

결합재 종류에 따른 응결과 수화발열 특성

Setting and Hydration Heat Development Characteristics with Binder Types

박 찬 규* 이 승 훈* 하 재 담**
Chan-Kyu Park Seung-Hoon Lee Jae-Dam Ha

ABSTRACT

In this paper, setting and hydration heat development characteristics with three binder types, type IV cement+fly ash, type IV cement+slag powder, and type IV cement+limestone powder, were investigated.

As results, it was shown that the limestone powder decreased the initial setting time regardless of replacement ratio, especially the range of 20~50% replacement ratio, and the 2nd peak was shifted ahead when the limestone powder replacement ratio increased. But for the fly ash and the limestone powder, contrary results were obtained compared with the limestone powder.

1. 서론

최근 콘크리트 구조물의 크기가 대형화되고 시공 기술의 발달로 1회 타설되는 콘크리트 양도 크게 증가를 하여 수화열에 의한 온도균열이 문제시 되고 있다. 이러한 온도균열을 제어하기 위하여 설계 단계, 배합설계단계, 시공단계 및 균열 보수단계 등에서 여러 가지 방법이 사용되고 있다. 특히 배합 설계 단계에서는 저발열형 시멘트의 사용과 낮은 시멘트량 등이 많이 고려되어 왔다. 그런데 최근에 LNG지하저장 탱크, 핵 용합 특수 실험동, 정수장 구조물 등에서 제 4종 저열 시멘트를 사용한 콘크리트를 적용하여 성공적으로 온도균열을 제어하고 있다.

제 4종 저열 시멘트는 초기 강도발현과 수화열이 낮은 C2S(벨라이트)의 함유량을 제 1종 보통 포틀랜드 시멘트보다 2배 이상 증가시켜 수화열을 제 1종 보통 포틀랜드 시멘트의 60~70% 수준으로 저감시킨 시멘트로서 일명 벨라이트 시멘트라고도 불린다. 제 4종 저열 시멘트는 수화열이 제 2종 중용열 시멘트보다 낮기 때문에 매스콘크리트에 적용하면 온도균열제어에 매우 효과적이며, 장기강도가 매우 우수하기 때문에 고강도 콘크리트는 물론 고유동 콘크리트의 제조에도 사용되고 있다. 이러한 장점 때문에 제 4종 저열 시멘트가 최근 국내에서 사용 빈도가 증가하고 있지만, 최근의 시공실적¹⁾에 근거하면 사용되는 혼화재의 종류에 따라서 지나치게 응결이 지연되어 대규모 벽체형 구조물에서 측압을 증가시켜 전체적으로는 비경제적인 배합설계가 이루어지는 등의 문제점도 나타나고 있다.

* 삼성물산(주)건설부문 기술연구소 선임연구원

** 쌍용양회공업(주) 콘크리트 연구실 책임연구원

이에 본 연구에서는 제 4종 저열 시멘트와 국내에서 활용 가능한 혼화재를 조합한 분체에 대하여 응결 특성과 수화발열 특성을 실험적으로 파악하여 제 4종 저열 시멘트를 사용한 저발열 콘크리트 배합설계시 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 각 분체 종류별 응결 및 수화발열 특성 실험

본 연구에서는 제 4종 시멘트(벨라이트 시멘트)와 플라이애쉬, 고로슬래그 미분말 및 석회석 미분말을 각각 혼합한 분체재료에 대하여 응결 특성과 수화발열 특성을 파악하고자 시험을 실시하였다. 이 때 사용된 재료의 분말도와 비중은 표 1에 나타난 바와 같다.

표 1에 나타난 재료를 바탕으로 3가지 분체재료를 구성하였으며, 각각 제 4종 시멘트+플라이애쉬, 제 4종 시멘트+고로슬래그 미분말 및 제 4종 시멘트+석회석 미분말이다. 이와 같은 3종류 분체에 대하여 KS L 5102와 KS L 5108에서 규정하는 방법으로 응결 시간을 측정하였다. 그리고 각 분체 종류에 대하여 수화발열 특성을 파악하기 위하여 미소수화열량계를 이용하여 수화발열속도와 수화발열량을 측정하였다. 수화발열 특성을 실험에서 물/분체비는 0.5로 모든 경우에 동일하게 적용하였다.

