

매스기초에 적용되는 콘크리트의 수화열 해석을 통한 온도균열 제어방안

Ready Mixed Concrete Journal

이상수 한밭대학교 건축공학과 교수, 공학박사

1 서론

최근 들어 대형 콘크리트 구조물이나 고강도 및 고내구성 콘크리트의 필요성이 증가함에 따라 콘크리트 제조시 시멘트량이 증가하게 되어 수화열에 의한 온도균열의 발생 위험이 증가하고 있는 실정이다.

실제 구조물의 설계 및 시공시 이러한 수화열에 의한 온도응력은 무시할 수 없는 영향을 일으키는 경우가 빈번히 일어나고 있다. 온도균열은 보통 그 폭이 크고 구조물을 관통하는 경우가 많으며, 구조물의 시공초기에 발생하여 구조물의 내력, 수밀성 및 미관 등과 특히 장기적인 내구성능의 저하를 초래하므로 설계, 시공 및 관리 단계에서 면밀한 검토를 하여야 한다.

매스콘크리트에서는 온도 상승시에는 단면 내의 온도차에 의해 발생하는 내부 구속응력이 주로 문제가 되지만, 최대 온도에 도달한 후 온도 강하시에는 외부 구속과 내부 구속에 의한 두 가지의 응력이 겹쳐진 복합응력이 문제가 되며, 각각의 성분의 대소에 따라 온도

균열의 발생시기 및 발생양상도 달라진다.

온도균열에서는 구조물의 내력에도 영향을 미쳐 반드시 대책수립이 요구되는 균열도 있는 반면에 비록 균열이 발생했다 하더라도 무시할 수 있는 균열이 있다. 또한, 구조물의 종류와 크기에 따라서는 1회의 타설높이를 결정하는데 있어서 낮게 타설하는 것이 균열제어에 효과적인 경우가 있는 반면에 타설높이를 높게 하는 것이 효율적인 경우도 있다. 다시 말해서 온도균열의 제어대책을 적절히 수립하기 위해서는 온도균열의 발생원인 및 영향인자들의 영향도에 대해 충분히 인식한 후에 설계 및 시공 상황에 따라 적절한 대책을 수립할 필요가 있다. 따라서, 본 고에서는 매트 콘크리트의 온도균열, 응력발생기구 및 제어대책에 대하여 기존문헌을 참조하여 알아보고 매트기초에 적용되는 콘크리트의 유동성능 및 강도특성을 위한 최적배합을 선정하고 매스콘크리트의 수화열 해석을 통한 현장여건에 따른 최적의 양생방법을 선정하는 매스콘크리트의 온도균열 제어방안시스템에 대하여 참고자료로서 제시하고자 한다.

II 매스콘크리트의 온도균열

2-1 개요

일반적으로 넓은 슬래브에서는 부재단면의 최소치수가 80cm 이상, 하단이 구속된 벽체에서는 두께 50cm 이상이고, 또한 수화열에 의한 콘크리트의 내부 최고온도와 외기온의 차가 25℃ 이상이 될 것으로 예상되는 경우를 매스콘크리트로 다루어야 한다.

단면치수가 큰 부재에 타설된 콘크리트는 경화 중에 시멘트의 수화열이 축적되어 내부 온도가 상승한다. 이 때문에 콘크리트 부재의 표면과 내부의 온도차가 생기기도 하고, 또는 전체의 온도가 하강할 때의 수축변형이 구속되기도 하여 균열이 발생하는 등의 문제가 일어나기 쉽다. 또한, 1회에 타설한 콘크리트량이 대량인 경우가 많기 때문에, 타설계획을 신중하게 수립하여 시공하지 않으면 콜드조인트가 발생하기 쉽다.

과대한 온도균열이나 콜드 조인트는 모두 미관상의 문제, 철근의 녹발생 촉진 등에 의한 내구성의 저하, 경우에 따라서는 누수문제를 야기하고, 나아가서는 구조물의 내력적인 기능을 저하시키는 요인이 될 수도 있다.

수화열에 기인한 온도균열의 발생여부는 콘크리트 부재의 단면최소치수나 내·외부 온도차, 온도상승량의 크기만이 아니라, 콘크리트 부재의 구조적 형상(벽·보·슬래브), 시공상 치수(타설높이·타설길이·타설면적), 주위로부터의 구속조건, 신축 맞춤새의 유무 등 다수의 요인에 의해 영향을 받는다. 개개의 조건마다에 균열발생의 가능성을 정량적으로 판정하는 방법이 종종 시도되고 있지만, 현실적으로는 상당히 곤란하다.

한편, 지금까지의 연구조사 결과에 따르면, 구조부재의 형태에 따라 온도균열이 비교적

발생하기 쉬운 것과 그렇지 않은 것이 있다는 사실이 지적되고 있다. 일반적으로, 벽부재가 가장 균열이 발생하기 쉽고, 보부재·매트부재의 순으로 적어지며, 기둥부재의 경우는 비교적 균열의 발생이 적은 경우이다. 벽부재의 경우는 특히 외부로부터 구속을 받기 쉽고, 장대한 구획을 한번에 타설하기 때문에 균열이 발생하기 쉽다. 반대로, 기둥부재는 외부로부터의 구속이 비교적 작고, 외부로의 방열이 원활하기 때문에 균열이 발생하기 어렵게 되는 것으로 생각되고 있다. 일반건물의 경우, 1변이 1m 정도인 기둥에서는 온도균열이 발생하지 않는 경우도 많이 있고, 벽부재의 경우는 벽두께 60cm 정도인 것을 포함하여 매스콘크리트로 적용하는 편이 좋은 경우도 있다. 또한, 한번에 타설한 구획내에 단면치수가 다른 부재가 있는 경우에는 균열이 발생하기 쉽다는 보고도 있다.

따라서, 부재단면의 최소치수와 내외의 온도차만으로 일률적으로 매스콘크리트의 규정을 적용하는 것은 피하고, 온도균열 발생의 용이, 1회에 타설된 콘크리트량 등을 고려하여 특기에 따라 적용개소를 규정하는 것이 바람직하다.

즉, 부재의 형상·용도나 요구되는 성능에 맞추어 재료·배합·시공상의 대책만이 아니라, 설계상의 대책을 포함하여 종합적으로 대처할 필요가 있다. 설계상의 대책으로서 부재의 내구성 및 기능면에서 지장이 없는 부분에 미리 신축줄눈·균열유발줄눈 설치하여 균열을 집중시키던가, 표면균열의 분산이나 관통성 균열의 균열폭 제어 등 목적에 맞추어 배근하는 방법 등이 있다.

매스콘크리트 시공의 요점을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 타설 후 콘크리트 부재의 내부온도를 가능한 한 낮게 한다.
- (2) 내부온도가 최고온도에 달한 후의 온도

매스기초에 적용되는 콘크리트의 수화열 해석을 통한 온도균열 제어방안

강하를 가능한 한 완만하게 한다.

- (3) 내부와 표면부의 온도차를 가능한 한 작게 하기 위해 콘크리트 부재 표면을 급랭시키지 않도록 한다.
- (4) 외부로부터의 구속을 가능한 한 작게 하도록 타설구획의 크기, 타설순서·타설시간 간격을 정한다.
- (5) 콜드 조인트가 발생하지 않도록 연속적으로 타설한다.

그러나, 시공상의 대책만으로 매스콘크리트의 온도균열의 발생을 완전히 방지하는 것은 대상구조물에 따라서 곤란한 경우가 많다. 또한, 시공대책의 검토를 위한 온도균열 예측법도 종종 제안되고는 있지만, 현실적으로 확실한 방법이 확립되었다고는 말하기 힘들다. 따라서, 시공자는 사전에 설계자 및 담당자와 충분히 협의하고, 만일의 경우, 온도균열이 발생하여도 구조물의 내구성·기능성상 지장이 없는 설계면에서의 검토를 포함한 종합적인 대책에 대해서 그 계획을 입안하고 담당자의 승인을 받을 필요가 있다.

즉, 시공에 있어서는 실제의 콘크리트 온도가 배합강도를 결정할 때에 상정한 콘크리트 부재의 온도이력과 큰 차이 없는 것을 확인함과 동시에, 양생 중지시기 및 거푸집 탈형시기를 결정하기 위해 콘크리트 부재온도 관리방법에 관한 계획을 사전에 세울 필요가 있다. 이에 따라, 매스콘크리트를 대상으로 한 콘크리트 타설이 계속되는 경우에는 타설방법·양생방법의 수정·변경을 필요로 하는가 아닌가를 확인하는 것이 가능하도록 한다.

2-2 매스콘크리트의 온도균열

콘크리트는 경화과정에서 수화현상에 의해 수화열이 발생하게 된다. 그러나 매스콘크리트와 같이 크기가 큰 경우에는 외부로의 방열

이 증대해져 내부온도가 크게 상승하고, 이에 따른 체적팽창이 구속을 받게 되면 구조물내의 콘크리트내에 온도응력이 발생한다. 이 때에 발생한 온도응력이 콘크리트의 인장강도보다 크게 될 경우 균열이 발생하며, 이것을 온도균열이라 한다.

