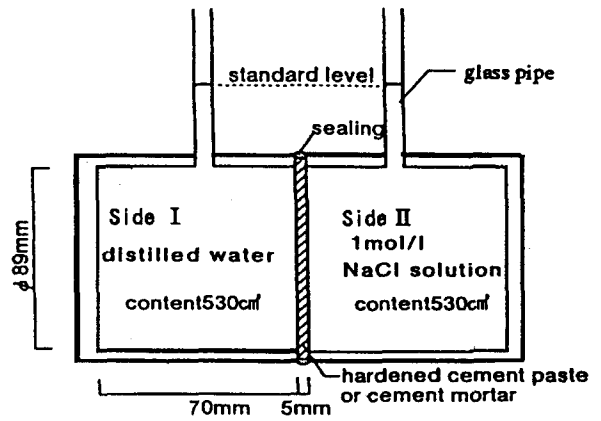


Fig 3. Apparatus for measuring water flux

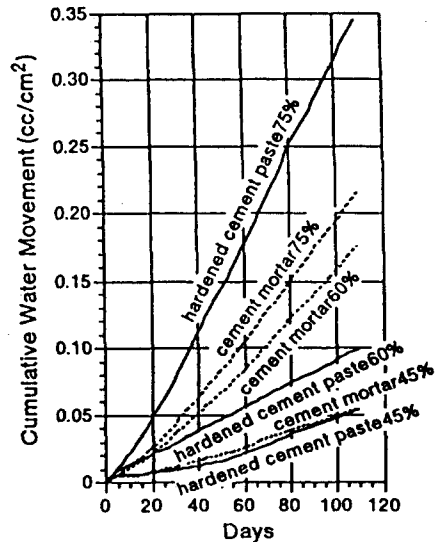


Fig 4. Cumulative volume of water flux

4. 삼투압에 관한 실험

지금까지의 개방계 실험에 의해 시멘트경화체가 반투과성을 가진다는 것이 확인되었다. 그래서, II측을 폐쇄계로 하여 삼투에 따른 수분의 이동에 따라 발생하는 압력 및 삼투압을 측정하였다. 삼투압은 삼투평형시의 압력이 되지만, 본 연구에서는 최대 압력을 삼투압으로 간주하였다.

4.1 삼투압의 측정방법

삼투압 측정장치는 Fig 3의 II측을 폐쇄계로한 것으로서 Fig 7과 같다. 장치 II측은, 압력에 의한 변형이 없도록 황동제로하고, 시험체의 I측에는 압력에 의한 파손을 방지하기 위해 두께 5mm의 구멍이 있는 보강판을 부착하였다. 또한, 누수를 방지하기 위해 O링을 끼우고, 예폭시계 퍼티로 공간의 충진을 행하였다. 측정은 소형압력변환기를 이용하여 수분 이동량의 측정과 같은 조건으로 행하였다.

4.2 측정결과 및 검토

삼투압 측정결과에의 일례를 Fig 8에 나타낸다. 초기압력상승속도는 높은 W/C의 시험체일수록 빠르고, Fig 4의 수분이동량 누칙치의 증가경향과 비슷한 거동을 나타냈다. 이러한 결과로부터 압력상승속도는 삼투압의 발생과 관련성이 있다고 말할 수 있다. 그러나, W/C 45%의 시험체의 경우 장기적으로 압력이 증가하고 있는데 반하여 높은 W/C의 시험체는 조기에 최대 삼투압에 도달하며 그 후의 압력은 W/C 60%에서는 대개 일정하고, W/C 75%에