그리고 제 4종 저열 시멘트와 혼합되는 플라이애쉬, 고로슬래그 미분말 및 석회석 미분말의 치환율을 변수로 설정하였는데, 각 재료별 치환율은 표 2에 나타난 바와 같다. 일반적으로 플라이애쉬의 경우에는 결합재량 또는 분체량에 대하여 25% 이내로 치환하여 사용하며, 고로슬래그 미분말의 경우에는 70% 이내로 치환하여 사용하지만 40~60% 범위에서 많이 치환된다. 그리고 석회석 미분말의 경우에는 특별한 규정이 없기 때문에 0~70% 치환율의 범위에서 시험을 실시하였다.

표 1 사용 재료의 특성

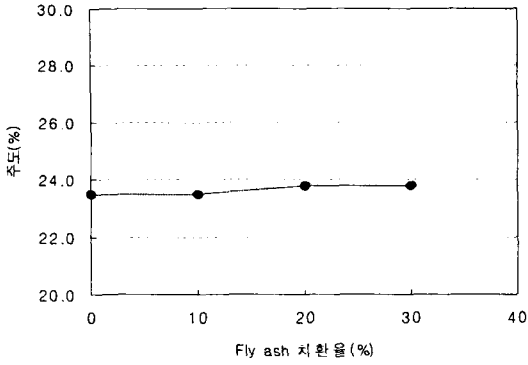
구분	비중	분말도(cm/g)	치환율(%)
제 4종 저열 시멘트	3.24	3,633	-
플라이애쉬	2.35	4,249	0, 10, 20, 30
고로슬래그 미분말	2.91	4,815	0, 10, 20, 30, 40, 50
석회석 미분말	2.72	6,283	0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70

3. 혼화재 종류에 따른 응결 및 수화발열 특성

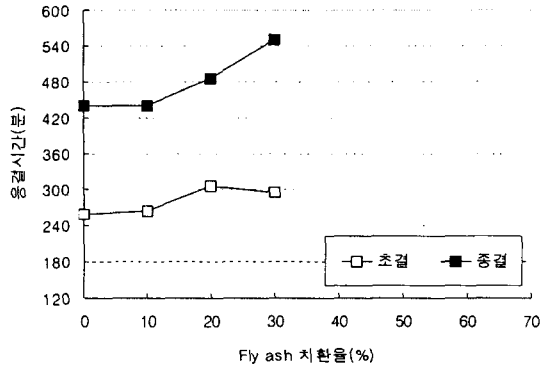
3.1 응결 특성

그림 1에서 그림 3은 각 혼화재료의 종류와 치환율에 따라서 표준 주도와 응결시간 측정 결과를 나타낸 것이다. 표준 주도에서 플라이애쉬의 경우에는 치환율 30%까지 큰 변화가 나타나지 않았고 슬래그 미분말의 경우에는 20%를 초과하여 치환한 경우에 표준 주도 값이 증가하는 경향을 나타내었다. 그리고 석회석 미분말의 경우에는 치환율 30%를 초과하는 경우에는 표준 주도 값이 증가하는 것으로 나타났다.

제 4종 시멘트에 혼화재를 치환한 경우의 응결 특성은 혼화재 종류에 따라 큰 차이가 있는 것으로 나타났다. 플라이애쉬의 경우에는 치환율 10%까지 초결과 종결이 치환하지 않은 경우에 비해서 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그런데 치환율이 10%를 초과하는 경우에는 초결과 종결시간이 증가를 하는데, 특히 치환율이 증가할수록 종결시간의 증가율이 큰 것으로 나타났다. 슬래그 미분말을 치환한 경우에는 플라이애쉬와 유사한 경향을 나타내었는데, 특히 종결에 있어서 슬래그 치환율이 50% 이상인 경우에 갑작스럽게 증가하는 경향을 나타내었다. 석회석 미분말의 경우에는 플라이애쉬와 슬래그 미분말과는 완전히 다른