매스콘크리트에 발생하는 균열은 일반적으로 폭이 크고 부재를 관통하는 경우가 많아 구조물의 내력, 내구성, 수밀성 및 미관 등의 소요품질을 손상시키기 때문에, 시공 전에 콘크리트 구조물 내부의 온도상승 및 하강량을 예측하고 온도상승량 및 하강량을 최소화시킬 수 있는 대책의 수립이 절실한 실정이다. 매스콘크리트의 시공시에 발생하는 온도균열은 지금까지 많은 연구가 되어 왔으나, 그 발생조건 및 생성과정이 정확히 규명되어 있지 않은 실정이며, 온도균열에 대한 조사실적에 의하면 온도균열은 발생시에 다른 균열과 달리 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- (1) 온도균열이 발생한 콘크리트에는 상당히 큰 온도 상승이 일어나 있다.
- (2) 발생한 온도균열의 방향이나 위치 및 폭에는 상당히 규칙성이 보인다.
- (3) 온도균열은 콘크리트 타설 후 약 2주일 이내에 발생한다.

매스콘크리트의 균열은 경화 전에 발생한 것과 경화 후에 발생한 것으로 대별할 수가 있다. 경화 전에 생기는 균열은 보통 플라스틱 균열이라 하여, 콘크리트 타설 후 경화가 시작되는 매우 초기에 발생하는 균열이다. 또한, 경화 후에 발생하는 균열은 건조수축에 의한 균열과 수화열에 의한 균열로 나눌 수 있다.

건조수축균열과 수화열에 의한 균열은 균열형태 및 발생기구가 유사하여 구분이 매우 곤란하지만, 일반적으로 건조수축에 의한 균열은 매우 장기에 걸쳐서 일어나 주로 1개월 이상이 경과한 시점에서 일어난다.

온도균열은 균열을 일으키는 원인에 따라 크게 두 가지로 나뉘어지고, 균열형태도 다르다. 내부구속이 강한 경우에 발생하는 균열은 구조체의 표면과 중심부와의 온도차이에 의해 팽창이 구속을 받아 발생하고, 콘크리트 타설 후 초기 1~2일이 경과한 시점에서 주로 발생하며, 일반적으로 표면부에 발생하고 관통하지는 않기 때문에 직접적인 피해는 적고, 주로 구조물의 내구성에 영향을 미친다. 발생 시기 또한 온도 상승이 최대에 도달한 후 온도강하로 바뀐 시점과 대체로 일치한다. 또한, 외부구속이 강한 경우에 발생하는 균열은 온도 상승이 최대에 달한 후 온도 강하로 바뀌면서 콘크리트가 수축되고, 이 수축이 방해를 받아 발생하며, 콘크리트 타설후 대략 1주일에서 보름이 경과한 시점에서 발생하게 된다. 이러한 온도응력에 의해서 발생하는 온도 균열은 대부분 구속면에 대하여 직각방향으로 발생하며, 수축을 방해하는 구속물의 종류와 형상·치수에 따라 다르지만 구조물을 관통하는 경우가 많다. 이러한 외적구속에 의해 생긴 균열을 방지하기 위해서는 콘크리트의 온도상승을 가능한 한 적게 하고, 최대온도 상승후의 단위시간당 온도 강하량을 적게 하며, 신·구콘크리트의 이음부에는 양쪽 블록 사이의 온도차를 작게 하여야 한다.

한편, 매스콘크리트에서 발생하는 온도균열이 내부구속에 의한 것인가, 또는 외부구속에 의한 것인가는 발생응력이 구조물의 크기, 즉 L/H(밑면길이/높이), H/W(높이/폭) 등의 비 및 L, H, W의 절대치에 크게 영향을 받기 때문에 일률적으로 판단하기는 곤란하다. 다만, 내·외부의 온도차가 지배적인 요인일 경우에는 온도분포형상에 크게 의존하기 때문에, 단위시멘트량이나 타설높이, 타설시기 등이 주요한 변수가 되고, 외부구속이 탁월한 경우에는 평균 온도강하량과 외부구속 상태에 크게

영향을 받기 때문에, 타설블록의 형상 및 구속 상태 등에 대한 정확한 검토가 필요하다.

이러한 발생원인 때문에 매스콘크리트 시공시에는 온도균열의 발생을 방지하기 위해서 다음과 같은 시공대책을 세우고 있다.

- (1) 콘크리트의 온도상승을 가능한 한 낮게 억제하고
- (2) 최대온도에 도달한 후의 단위시간당의 온도강하량을 작게 하며
- (3) 콘크리트 이음부에 대해서는 두 블록 사이에 커다란 온도차가 생기지 않도록 시공해야 한다.

이 중에서 (1)의 시공대책은 내부구속에 의한 균열발생을 제어하기 위한 시공대책이고, (2), (3)은 외부구속에 의한 균열발생을 제어하기 위한 시공대책이다.

2-3 온도응력의 발생기구

2-3-1 개요

콘크리트는 타설한 후 얼마간은 유동적으로 거동하므로 초기의 온도변화에 의해 생긴 체적변화는 소성유동에 의해 없어진다. 콘크리트의 내부응력이 발생하는 것은 수화반응에 의한 정도로서 콘크리트의 경화가 진행되는 시점 이후로 생각되며, 이 시점(기준재령)에서의 온도변화가 실제 콘크리트 내에 생긴 온도변화와 관계가 있다. 기준재령이 몇 시간이 되는지는 충분한 자료가 없지만, 기존의 계측 결과에서 보면 타설 1일 후를 기준재령으로 가정하여 계산하는 경우도 있다.

매스콘크리트에서 발생하는 온도응력은 단면내의 온도차에 의해서 발생하는 성분과 외부구속에 의해서 발생하는 성분의 합으로 나타내지며, 온도상승시에는 단면내의 온도의 불균일에 의한 내부구속응력이 주로 문제가

되고, 최대온도에 도달한 후 온도강하시에는 외부구속과 내부구속에 의한 두 가지의 응력이 겹쳐진 복합응력이 문제가 되며, 각각의 성분의 대소에 따라 온도균열의 발생시기 및 발생양상도 달라진다.

2-3-2 온도응력에 영향을 미치는 인자

매스콘크리트의 온도응력에 영향을 미치는 인자로서는 콘크리트의 비열, 열전도율, 열전달률, 열팽창률, 구속체의 탄성계수, 크기 및 구속체와 피구속체간의 경계조건 등 수없이 많다.

그러나, 온도응력해석에 있어서는 입력자료로 사용되는 콘크리트의 재료적인 물성이 어느 정도 정량화 되어 있는 상태이지만, 구속체의 형상이나 구속영향도에 대해서는 거의 정량화 되어 있지 않고, 단지 기존의 실험결과를 그대로 인용 또는 가정해서 사용하고 있는 실정이다. 콘크리트의 온도응력은 본래 내·외부의 온도차와 외부구속체의 구속 등에 의해 발생하는 응력의 합으로 나타낸다. 이 때에 내·외부의 온도차가 구조물내의 온도응력을 지배하는 소위 내부구속의 경우에는 온도응력의 양상이 온도분포 형상에 크게 의존하기 때문에, 온도분포에 크게 영향을 미치는 단위시멘트량, 타설온도 및 타설높이 등이 중요한 변수가 된다. 그러나, 암반 위에 콘크리트를 타설하거나 기존의 콘크리트 위에 덧붙여서 콘크리트를 타설하는 경우에, 콘크리트내부의 수화발열 현상보다는 오히려 밀면길이와 타설높이와의 비와 구속체의 탄성계수가 더 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서, 각 인자들이 온도응력에 미치는 영향에 대하여 충분히 파악해 놓아야 한다.

2-3-3 내외부의 온도차에 의해 발생하는 온도응력

콘크리트부재의 표면부와 중심부의 방열상

태가 서로 다르기 때문에, 부재내부에는 각 재령마다 온도차가 생긴다. 이러한 온도분포에 의한 자유신축변형이 구조물의 거시적인 변형에 의해 구속을 받아 온도상승시에는 표면부에 인장력이, 그리고 중앙부에 압축력이 발생하고, 온도하강시에는 그 반대로 표면부에 압축력이 중앙부에는 인장응력이 발생하게 된다.

온도상승시에 구조물의 표면부는 외부로 열이 방출하게 되므로 온도가 낮고 중앙부는 방열이 늦기 때문에, 임의의 재령에 있어서 현재의 재령과 그 전 재령간의 온도차는 대략 포물선 형태를 이룬다. 이 때, 표면부는 온도변화에 의한 변형량보다 더 많은 변형이 발생하기 때문에 인장력이 발생하고, 중앙부는 자유신축 변형량보다 적게 일어나기 때문에 압축력이 발생한다. 이러한 각 재령마다의 온도차에 의한 변형률과 탄성계수가 달라지기 때문에, 온도차가 거의 0에 수렴하여도 발생응력은 0으로 수렴하지 않고 어느 일정한 값에 수렴하게 된다. 따라서, 중앙부는 초기에는 압축응력을 나타내다가 인장응력으로 바뀌고, 표면부는 인장응력을 나타내다가 압축응력으로 바뀐다.