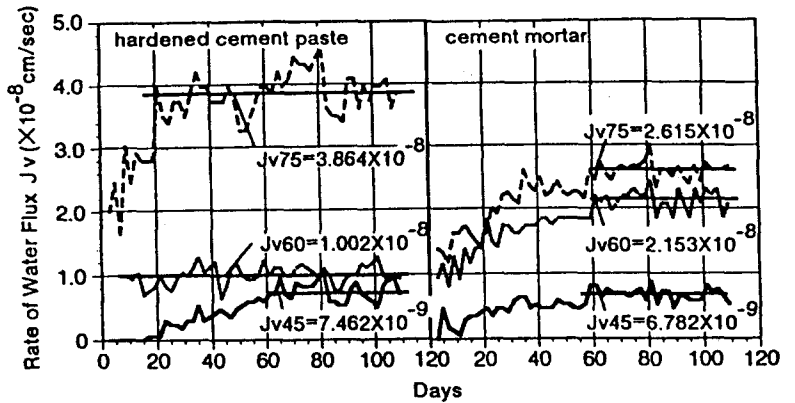


Fig 5. Changes of Rate of water flux

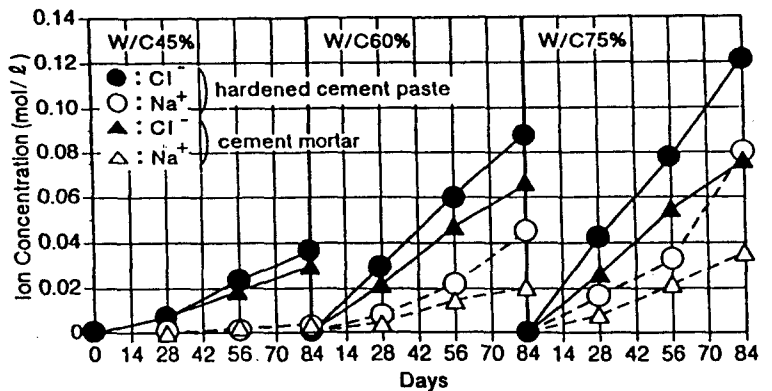


Fig 6. Changes of concentration Cl⁻ and Na⁺

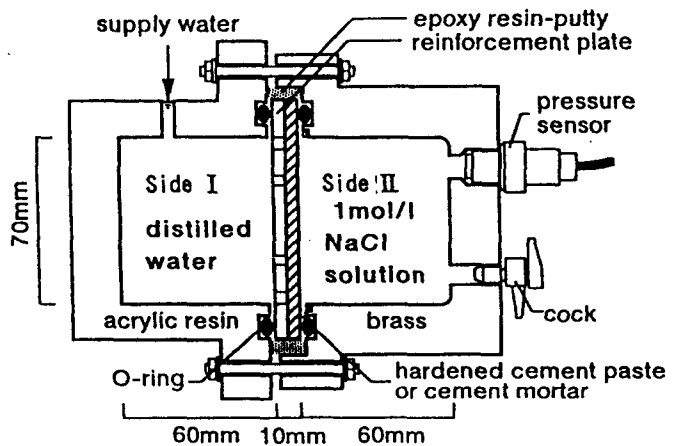


Fig 7. Apparatus for measuring osmotic pressure

서는 급속히 저하하는 경향이 있다. 이것은 삼투현상 외에 II층에 발생한 압력에 의한 역삼투 현상의 영향으로 사료되어진다.

5. 막투과이론을 이용한 삼투압의 검토

여기에서는 삼투압에 대해서 Staverman의 막투과이론식을 이용해서 검토하였다. NaCl 수용액을 이용한 계(系)의 단위시간, 단위면적당의 시멘트경화체를 투과하는 물의 삼투속도 J_v 는 다음식으로 표시된다.⁵⁾

$$J_v = \frac{K}{\rho h} (\sigma_{Na^+} \Delta\pi_{Na^+} + \sigma_{Cl^-} \Delta\pi_{Cl^-} - \Delta P) \dots\dots\dots (1)식$$

- J_v : 삼투속도(cm/sec) h : 시멘트경화체의 두께(cm)
- σ : 반발계수 $\Delta\pi$: 시멘트경화체를 중심으로한 삼투압차 (kgf/cm²)
- K : 투수계수 (cm/sec) ΔP : 시멘트경화체를 중심으로한 압력차 (kgf/cm²)
- ρ : 물의 밀도 (kg/cm³)