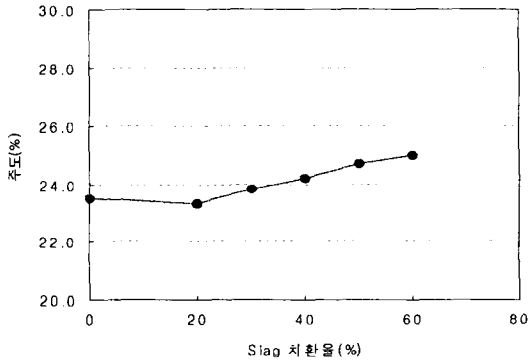


(a) 플라이애쉬 치환율과 주도의 관계

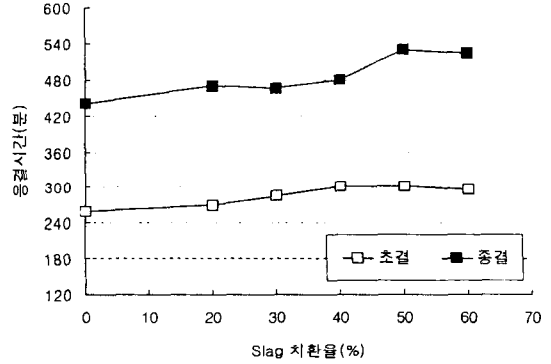


(b) 플라이애쉬 치환율과 응결과의 관계

그림 1 제 4종 시멘트에 플라이애쉬를 치환한 경우의 응결 특성

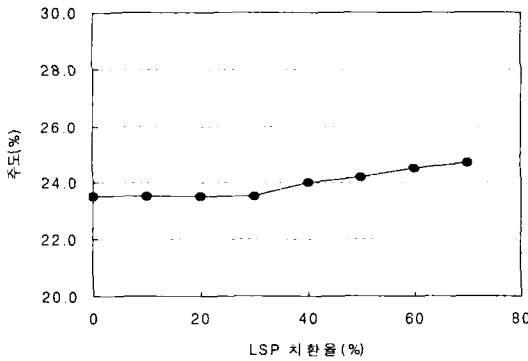


(a) 슬래그 미분말 치환율과 주도의 관계

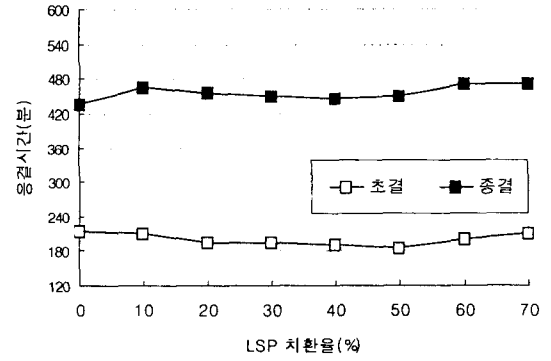


(b) 슬래그 미분말 치환율과 응결과의 관계

그림 2 제 4종 시멘트에 슬래그 미분말을 치환한 경우의 응결 특성



(a) 석회석 미분말 치환율과 주도의 관계



(b) 석회석 미분말 치환율과 응결과의 관계

그림 3 제 4종 시멘트에 석회석 미분말을 치환한 경우의 응결 특성

경향이 나타나고 있다. 특히 초결에 있어서 석회석 미분말 치환율 70%까지, 치환하지 않은 경우보다 응결 시간이 짧은 것으로 나타났으며, 치환율 20~50%범위에서 가장 짧은 것으로 나타났다. 종결에 있어서는 다른 혼화재와 마찬가지로 석회석 미분말을 치환한 경우가 치환하지 않은 경우보다 응결시간이 긴 것으로 나타났다. 그러나 치환율이 높아질수록 종결시간이 길어지는 플라이애쉬와 슬래그 미분말과는 다르게 석회석 미분말의 경우에는 거의 일정한 종결시간을 나타내었다.

이와 같은 결과에 따르면, 대규모 벽체형 매스콘크리트 구조물에서 응결시간 지연에 따른 측압을 저감시키기 위해서는 석회석 미분말을 미분말을 첨가하는 것이 유효하다고 판단된다.

3.2 수화발열 특성

그림 4는 전도식 열량계로 측정된 포틀랜드 시멘트의 수화발열 곡선을 나타낸 것이다. 그림 4에서 2구간의 유도기가 끝나고 3구간이 어느 정도 진행되면 초결이 발생한다. 그리고 그림 4에 나타낸 바와 같이 포틀랜드 시멘트의 경우에는 피크 점이 3개가 발생한다.