2-3-4 외부구속에 의해 발생하는 온도응력

외부구속에 의한 응력은 온도상승이 최고점에 도달한 후 온도강하에 의한 수축이 외적으로 구속되면서 발생한다. 그리고, 외부구속에 의한 응력은 단면 높이방향으로 거의 직선분포를 이루고 있으며, 이러한 응력분포의 직선성은 L/H 가 커질수록 명확하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이것은 a/d 가 큰 힘부재의 경우는 응력분포가 명확히 직선성을 나타내는데 반해, a/d 가 매우 작은 깊은 보의 경우 응력분포가 불균일하게 일어나는 것과 마찬가지로 이해할 수 있다.

또한, 외부구속에 의한 응력은 축력과 힘을 받고 있는 힘부재의 응력분포와 유사한 분포

를 나타내고 있고, 반대로 수화열에 의한 자체 변형을 구속하면서 발생하는 등가의 휨모멘트와 축방향력으로 대체하여 생각할 수 있다.

외부구속의 영향은 휨변형 구속과 축변형 구속의 조합으로 나타낼 수 있다. 비교적 외부구속의 영향이 작은 경우, 초기 온도상승시에는 반대로 작용하여 축변형 구속보다 휨변형 구속이 탁월한 형태가 된다. 그리고, 구속체 탄성계수가 큰 경우에도 L/H가 작으면 마찬가지로 휨변형 구속 영향이 큰 응력형태가 되지만, L/H가 점차로 커질수록 초기에는 전단면에 걸쳐 압축력으로서, 그리고, 나중에는 인장력으로서 작용하는 축변형 구속이 탁월한 형태가 되어간다.

2-4 온도응력 평가방법

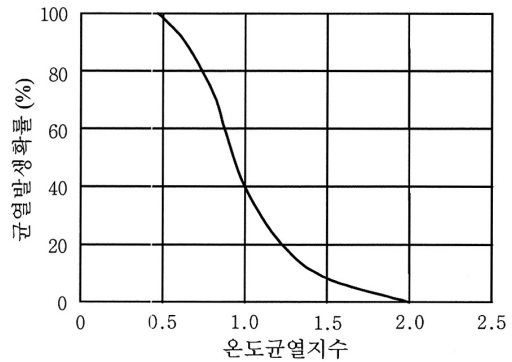
콘크리트의 경화과정에서 수화현상에 의해 발생한 온도응력이 콘크리트의 인장강도보다 크게 될 경우 균열이 발생하게 되는데, 이를 온도균열이라 한다. 콘크리트 표준시방서에서는 온도균열에 대한 위험도를 나타내기 위한 지표로서 온도균열지수를 활용하고 있다.

$$\text{온도균열지수 } (I_c) = f(t) / \sigma(t)$$

여기서, $\sigma(t)$: 재령 t일에서 수화열에 의해 발생한 부재중의 온도응력의 최대치

f(t) : 재령 t일에서 콘크리트의 인장강도로서 양생온도를 고려하여 구한값

온도균열지수는 안전성을 나타내는 지수로서, 그 값이 적을수록 균열의 발생확률이 크고 균열도 많아지며, 균열의 크기도 커지는 경향이 있다. 현재, 국내시방서에 규정되어 있는 온도균열지수에서는 [그림 1]에서와 같



[그림 1] 온도균열지수

이 온도균열지수가 1.0인 경우 균열발생확률을 40%로 보고 있으며, 균열이 거의 발생되지 않을 것으로 예상되는 온도균열지수인 1.5의 경우는 균열발생확률이 약 8%인 것으로 보고 있다.

- (1) $I_c \geq 1.5$: 균열을 방지할 경우
- (2) $1.2 \leq I_c < 1.5$: 균열발생을 제한할 경우
- (3) $0.7 \leq I_c < 1.2$: 유해한 균열발생을 제한할 경우

콘크리트 표준시방서에서는 간이적으로 온도계산 결과만을 이용하여 온도균열지수를 구하는 방법도 제시되어 있는데 즉, 외부구속력에 대한 영향이 적고, 내부구속이 우월한 경우에 대하여 다음과 같이 제안하고 있으며, 이 방법은 온도계산 결과를 바탕으로 균열발생에 대한 안정성을 구한다.

- i) 연질의 지반 위에 친 슬래브 등과 같이 내부구속응력이 큰 경우

$$\text{온도균열지수} = 15 / \Delta T_i$$

여기서, ΔT_i : 내부온도가 최고일 때의 내부와 표면과의 온도차(°C)

- ii) 암반이나 매시브한 콘크리트 위에 친 슬래브 등과 같이 외부구속응력이 큰 경우

매스기초에 적용되는 콘크리트의 수화열 해석을 통한 온도균열 제어방안

$$\text{온도균열지수} = 10 / (R \cdot \Delta T_0)$$

여기서, ΔT_0 : 부재평균 최고온도와 외기온
도와의 균형시의 온도차(°C)

R : 외부구속의 정도를 표시하는
계수로서 다음과 같다.

비교적 연한 암반 위 : 0.5

중간정도의 단단한 암반 위 : 0.65

경암 위 : 0.8

이미 경화된 콘크리트 위 : 0.6

이들 값은 콘크리트의 인장변형률의 한계
를 100×10^{-6} 으로 하여 이것과 구속변형률과
의 비로서 구한 것이다.

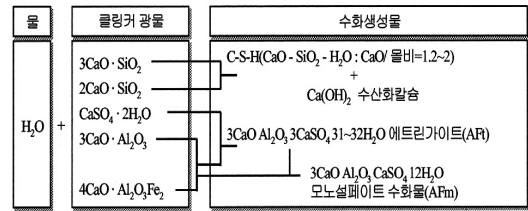
온도균열지수의 목표치를 높게 하는 것은
균열의 위험성을 감소시켜 주지만, 그 대신 방
지를 위한 공사비도 증대하여 경제성에 커다
란 영향을 미친다. 따라서, 목표치는 구조물에
요구되는 수밀성이나 기밀성 등의 기능, 균열
의 내구성이나 내력에의 영향도 구조물이 놓
여지는 환경 등을 감안하여 정할 필요가 있다.

2-5 재료상의 대책

시멘트 수화열의 크기는 시멘트 화합물 가
운데에서도 C3S, C3A의 다소에 의해 영향을
받고, 시멘트 조성 중에서 각각의 양은 시멘
트의 종류에 따라 다르다. 내부온도를 저감시
키기 위해서는 가능한 한 발열량이 작은 시멘
트를 선정할 필요가 있다.

2-5-1 시멘트 화합물의 수화반응

시멘트 화합물은 모두 물과 혼합되면 물과
화학[水和, Hydration]하여 수화물
(Hydrate)을 생성하고 경화한다. 클링커 광
물의 수화반응은 [그림 2]와 같다. 그러나, 시
멘트는 물과 접촉하여도 바로 반응하지 않고,
어느 기간 Plastic 상태를 지속한다.



[그림 2] 클링커광물의 수화반응

시멘트가 물과 접촉하여 어느 시간에 반응이
활발하면 어느 정도는 반응속도가 커진다. 시
멘트의 수화반응 단계를 살펴보면, 제1단계부
터 제5단계까지 5가지의 반응기간으로 특징지
을 수 있다. 제1, 2단계의 두 기간을 종합해서
유도기, 제3단계를 가속기, 제4, 5단계를 감속
기로 3기간으로 나누어 부르는 경우도 있다.

2-5-2 재료상의 수화열 저감 대책

매스콘크리트에는 수화열이 작은 플라이애
쉬 시멘트 · 중용열 포틀랜드 시멘트, 또는 고
로 시멘트를 사용하는 것이 좋다. 조강 포틀
랜드 시멘트는 수화열이 크기 때문에 사용하
지 않는 편이 좋다. 실리카 시멘트는 수화열
이 낮고 장기강도도 높아지지만, 보통 포틀랜
드 시멘트에 비해서 동일한 작업성을 얻기 위
한 단위수량이 많아지고, 물시멘트비 변동에
대한 강도의 변동이 민감하게 되는 등 품질관
리상의 문제가 있다. 즉, 혼합 시멘트에 있어
서는 A, B종에 비해 C종 쪽이 혼화재가 많고,
시멘트량이 적어지기 때문에 수화열이 작아
져서 온도관리면에는 유리하지만, 강도관리
면에서 주의를 요한다. 또한 A종은 보통 포틀
랜드 시멘트와의 차가 적다.

이와 같은 사실에서, 매스콘크리트에 적용
하는 시멘트는 설계기준강도 및 그 강도를 얻
은 재령을 충분히 검토한 다음에, KS L

5201(포틀랜드 시멘트)에 규정된 보통 및 중용 열 포틀랜드 시멘트, 또는 KS L 5210(고로 시멘트) 및 KS L 5211(플라이애쉬 시멘트)에 규정한 A, B 또는 C종 가운데서 선정하면 좋다.