또한, K 는 시멘트경화체의 투수성을 나타내는 계수이고, 여기서는 JASS 8T-301를 기초로 하여 실험에 이용한 시험체와 같은 조합으로 시멘트경화체를 제작하여 투수시험을 행한 후 아래의 (2)식을 이용하여 구한 값을 Table 2에 나타낸다.

$$K = \frac{\rho h}{PA} Q \dots\dots\dots (2)식$$

- Q : 투수량 (cm³/sec)
- P : 가수압 (kgf/cm²)
- ρ : 물의 밀도 (kg/cm³)
- A : 시멘트경화체의 단면적 (cm²)
- h : 시멘트경화체의 두께 (cm)

또한, (1)식에서의 σ 는 $0 \leq \sigma \leq 1$ 인 용질에 대한 막의 투과성을 평가하는 계수이며, K 와 같이 각 시멘트경화체의 특성치이다. 이상희박용액(理想稀薄溶液)에서는 $\Delta\pi$ 는 Van't Hoff⁶⁾의 (3)식에 의해 ΔC 의 형태로 바꾸어 나타낼 수 있다.

$$\Delta\pi = \Delta CRT \dots\dots\dots (3)식$$

- ΔC : 시멘트경화체를 중심으로 한 농도차 (mol/l) R : 기체정수 (l kgf/cm²Kmol)
- T : 절대온도 (K)

(1), (3)식으로부터 J_v 가 ΔC 와 1차적 관계가 있음을 알 수 있다. Fig 9는 이온 투과량을 기초로한 ΔC 의 경시변화를 나타낸 것으로 이온이 완전하게 전리(電離)된다고 가정하여 초기 이온의 ΔC 를 1mol/l로 가정한다. 한편, 본 연구의 범위에서는 J_v 는 Fig 4에서 제시한 것과 같이 거의 일정한 값이 된다. 그러므로, 일정한 값을 나타내는 것으로 판단되는 시점의 ΔC 를 사용하여 (1), (3)식으로부터 개방계($\Delta P=0$)에서의 Na^+ 와 Cl^- 의 평균 σ (겉보기 반발계수: $\bar{\sigma}$)를 구하였다. 그리고, 이것을 기초로 삼투평형($J_v=0$)일 때의 ΔP (겉보기 삼투압력: ΔP_0)를 산출하여 구한 $\bar{\sigma}$ 및 ΔP_0 를 Table 2에 나타낸다.

Table 2에 의하면 W/C가 낮고, 투수계수가 작을수록 겉보기 삼투압력은 높게되고 있어, 삼투압의 측정결과를 정성적으로 설명할 수 있다고 생각된다. 이것은 II층의 압력발생에 따른 역삼투 수량이 투수계수가 작을수록 소량으로 되기 때문이라고 할 수 있다. 그러나, 겉보기 삼투압력 값은 측정결과에 비해 매우 작게 나타나 있다. 이것은 $\bar{\sigma}$ 의 산출에 이용한 개방계에서는 삼투현상에 의한 수분이동량

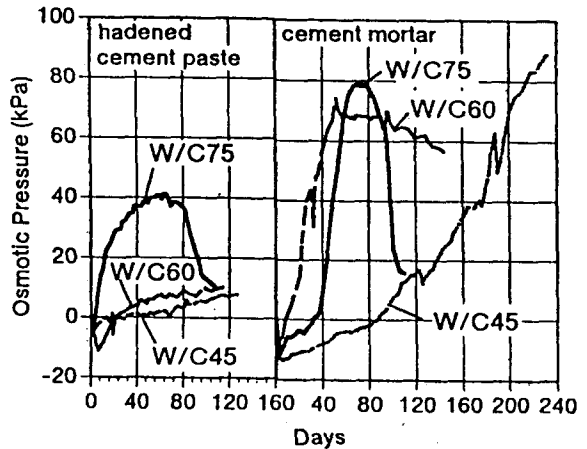


Fig 8. Changes of osmotic pressure

Table 2. Water permeability coefficient and apparent reflection coefficient of specimens and calculated osmotic pressure