그림 5~그림 7은 결합재 종류에 따라서 수화발열 속도와 누적 열량을 시간의 함수로 나타낸 것이다. 그림 5는 제 4종 시멘트에 플라이애쉬를 치환한 경우의 수화발열 특성을 나타낸 것이다.

그림 5(a)에서 알 수 있는 바와 같이 제 4종 시멘트만 사용한 경우에 있어서 제 1피크와 제 2피크는 확실하게 나타나는 반면 제 3피크는 약간의 형태만 나타내고 있을 뿐 거의 나타나지 않고 있다. 그리고 플라이애쉬의 치환량이 증가할수록 제 2피크의 값이 감소를 하면서 제 2피크점에 해당하는 재령은 증가를 하는 것으로 나타났다. 즉 유도기가 끝나는 시점과 제 2피크 점에 해당하는 재령이 확실하게 증가를 하기 때문에 그림 1에 나타낸 바와 같이 플라이애쉬 치환량이 증가를 하면서 응결시간이 증가를 한다. 그리고 그림 5 (b)에서 알 수 있는 바와 같이 플라이애쉬 치환량이 증가를 할수록 수화 발열량은 감소함을 알 수 있다.

그림 6은 슬래그 미분말 치환율에 따른 수화발열 특성을 나타낸 것이다. 슬래그 미분말의 경우 수화 발열속도와 재령과의 관계에서 특이하게 제 4피크가 형성됨을 알 수 있다. 이는 슬래그 미분말이 반응하면서 상당한 열량이 발생됨을 의미하는데, 이러한 현상은 매스콘크리트 구조물에서 직접적으로 온도상승과 이어지기 때문에 콘크리트 배합설계시 이에 대한 것을 충분히 고려하여야 한다. 그림 6 (a)에서 알 수 있는 바와 같이 슬래그 미분말을 치환한 경우에도 제 2피크의 값이 감소하며, 플라이애쉬의 경우와 비교하여 두드러지지는 않지만 제 2피크에 해당하는 재령이 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그리고 그림 6(b)에서 알 수 있는 바와 같이 측정된 범위 내에서 수화열량은 슬래그 미분말의 치환율이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났지만 큰 폭으로 저감되지는 않는 것으로 나타났다.

그림 7은 석회석 미분말 치환율에 따라 수화발열 특성을 나타낸 것이다. 석회석 미분말의 경우에는 슬래그 미분말과 플라이애쉬와 같이 제 2피크의 값이 감소하는 경향은 같지만 제 2피크에 해당하는 재령은 석회석 미분말이 치환될수록 짧아지는 경향을 나타내고 있다. 즉 석회석 미분말이 치환될수록 유도기가 짧아져 초결시간이 단축되는 것으로 판단된다. 그리고 그림 7 (b)에 나타낸 바와 같이 석회석 미분말의 치환율이 증가할수록 수화 발열량도 감소하는 것으로 나타났다.

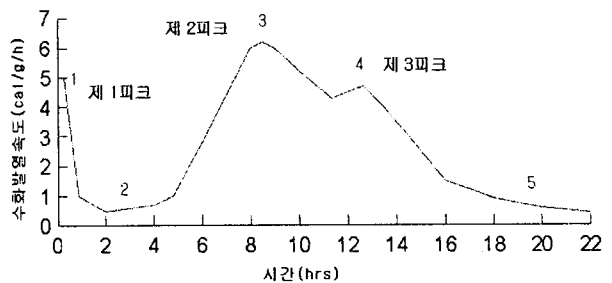
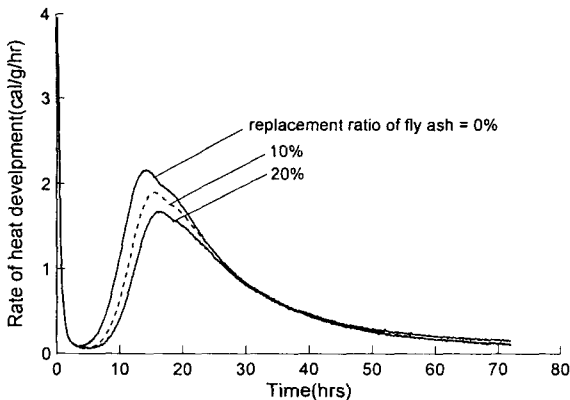
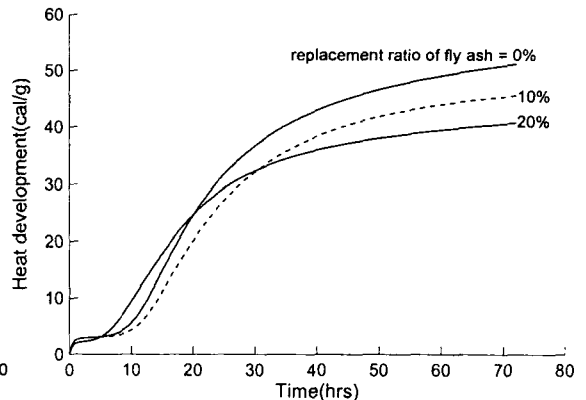