즉, 혼합 시멘트의 혼화재 치환율은 동일한 중별이어도 상품에 따라 같지 않기 때문에, 공사착수 전에 실제로 사용하는 시멘트의 발열량·강도발현특성에 대해서 조사해 두는 것이 좋다. 또한, 최근의 고로 시멘트는 슬래그의 분말도를 높게 하여 강도발현성을 개량하는 경향이 있고, 필연적으로 발열속도도 빨라지는 경향으로 되고 있기 때문에 주의를 요한다.

2-6 배합상의 대책

콘크리트의 내부온도상승을 적게 하기 위한 중요한 사항의 한 가지는 단위시멘트량을 억제하는 것이다. 굵은골재의 치수를 크게 하기도 하고, 혼화재·화학혼화제를 활용하는 등의 사용재료에 대하여 배려함과 동시에, 다음과 같은 콘크리트 배합상의 배려가 필요하다. 즉, 시공상 지장이 없는 범위에서 강도관리 기준재령을 장기로 하던가, 필요이상으로 배합강도를 높게 하는 것을 피하던가, 가능한 한 낮은 슬럼프로 하던가, 필요에 따라 유동화제를 유효하게 사용하는 등의 대책이 고려되고 있다. 또한, 설계자에게는 필요이상으로 설계기준강도가 높아지지 않도록 함과 동시에 소요의 배합강도로 설정할 때는 과잉 강도보정치를 상승시키거나, 콘크리트 제조상 편차에 대해서 과대한 안전율을 적용하는 등의 문제는 피하는 것이 절대적이다. 이것을 종합적으로 검토하여 시멘트량을 가능한 한 적게 하도록 반드시 시험비빔을 수행하여 배합을 결정할 필요가 있다.

또한, 매스콘크리트의 소요의 품질 가운데에는 당연히 내구성도 포함하고 있다. 그러

나, 일반 건물에서 매스콘크리트의 적용이 예상되는 기초보나 지중보 등에서 콘크리트의 중성화는 진행되기 어렵다는 것, 더욱이 단위시멘트량을 적게 하여도 슬럼프가 낮은 경우, 배합상의 물시멘트비가 커지지 않는다.

매스콘크리트에서는 사용재료에 대한 배려에 더하여, 배합상의 슬럼프 설정에 대해서도 가능한 한 수화열의 발생량을 적게 하기 위하여 슬럼프를 낮게 선정할 필요가 있다. 물론, 수화열 발생의 주된 요인인 단위시멘트량을 가능한 한 적게 하기 위해 배합설계상의 배려도 있지만, 슬럼프는 매스콘크리트의 적용부위 단면과 시공성을 고려하여 15cm를 최대로 한다. 즉, 통상의 매스콘크리트에 있어서는 타설개소 부위의 단면치수가 크고, 슬럼프가 작은 콘크리트로도 타설·다짐이 용이하기 때문에, 가능한 한 슬럼프를 작게 하여 단위시멘트량을 적게 할 필요가 있다. 또한, 굵은골재의 최대치수를 40mm로 한 경우에는 25mm로 한 경우의 단위수량에 비해 약 6%의 수량을 저감할 수 있고, 이에 따라 시멘트량을 같은 비율로 저감할 수 있다.

한편, 매스콘크리트를 적용해야 하는 부재에 있어서도 구조설계조건에서 반드시 타설하기 쉬운 단면치수·배근상태로 되지 않는 경우도 있다. 이와 같이 슬럼프 15cm에서는 단면치수와 배근밀도에서 타설이 용이하지 않고, 밀실한 다짐도 곤란하다고 예측되는 경우에는, 원자력발전소 시설의 콘크리트 공사 등에 있어서, 매시브한 부재에의 사용실적도 있고 양호한 결과를 얻은 유동화 콘크리트를 적용하는 것이 바람직하다.

단, 유동화 콘크리트의 적용에 있어서는 베이스 콘크리트의 슬럼프 및 유동화 후의 슬럼프 선택을 적절히 해야 한다. 재령 28일 기준으로 계획배합을 정하는 경우는 일반 콘크리트와 비슷한 방법으로 하였다. 즉, 일반적인 경우에

는 재령 28일에 있어서 소요의 설계기준강도를 얻기 위하여 20℃ 표준수중양생 강도를 표준으로 온도의 영향을 고려하고, 20℃이하의 예상 기온으로 되는 경우에 배합강도 콘크리트 강도의 보정치 T를 더하는 것으로 하고 있다.

매스콘크리트에 있어서도 이와 같이 생각할 필요가 있고, 기온이 낮아지는 경우에는 콘크리트 강도의 보정치가 필요하다. 그러나, 매스콘크리트의 부재에 있어서 온도의 영향은 시멘트의 수화반응에 따른 발열효과를 무시할 수 없고, 동일한 외기온도 환경에 있어서는 일반적인 부재(단면의 최소치수가 80cm 미만인 부재)보다 온도이력은 높아진다. 따라서, 매스콘크리트의 온도에 관계된 콘크리트 강도의 보정치는 설계기준강도가 얻어지는 재령까지의 부재의 평균양생온도에 기초하여 설정하였다. 이에 따라 보정치는 일반적인 경우보다 작게 할 수 있었고, 부재의 온도를 증대시키지 않는다고 하는 균열방지 관점에서 보다 합리적이다.

실시공에 있어서, 계획배합을 정하는 경우의 예상평균양생온도에 따른 콘크리트 강도의 보정치는 예상평균기온에 따른 경우에 비해 대폭적인 보정치의 저감이 가능하다.

한편, 이러한 계획배합에 기초하여 매스콘크리트의 구조체 콘크리트 강도관리를 위한 공시체의 양생방법은 일반 콘크리트의 현장수중양생을 대신하여 표준양생으로 하고 있다. 일반 콘크리트의 경우는 구조체 콘크리트 각부의 온도와 현장수중온도가 거의 같다고 하는 가정에 기초한 것이지만, 매스콘크리트의 경우는 수화열 때문에 콘크리트 온도가 현장수중온도보다 높아지고, 또한, 부재단면내의 위치에 따라 타설 후의 온도경과가 다르기 때문에, 강도발현상태도 위치에 따른 달라지는 경향이 있다. 이러한 경향은 부재단면이 커질수록 현저해 진다.

이와 같이, 매스콘크리트의 경우는 공시체의 양생방법을 현장수중양생으로 하면 분명히 실제의 양생방법과는 차이가 있기 때문에, 부재의 각위치의 온도경과를 재현한 양생방법을 취하고, 그 결과에 기초하여 각 위치에서의 강도를 추정하는 방법이 고려되고 있다. 이러한 방법은 양생설비 등의 점에서 실시가 곤란하고, 또한, 모든 경우에 구조체에서 직접 코어를 채취하여 강도시험을 하는 것도 현실적으로는 곤란하다. 따라서, 여기에서 매스콘크리트의 구조체 콘크리트 강도관리를 위한 공시체 양생방법은 외기온·부재내 각 위치의 영향을 받지않는 안정한 조건인 표준양생으로 한다. 매스콘크리트 부재의 양생온도가 표준양생과 다름에 따른 위험성은 양생온도에 기초한 강도의 보정과 양생방법의 수정 등으로 방지하고 있다. 즉, 구조체 콘크리트의 강도를 표준양생한 공시체로 추정한 경우, 주로 외기온이 비교적 낮은 시기에 시공된 부재의 구조체 강도를 과대평가할 위험성이 있지만, 매스콘크리트의 경우는 부재단면내의 소요온도를 측정하고, 미리 정한 계획과 다른 경우에는 양생방법을 수정하는 등의 조치를 강구해 둔다.

콘크리트 타설 후로부터의 양생온도변화, 특히, 통상의 경우에 표준으로 하는 20℃ 수중양생에서 저온측으로의 변화는 콘크리트 강도발현에 영향을 미친다고 알려져 있다. 양생온도가 낮은 경우의 콘크리트 강도발현이 표준양생온도 20℃일 때의 강도발현에 비해 저하하는 것은 시멘트 콘크리트 고유의 특성이고, 매스콘크리트에 있어서도 마찬가지이다. 따라서, 매스콘크리트에서도 재령 28일에서 소정의 설계기준강도를 얻으려고 하는 경우에, 예상평균양생온도가 20℃보다 낮게 되는 조건에 있어서는 콘크리트의 강도보정치를 설정할 필요가 있다.

이 콘크리트의 강도보정치를 “예상평균 양

생온도에 따른 콘크리트 강도의 보정치 T1”로 한다. 예상평균 양생온도와 외기온의 관계는 계절·부재단면·단위시멘트량·시멘트종류에 따라 다르다. 즉, 예상평균기온 보다도 실제상의 부재내부의 온도이력은 수℃ 높아지고, 온도보정치가 필요한 동절기에도 양생온도 조건으로서 강도발현상 유리하다. 따라서, 예상평균기온에 따라 강도보정치를 설정하는 것은 단위시멘트량을 증가시켜 강도상 과잉 품질이 되게 할뿐만 아니라 매스콘크리트 특유의 열응력에 따른 균열대책이라는 점에서도 좋은 것은 아니다.