W/C(%)	Hardened cement paste			Cement mortar		
	45	60	75	40	60	75
Water permeability coefficient $K (\times 10^{-9} \text{cm/sec})$	5.31	1.89	1.60	7.05	2.54	0.885
Apparent reflection coefficient $\sigma (\times 10^{-4})$	5.31	1.89	1.60	7.05	2.54	0.885
Apparent osmotic pressure $\Delta P_o (\times 10^{-1} \text{kPa})$	24.2	8.79	7.16	32.2	11.1	3.77

이 많기 때문에 II층 시험체 표면부근에 일종의 농도분극층(濃度分極層)이 형성되어 농도구배가 작아지게 되고, J_v 가 농도분극층이 없는 상태에 비하여 작은 값이 된 결과 σ 뿐만 아니라 ΔP_o 도 작아지게 된 것으로 생각되나, 현시점에서는 단정적으로 결론지어 말하기는 어려우며 더욱 명확한 결과를 위해서는 추가의 검토가 필요하다고 사료된다.

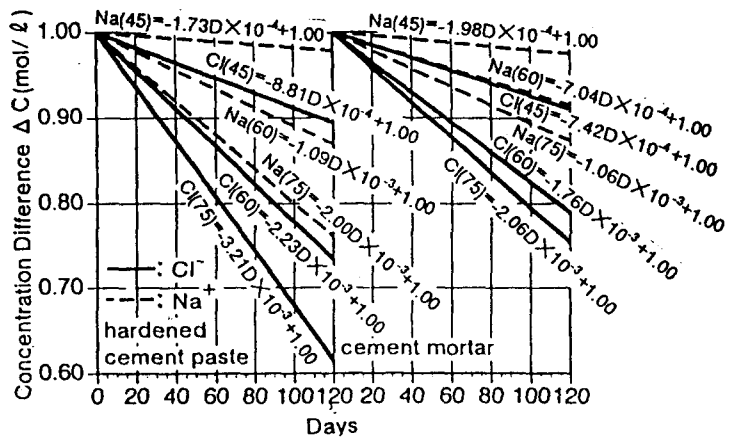


Fig 9. Changes of differences in concentration of Cl^- and Na^+ between solutions in two cells

6. 결론

시멘트경화체의 삼투현상

및 삼투압에 관한 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 시멘트경화체는 반투과성을 가지며, 낮은 W/C일수록 삼투압은 높게 될 가능성이 있다.
- (2) 막투과이론식을 이용하여 삼투압을 정성적으로 설명하는 것이 가능하다.

<참고문헌>

1. W.J.Warlow and P.W.Pye, MRIC, Osmosis as a cause of blistering of in situ resin flooring on wet concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.30, No.104, pp.152~156, September 1978
2. P. Kumar Mehta, Paulo J. M. Monteiro, 『Concrete』; Structure, Properties, and Materials (Second Edition), Prentice Hall, pp.17~113, 1986
3. 羽原俊祐, 沢木大介, 硬化コンクリートの空隙構造とその物性, 特集 無機質多孔材料, Gypsum & Lime No.240, pp.28~33, 1992
4. セメント協会, C&Cエンサイクロペディア(セメント・コンクリート化学の基礎解説), セメント協会, pp.103~104, 1996
5. 妹尾学: 1膜透過に関する理論 A非平衡の熱力学と現象理論方程式, 化学総覧, 学会出版センター, No.45, pp.1-10, 1984
6. 後勝誠史: 多孔体の測定法と物性, Gypsum & Lime, No.240, pp. 1-18, 1992
7. 田中孝二 ほが: セメント硬化体の半透過性による発生圧力に関する検討, 日本建築学会大会学術講演梗概集 A, pp. 1035-1036, 1991.