그림 4 포틀랜드 시멘트의 수화발열 곡선²⁾

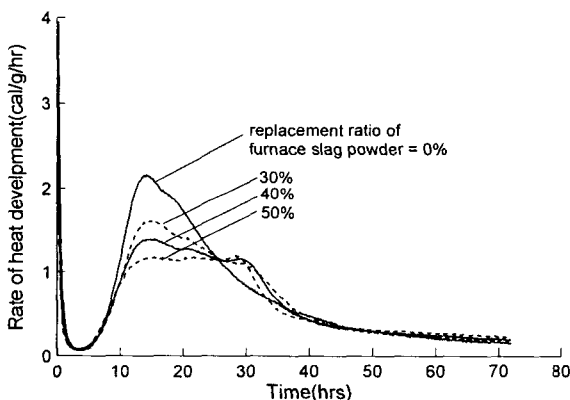


(a) 수화 발열속도

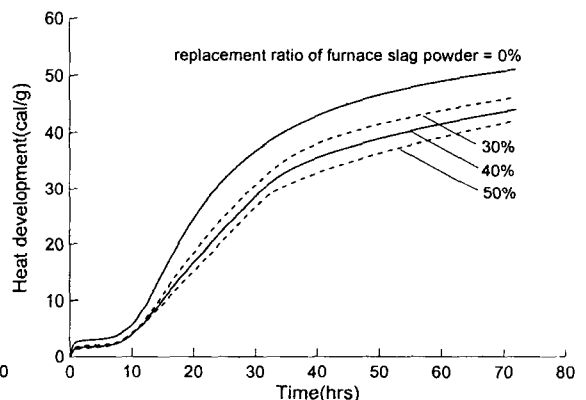


(b) 수화 발열량

그림 5 제 4종 시멘트에 플라이애쉬를 치환한 경우의 수화 발열 특성

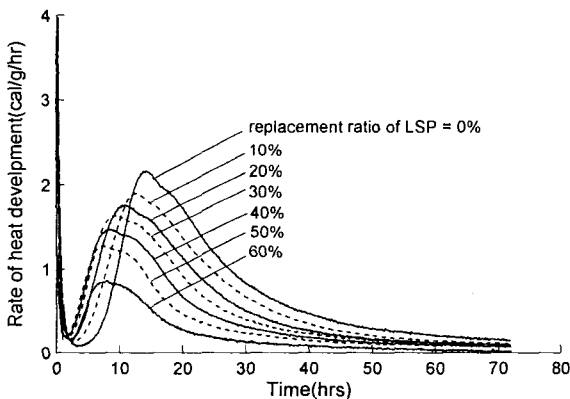


(a) 수화 발열속도

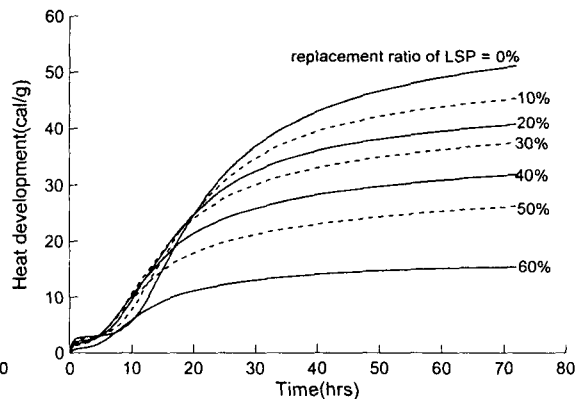


(b) 수화 발열량

그림 6 제 4종 시멘트에 슬래그 미분말을 치환한 경우의 수화 발열 특성



(a) 수화 발열속도



(b) 수화 발열량

그림 7 제 4종 시멘트에 석회석 미분말을 치환한 경우의 수화 발열 특성

3.3 분체 종류에 따른 단열온도상승곡선

그림 8은 기존의 시공자료를 바탕으로 분체종류에 따른 콘크리트 단열온도상승곡선을 나타낸 것이다. 비슷한 분체량에서 제 4종 시멘트(벨라이트 시멘트)와 제 4종 시멘트+석회석 미분말의 경우를 비교해보면, 그림에서 알 수 있는 바와 같이 초기 기온기는 거의 같은 것으로 나타났다. 반면에 재령이 증가할수록 석회석 미분말을 치환한 경우의 온도가 적은 것으로 나타났다. 이와 같이 석회석 미분말을 첨가한 경우의 초기 반응속도가 큰 이유는 그림 7(a)에 나타낸 바와 같이 석회석 미분말이 초기에 시멘트의 수화반응을 촉진시키기 때문인 것으로 판단된다.

반면에 슬래그 미분말이 치환된 경우에는 비록 총 결합재량이 낮은 이유도 있지만, 다른 분체 종류와 비교해 볼 때 초기 반응속도가 매우 낮음을 알 수 있다. 그러나 그림 8에서 알 수 있는 바와 같이 재령이 증가할수록 온도는 지속적으로 상승하여 석회석 미분말이 치환된 경우보다 오히려 높고 제 4종 시멘트만을 사용한 경우만큼 증가함을 알 수 있다.