2-7 타설작업상의 대책

매스콘크리트 부재의 콘크리트 타설 후의 최고온도 상승량은 부재의 형상·치수나 배합 등에 따라 크게 다르지만, 부재단면의 최소치수가 80cm 이상인 경우는 일반적으로 20~50℃ 정도의 온도상승이 예상되고, 받아들이기 지점의 콘크리트 온도가 높을수록 내부온도상승은 빨리 진행되어 최고온도가 높아지고, 온도하강속도도 커진다. 또한, 대량의 콘크리트를 장시간에 걸쳐 타설하는 경우, 받아들이기 지점의 콘크리트 온도가 높으면, 시멘트의 수화열에 의한 온도상승도 더해져서 응결이 빨라지고, 콜드 조인트 등의 문제가 생기기 쉽다. 이 때문에 타설시의 콘크리트 온도는 가능한 한 낮게 하는 것이 바람직하지만, 온도의 상한은 구조물에 요구되는 성능, 부재의 형상·치수, 타설속도, 시공시의 기상조건 등을 고려하여 정해야 한다. 또한, 타설온도를 낮게 하기 위해서는 비빔온도 및 운반 중의 온도상승을 낮게 억제할 필요가 있고, 이를 위해서는 콘크리트 제조설비·제조방법 및 시공방법에 최대의 제약이나 변경을 요구하는 경우도 있다. 콘크리트 받아들이기

지점의 온도는 온도응력억제의 관점에서 본 경우, 이외의 요인과의 관계 가운데에서 정하는 것이고 특히, 한계는 정하지 않는다.

대량의 매스콘크리트를 타설하는 경우는 우선 적당한 구획으로 나누고, 수화열에 의한 온도상승량이 앞서 정해진 온도보다 작아지도록 계획한다. 매스콘크리트 부재를 분할하여 타설하는 경우의 타설순서나 이어치기 시간간격(재령차)을 정할 때, 다음과 같은 상반된 2가지 방법이 있다.

- (1) 한 구획의 콘크리트를 타설한 후, 가급적 빨리 인접구획의 콘크리트를 타설한다.
- (2) 한 구획의 콘크리트를 타설한 후, 가급적 천천히 인접구획의 콘크리트를 타설한다.

(1)의 방침은 앞서 타설한 콘크리트의 강도 및 강성이 아직 작고, 온도도 상승중이거나 별로 저하하지 않을 때에 인접구획의 콘크리트를 타설함에 따라, 구콘크리트로부터 받는 구속을 작게 하고, 또한, 신규콘크리트의 온도강하에 따른 수축량의 차를 가능한 한 적게 하여 균열을 방지하도록 하는 방법에 기초한 것이다.

(2)의 방침은 앞서 타설한 콘크리트를 가능한 한 장기간 방치하고, 수화열의 발산이나 온도하강에 따른 수축이 진정되는 것을 기다려 인접구획의 콘크리트를 타설함에 따라, 구콘크리트로부터 받는 수화열이나 길이 변화에 따른 영향을 적게 하여 균열을 방지하도록 하는 방법에 기초한 것이다. 중력식 댐 등에서는 옛날부터 이 방법이 쓰여지고 있다.

2-8 양생관리

콘크리트의 내부온도를 가능한 한 낮게 하는 것이 매스콘크리트 시공의 가장 중요한 것이기 때문에, 아직 내부온도가 상승하고 있는

매스기초에 적용되는 콘크리트의 수화열 해석을 통한 온도균열 제어방안

기간에 부재가 열의 발산이 어려운 상태에 놓여있거나, 직사일광을 받거나 하는 것은 피해야 한다. 단, 내부온도를 낮게 할 목적으로 콘크리트 표면을 냉수 등으로 식혀도 매스콘크리트의 경우는 주로 표면부분의 냉각만으로 머물러 내부의 온도상승을 낮게 함에는 별로 효과가 없고, 반대로 내부와 표면부의 온도차를 크게 하는 경우가 많기 때문에 주의할 필요가 있다.

이 기간의 양생에 있어서 부재의 외부구속 정도에 따라 방법을 달리할 필요가 있다.

(외부구속이 작은 경우)

예를 들면, 砂지반상의 1단타설 매트 슬래브 등에 있어서 온도응력은 주로 내부와 표면부의 온도차에 기인하기 때문에, 내부와 표면부와의 온도차를 크게 하지 않는 편이 좋은 경우에 상당한다.

(외부구속이 큰 경우)

예를 들면, 대단면의 저반으로부터 세우는 벽체에 있어서 온도응력은 주로 최고온도로부터 기온까지의 온도저하에 의해 생기기 때문에, 벽전체의 온도상승을 가능한 한 억제하는 것을 우선하고, 벽표면과 벽내부와의 온도차가 커지는 것은 부득이 한 것으로서 표면으로부터 계속해서 냉각시킨다. 또한, 이 경우, 표면의 냉각은 온도가 일단 상승해버린 것을 냉각하는 것이 아니라, 타설 직후부터 온도가 상승하지 않도록 계속해서 냉각시킬 필요가 있다. 내부의 온도상승이 완만해지고 최고온도에 달한 후에는 매스콘크리트 부재를 보온해서 가능한 한 장기간에 걸쳐 완만하게 방냉하는 것이 좋다.

외부구속이 큰 경우도, 작은 경우(내부구속이 큰 경우)도, 주된 온도응력은 내부 콘크리트의 온도 하강시에 생기기 때문에 온도강하를 가급적 완만하게 함에 따라, 콘크리트에 발생하는 응력을 크리프로 완화하도록 한다.

콘크리트 온도가 외기온 근처까지 떨어지는 것은 시멘트의 종류, 콘크리트의 배합, 구조물의 종류·규모에 따라 다르기 때문에, 온도강하량을 확인하고 균열발생의 최종적 상황을 측정하는 것이 필요하다. 균열 발생상황(균열 폭, 간격 등)이 예측한 범위에 들어올 경우에는 사전에 계획한 대로 대응을 취하면 된다.

예측치와 달리, 구조물에 나쁜 영향을 미칠 것으로 판단되는 균열 발생상황의 경우에는 그 원인을 규명하여 대책을 검토하고, 이후의 구조물의 시공계획에 반영되는 것이 중요하다.

III 실험계획 및 방법

3-1 실험계획

각종 배합조건별 매스콘크리트의 특성을 검토하기 위해 실험계획을 [표 1]과 같이 설정하였다.

본 실험에서는 매스콘크리트의 수화열, 유동성 및 강도측면을 고려하여 굵은골재 최대 치수 25mm를 선정하여 실시하였고, 물-결합재비는 39.0, 41.0, 43.0(%)의 3수준, 단위수량은 160(kg/m³), 혼화재료의 종류는 플라이 애쉬를 선정하여 검토하기로 하였으며, 혼화

[표 1] 실험계획

항 목		조 건
물-결합재비(%)		39.0, 41.0, 43.0
단위수량(kg/m ³)		160
혼화재 종류 및 치환율		FA0, FA10 FA20, FA30
시험 항목	균지않은 콘크리트	슬럼프, 공기량 (경시 0, 30, 60, 90분)
	균은 콘크리트	압축강도(3, 7, 14, 28일)

[표 2] 매스콘크리트의 요구성능

항 목	목 표 치	비 고
설계기준강도(N/mm ²)	30	
배합강도(N/mm ²)	36	할증계수 1.2도입
유동성 (받아들이기 지점시)	슬럼프 (cm)	18±2.5
공기량(%)	4.5±1.5	
염화물 함유량(kg/m ³)	0.3 이하	KS F 4009 부속서 1

재의 치환율은 유동성 및 강도를 고려하여 0, 10, 20, 30(%)로 검토하였다. 한편, 매스콘크리트의 요구성능을 [표 2]와 같이 설정하였다.

3-2 사용재료

본 실험에 사용된 시멘트는 국내 영월산 H사에서 제조된 KS L 5201규정의 보통 포틀랜드시멘트(I종)을 사용하였으며 품질을 관

[표 3] 시멘트의 물리·화학적 성질

시멘트의 종류	비중	분말도 (cm ² /g)	응결시간(h:m)		강열감량 (%)	안정도 (%)	압축강도(kgf/cm ²)		
			초결	종결			3일	7일	28일
보통포틀랜드 시멘트	3.15	3,264	3:20	6:10	1.6	0.09	227	285	389
KS L 5201	-	≥2,800	≥1h	≤10h	≤3.0	≤0.8	≥130	≥200	≥290

[표 4] 플라이애쉬의 물리·화학적 성질

혼화재의 종류	비중	분말도 (cm ² /g)	강열감량 (%)	습분 (%)	주성분(%)					
					SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
플라이애쉬	2.20	3,681	3.6	0.1	54.0	22.7	8.9	2.3	1.2	0.9
KS L 5405	≥1.95	≥2,400	≤5.0	≤1.0	≥45	-	-	-	-	-

[표 5] 골재의 물리적 성질

구 분	최대 입경 (mm)	조립율 (F.M)	표건 비중	흡수율 (%)	씻기 손실량 (%)	실적율 (%)	단위용 적중량 (kg/m ³)	비 고
잔 골 재	시험값	5	2.70	2.55	1.50	1.6	-	1,540
	KS F 2526	5	-	≥2.5	≤3.0	≤3.0	-	-
굵은 골재	시험값	25	6.89	2.67	0.97	0.3	58.0	1,530
	KS F 2527	25	-	≥2.5	≤3.0	≤3.0	-	-

매스기초에 적용되는 콘크리트의 수화열 해석을 통한 온도균열 제어방안

[표 6] 고성능 감수제의 물리적 성질

혼화제 종류	물리적 성질				품질성능						
	색상	주성분	pH	비중	감수율 (%)	블리딩 량비(%)	응결시간차 (min)		압축강도비(%)		
							초결	중결	3일	7일	28일
고성능 감수제 (표준형)	갈색	폴리카르 본계	7.0	1.10	23.0	18	30	50	139	129	120
KS F 2560	-	-	-	-	≥18	≤60	-30~+120		≥ 135	≥ 125	≥ 115

리할 목적으로 그 물리·화학적 성질은 [표 3]과 같다. 혼화재인 플라이애쉬는 보령산 F급을 사용하였다. 그 물리·화학적 성질은 각각 [표 4]와 같다.

골재의 경우는 잔골재는 부산지역의 혼합사(강모래 50: 부순모래 50)를 사용하였으며, 굵은골재는 김해지역의 부순자갈을 사용하였다. 또한 고성능감수제의 경우 국내 D사의 폴리카르본산계 고성능감수제를 사용하였다. 그 물리적 성질은 각각 [표 5] 및 [표 6]과 같다.

IV 실험방법 및 콘크리트의 배합

4-1 실험방법

매스콘크리트의 실내배합시험은 팬형의 강제식 믹서를 사용하였으며, 재료투입은 단위결합재량이 많은 매스콘크리트이기 때문에 재료의 균질성을 위하여 선모르타르방법을 사용하였다. 비빔시간은 건비빔 30초, 모르타르 비빔 60초, 콘크리트 비빔 150초로서 총 240초(4분)로 하였다. 고성능감수제의 사용량은 목표 슬럼프

[표 7] 매스콘크리트의 배합표

W/B (%)	S/a (%)	FA (%)	W (kg/m³)	Unit weight(kg/m³)					SP (%)
				C	FA	S1	S2	G	
39.0	45.5	0	160	410	0	394	395	990	0.9
		10		369	41	391	391	981	0.9
		20		328	82	388	388	973	0.9
		30		287	123	384	385	965	0.9
41.0	46.0	0	160	390	0	402	403	989	0.9
		10		351	39	399	400	982	0.9
		20		312	78	396	396	973	0.9
		30		273	117	393	393	966	0.9
43.0	46.5	0	160	372	0	410	411	988	0.9
		10		335	37	407	408	981	0.9
		20		298	74	404	405	974	0.9
		30		260	112	401	402	967	0.9

프치를 확보하기 위한 최소의 양을 사용하였다.

굳지않은 콘크리트에 대한 슬럼프시험은 KS F 2402, 공기량 시험은 KS F 2421의 시험방법에 따라서 실시하였다. 또한 재령별 압축강도를 측정하기 위하여 압축강도 측정용 1020cm 공시체를 제작하였다. 24시간 후에 몰드를 탈형한 다음, 공시체는 소요의 재령까지 203℃의 수중에서 표준양생을 실시하였다.

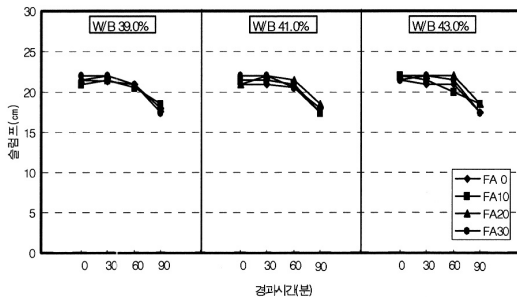
4-2 콘크리트의 배합

매스콘크리트의 유동성을 비롯한 각종 공학적 특성을 알아보기 위해 선정된 플레인 콘크리트의 배합표는 [표 7]과 같다.

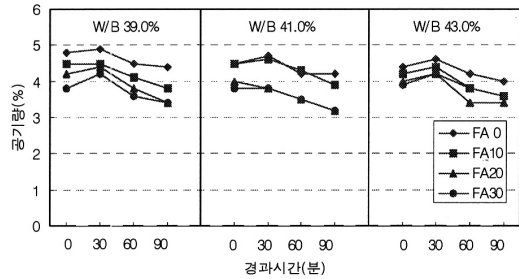
V 실험결과 및 분석

5-1 굳지않은 콘크리트의 성상

매스콘크리트의 유동성을 알아보기 위한 슬럼프의 시험결과를 [그림 3]에 나타난 바와 같다. 굳지않은 상태에서는 전반적으로 소요 성능을 충족하기 위한 목표값을 고성능감수제의 첨가에 의해 만족시킬 수 있었으며, 플라이애쉬의 치환율에 따른 유동성의 변화는



[그림 3] 물-결합재비별 슬럼프 시험결과



[그림 4] 물-결합재비별 공기량 시험결과

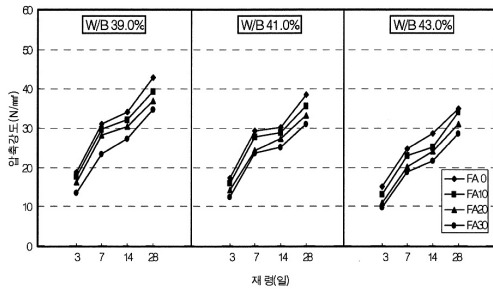
커다란 차이를 보이지 않은 것으로 나타났다. 그러나 플라이애쉬의 치환율이 증가함에 따라 약간의 증진성상을 보이고 있어 플라이애쉬의 불베어링 작용에 의해 유동성이 향상된다는 기존의 연구보고와 일치하는 시험결과를 보이고 있었다. 한편, 각 배합조건별 콘크리트의 경과시간에 따른 슬럼프 변화는 특히, 기존에 문제시되었던 슬럼프로스현상이 그다지 크지 않은 것으로 나타나고 있어, 운반시간에 따른 콘크리트의 품질변화는 적을 것으로 판단된다. 이는 슬럼프의 유지성능을 개선시킨 폴리카르보산계 고성능감수제를 사용한 결과로 기인한 것이라고 할 수 있다.

공기량의 경우 플라이애쉬의 치환율이 커질수록 공기량이 감소하는 현상을 보여 플라이애쉬의 치환율에 따라 소요의 공기량을 확보하는 방안이 필요한 것으로 여겨진다. 따라서 콘크리트의 성능을 개선시킬 목적으로 혼화재를 사용할 경우에는 반드시 사전에 혼화재의 치환율에 따른 성상을 확인한 후에 사용하는 것이 바람직할 것으로 여겨진다.

4-2 굳은 콘크리트의 성상

[그림 5]는 콘크리트 종류별 물-결합재비

매트기초에 적용되는 콘크리트의 수화열 해석을 통한 온도균열 제어방안



[그림 5] 물-결합재비별 압축강도 시험결과

및 플라이애쉬의 치환율 변화에 따른 재령별 압축강도 발현성상을 나타낸 것이다. 플라이애쉬 치환율이 증가할수록 압축강도 증가성상은 감소하는 것으로 나타났다. 이는 플라이애쉬의 포졸란반응에 따른 강도증진성상이 장기재령에서 일어나기 때문이라 판단된다.

본 실내시험결과, 소요의 요구조건인 설계기준강도 30N/mm²(배합강도 36N/mm²)를 만족하는 배합조건으로는 물-결합재비 39.0~41.0%에서 플라이애쉬 치환율 20~30%인 것으로 판단되었다. 따라서, 본 실내시험에서의 최적배합조건은 물-결합재비 40%, 플라이애쉬 치환율 25%로 최종 선정하였다.

VI 매스콘크리트의 수화열 해석

6-1 수화열 해석을 위한 부재 모델링 및 입력조건

해석대상 부재는 매트기초로서 [표 8]에 부

[표 10] 수화열 해석을 위한 입력 Data

재료의 물성		사용재질	콘크리트
비열(kcal/kg℃)			0.25
밀도(kg/m ³)			2,500
열전도율(kcal/mh℃)			2.30
열전달률(kcal/m ² h℃)	노출/살수	12.0	-
	시트(Blue sheet)	6.0	
	양생매트	5.0	
	양생매트+Blue sheet	2.5	
외기온도(℃)			8.3
콘크리트 온도(℃)			15
91일 압축강도(MPa)			40
압축강도 발현계수			a=4.5, b=0.95
91일 탄성계수(kgf/cm ²)			Auto calculation
발열함수			K=42, α=0.351

[표 8] 부재 모델링의 개요

부재 종류	항 목	판크기(m)	두께(m)	설계기준강도(N/mm ²)	사용재료	비고
매트기초		33.9(L)×44.7(W)	2.0	30	OPC+FA25%	-

[표 9] 콘크리트 배합표

배합조건	물-결합재비(%)	잔골재율(%)	단위수량(kg/m ³)	단위중량(kg/m ³)				
				시멘트	플라이애쉬	잔골재	굵은골재	고성능감수제
W/B40.0-F25	40.0	46.0	160	300	100	786	965	3.20

[표 11] 20년간의 부산지역 일평균 및 월평균 기온(°C)

구분	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
평균	3.0	4.3	8.3	13.4	17.4	20.5	24.2	25.7	22.1	17.3	11.3	5.6

재 모델링의 개요를 나타냈다. 본 해석에 적용된 콘크리트의 배합은 [표 9]와 같고 이에 따른 기본 입력 Data는 [표 10]과 같다.