이와 같은 결과에 기초하면, 두꺼운 매스콘크리트 부재에서는 석회석 미분말을 사용하면 중심부 온도를 저감할 수 있고, 어느 정도 얇은 부재에서는 슬래그나 플라이애쉬를 치환하면 더 효과적으로 수화열을 저감할 수 있을 것으로 판단된다.

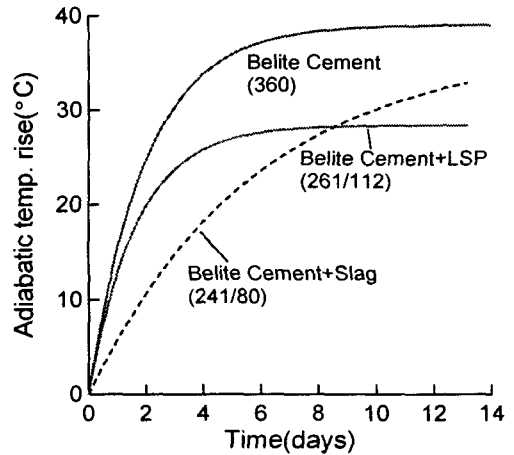


그림 8 분체 종류에 따른 단열온도상승곡선

4. 결론

제 4종 저열 시멘트에 플라이애쉬, 고로슬래그 미분말 및 석회석 미분말을 치환하여 응결 및 수화발열에 대하여 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 플라이애쉬와 고로슬래그 미분말의 경우에 치환율이 증가할수록 초결시간은 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 석회석 미분말의 경우에는 초결시간이 단축되는 것으로 나타났으며, 특히 치환율이 20~50%일 때 가장 응결시간이 단축되는 것으로 나타났다.
- 2) 수화발열 특성에서 플라이애쉬와 슬래그 미분말의 경우, 치환율이 증가할수록 제 2피크 시점이 늦어지지만, 석회석 미분말의 경우에는 오히려 당겨지는 것으로 나타났다. 그 결과 석회석 미분말의 경우에는 초결시간이 당겨지고 또한 초기 수화반응속도가 큰 것으로 나타났다.
- 3) 수화발열 특성에 있어서 슬래그 미분말을 첨가한 경우에는 제 4피크가 뚜렷이 나타나 매스콘크리트의 수화열 측면에서는 불리하므로 매스콘크리트 배합설계시 이러한 점을 충분히 고려하여야 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 박찬규 외 4인, "매스콘크리트 벽체에서 콘크리트 응결 특성과 축압과의 관계," 한국콘크리트학회 2001년도 가을학술발표회 논문집, 제 13권 2호, 2001, pp. 935~938.
2. 정재동, "콘크리트 재료공학," 보성각, 1996.