콘크리트의 최고상승온도 (K) 및 상승속도 (a)는 각종 시공여건 및 타설온도 등에 따라 크게 상이하게 되므로 이에 대한 정확한 평가가 이루어져야 한다.

따라서, 본 수화열 해석에서는 상기의 배합 조건을 바탕으로 콘크리트 표준시방서를 참고하여 최고상승온도 (K) 및 상승속도 (a)를 산정하였다.

6-2 외기온 및 콘크리트 온도

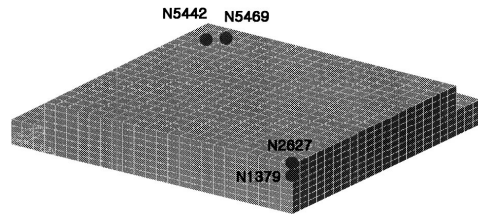
외기온은 부산의 기상자료를 검토하여 3월 중의 평균기온 8.3°C를 적용하는 것으로 하였으며, 콘크리트 온도는 해당 레미콘사의 기록을 참고하여 15°C로 하였다. 또한, [표 11]은 기상청의 기상데이터 중에서 20년간의 부산지방의 일평균 및 월평균 기온을 정리한 것이다.

6-3 수화열 해석결과

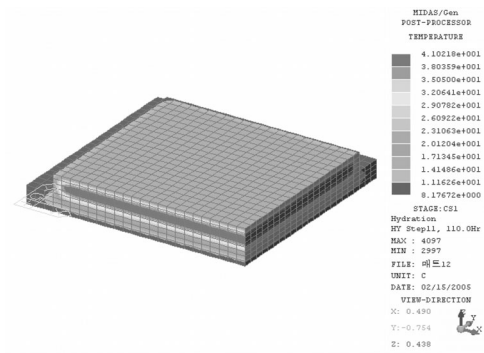
[그림 6]에 해석에 사용된 매트기초의 절점 번호를 나타냈다.

(1) 노출 살수양생 조건

[그림 7]은 콘크리트 타설 후 대기에 노출된 상태인 경우에 예상되는 매트기초의 온도 분포를 나타낸 것이다. 전반적으로 매트기초의 표면부가 급격히 냉각되는 반면에 중앙부는 콘크리트 타설 후 최고 41.0°C(110hr.) 정



[그림 6] 모델링 부재의 절점번호



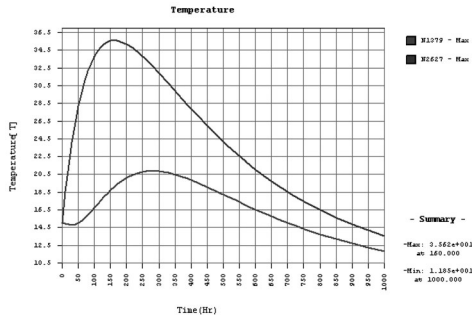
[그림 7] 매트기초의 수화온도 분포도

도까지 도달하는 것으로 해석되었다.

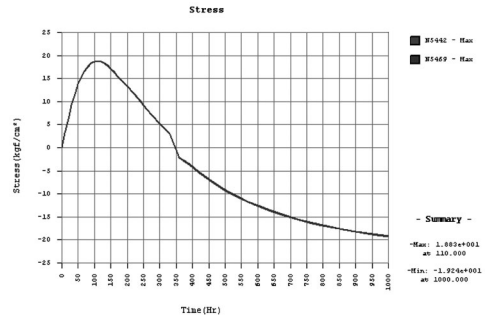
[그림 8]은 각 절점별 온도이력을 나타낸 것이다. 최고상승시점에서 중심부 온도가 35.5°C일 때 표면부 온도는 10.5°C로 나타나고 있어 약 25°C 정도의 온도차가 발생하고 있다.

[그림 9] 및 [그림 10]에 온도 응력분포도 및

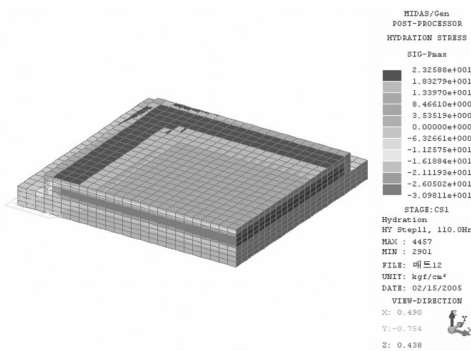
매스기초에 적용되는 콘크리트의 수화열 해석을 통한 온도균열 제어방안



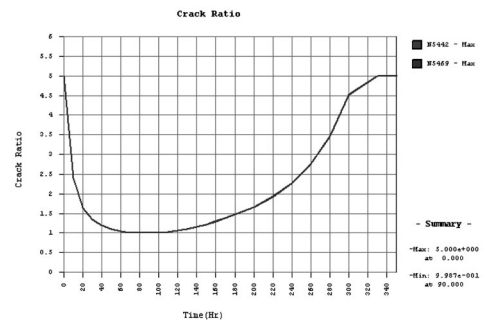
[그림 8] 각 절점의 온도이력



[그림 10] 주요절점의 응력이력



[그림 9] 응력분포도



[그림 11] 온도균열지수 평가결과

각 절점별 허용응력과 Stress를 나타낸 것이다.

균열의 발생이 예상되는 절점에 대한 온도 균열지수 평가결과를 [그림 11]에 나타냈다.

균열지수 평가결과, 온도균열의 발생이 우려되었던 절점에서도 1.0 정도의 값을 나타내고 있어, 본 양생조건에서는 온도응력에 의한 균열발생의 위험성은 높은 것으로 나타났다.

(2) P.E.Film(Blue Sheet) 양생 조건

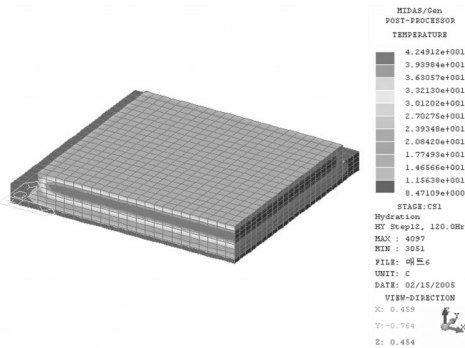
[그림 12]는 콘크리트 타설 후 비닐로 양생한 경우에 예상되는 매트기초의 온도분포를 나타낸 것이다. 전반적으로 매트기초의 표면

부가 급격히 냉각되는 반면에 중앙부는 콘크리트 타설 후 최고 42.5°C(120hr.) 정도까지 도달하는 것으로 해석되었다.

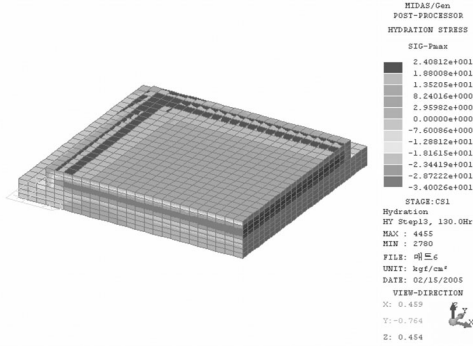
[그림 13]은 각 절점별 온도이력을 나타낸 것이다. 최고상승시점에서 중심부 온도가 36.0°C일 때 표면부 온도는 19.5°C로 나타나고 있어 약 16.5°C 정도의 온도차가 발생 [그림 14] 및 [그림 15]에 온도 응력분포도 및 각 절점별 허용응력과 Stress를 나타낸 것이다.

균열의 발생이 예상되는 절점에 대한 온도 균열지수 평가결과를 [그림 16]에 나타냈다.

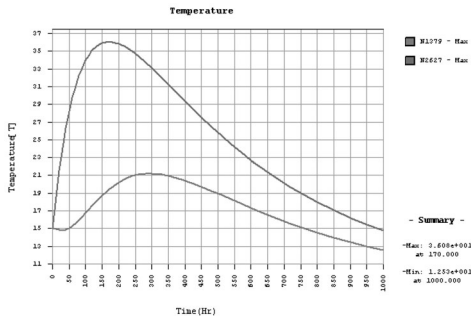
온도균열지수 평가결과, 온도균열의 발생



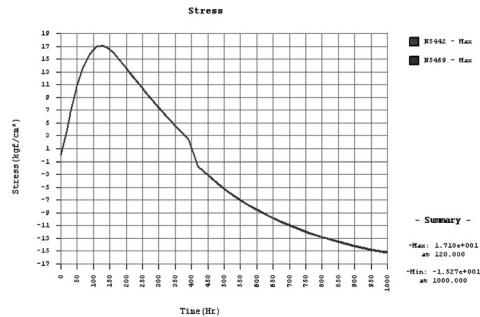
[그림 12] 수화온도 분포도



[그림 14] 응력분포도



[그림 13] 각 절점의 온도이력



[그림 15] 주요절점의 응력이력

이 우려되었던 절점에서의 온도균열지수는 1.20 정도로 나타내고 있다. 이는 콘크리트 표준시방서에서 제시하는 『균열발생을 제한할 경우 : 온도균열지수 1.2~1.5』에 해당한다고 할 수 있다.

(3) P.E.Film+양생포 양생 조건

[그림 17]은 콘크리트 타설 후 [비닐+양생포]와 같이 이중으로 양생할 경우에 예상되는 매트기초의 온도분포를 나타낸 것이다. 전반적으로 매트기초의 표면부가 급격히 냉각되는 반면에 중앙부는 콘크리트 타설 후 최고 44.7℃(140hr.) 정도까지 도달하는 것으로

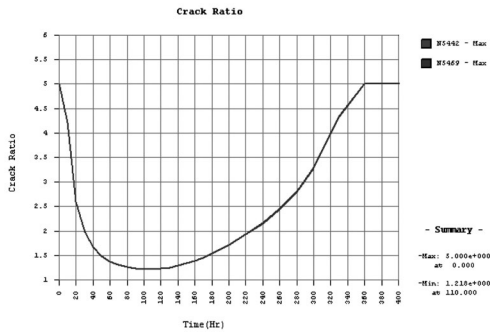
해석되었다.

[그림 18]은 각 절점별 온도이력을 나타낸 것이다. 최고상승시점에서 중심부 온도가 36.5℃일 때 표면부 온도는 20.5℃로 나타나고 있어 약 16.0℃ 정도의 온도차가 발생하고 있다.

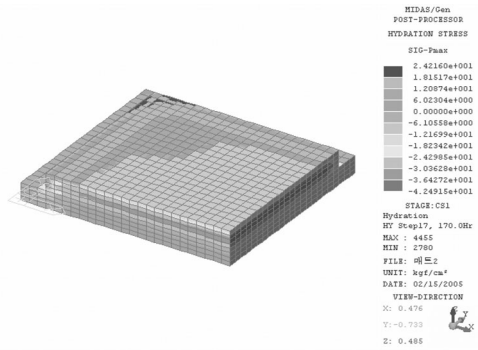
[그림 19] 및 [그림 20]에 온도 응력분포도 및 각 절점별 허용응력과 Stress를 나타낸 것이다. 균열의 발생이 예상되는 절점에 대한 온도균열지수 평가결과를 [그림 21]에 나타냈다.

온도균열지수 평가결과, 온도균열의 발생이 우려되었던 절점에서의 온도균열지수는 1.60의 값을 나타내고 있어, 본 양생방법이 온도 균열제어에 유리할 것으로 판단된다. 이

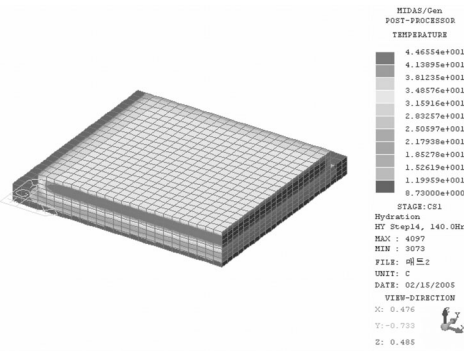
매스기초에 적용되는 콘크리트의 수화열 해석을 통한 온도균열 제어방안



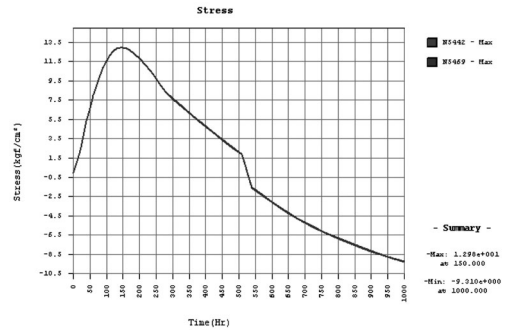
[그림 16] 온도균열지수 평가결과



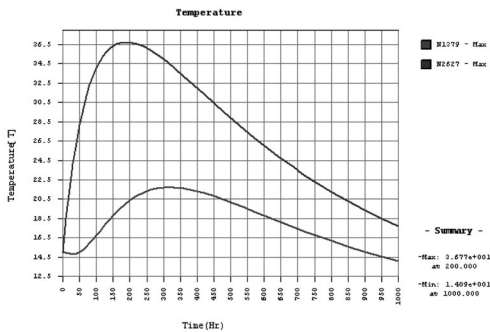
[그림 19] 응력분포도



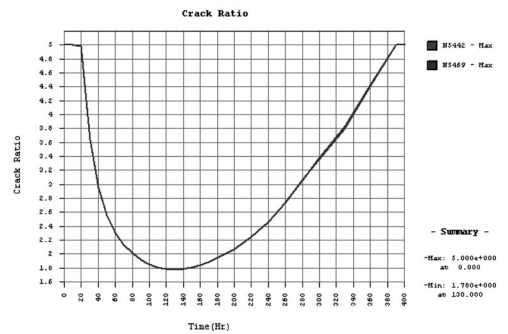
[그림 17] 매트기초의 수화온도 분포도



[그림 20] 주요절점의 응력이력



[그림 18] 각 절점의 온도이력



[그림 21] 온도균열지수 평가결과

는 콘크리트 표준시방서에서 제시하는 『균열 발생을 방지할 경우 : 온도균열지수 1.5 이상』

에 해당된다고 할 수 있다.

VII 양생방법 및 양생기간 선정

(1) 균열 발생을 제한할 수 있는 온도균열지수 1.2이상으로 관리할 경우 세부적인 양생방법 및 양생기간을 정리하면 다음과 같다.

- ① 타설 후, 4일까지 : [콘크리트+양생매트 +P.E Film]
↓ P.E Film 제거
- ② 타설 후, 6일까지 : [콘크리트+양생매트]
↓ 양생매트 제거
- ③ 타설 후, 6일 : 매트기초 양생종료

(2) 균열 발생을 방지할 수 있는 온도균열지수 1.5이상으로 관리할 경우 세부적인 양생방법 및 양생기간을 정리하면 다음과 같다.

- ① 타설 후, 8일까지 : [콘크리트+양생매트 +P.E Film]
↓ P.E Film 제거
- ② 타설 후, 9일까지 : [콘크리트+양생매트]
↓ 양생매트 제거
- ③ 타설 후, 9일 : 매트기초 양생종료

VIII 결론

굳지않은 상태에서의 유동성 및 내구성을 고려한 실내시험결과를 종합해서 얻은 최적 배합은 물-결합재비 40.0%, 플라이애쉬 치환율 25%로 선정하였다.

고성능 AE감수제를 비롯한 모든 재료의 단위용적당 사용량 및 혼합사의 혼합비율은 현장의 시공여건(계절적 요인, 시공방법 등) 및 레미콘 공장의 생산여건(사용재료의 품질변화 등)에 따라 매회 상이할 수 있기 때문에 실제 타설하기에 앞서, 레미콘 공장(B/P)에서 이를 확인한 후, 적절한 배합조건을 평가하여 적용

해야 한다. 각종 양생조건에 따른 수화열 해석 결과, 표면부에 P.E.Film과 양생포를 이용하여 양생한다면 온도균열지수는 1.6을 나타내고 있어 매스콘크리트의 수화열에 의한 균열은 크게 저감할 수 있는 것으로 평가되었다.

한편, 콘크리트의 수화열에 의한 온도균열 제어는 수화열 해석의 결과는 단지, 해석 프로그램에 의해 제시된 것이기 때문에 현장여건에 따라 다소 상이할 수 있다. 따라서, 실제 콘크리트의 양생방안(양생재료 및 기간)은 시공된 매스콘크리트의 온도이력을 실제 계측·분석함으로써 그 결과를 바탕으로 조정하는 것이 바람직 할 것으로 여겨진다.

참고문헌

- 1) 이상수, 김주상, 임현웅, 송하영, 김을용., “매스콘크리트의 수화열해석을 통한 온도균열제어방안에 관한 연구”, 대한건축학회지회연합회 논문집 제8권2호(통권 26호), 2006.5, pp.93-100
- 2) 이상수, 원 철, 김동석, 박상준, “매스콘크리트의 배합설계 및 온도균열제어에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 봄학술발표 논문집 제13권1호, 2001.5, pp.533~538
- 3) 정철헌 등, “매스콘크리트의 온도분포에 영향을 주는 주요 변수에 관한 연구.” 콘크리트 학회지, 제 6권 5호, 1994, pp. 203~212
- 4) 매스콘크리트의 온도균열제어지침(안), 대우건설, DEG-006-95
- 5) ACI Committee 207, “Mass Concrete.” ACI Manual of Concrete Practice, 1987, 207.1R
- 6) ACI Committee 207, “Mass Concrete for Dams and Other Massive Structures”. Journal. of ACI, No.4, Vol.67, 1970.4, pp.273~309