

콘크리트 압축강도에 영향을 미치는 변수

邊 根 周

<延世大 土木工學科 教授>

요약문

본고는 1991년 5월에 발표된 미국 토목학회 토목재료 논문집(Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, Vol. 3, No. 2)의 “Review of Variables that Influence Measured Concrete Compressive Strength(저자 D. N. Richardson)”을 요약한 내용이다.

이 보고서는 원주형 콘크리트 공시체의 압축강도에 영향을 줄수 있는 여러가지 변수들을 정리하였다. 또한 강도 실험의 전 과정, 즉 시료채취, 성형, 초기양생, 운반, 실험실 양생, 캐핑, 실험등의 내용을 포함하고 있다. 대부분의 비표준 실험기술로서는 표준 실험에 의한 강도보다 낮게 측정되며, 어떤 경우에는 75% 정도까지 낮게 평가된다. 부적절한 성형기술로 현저한 강도손실을 초래하는 경우로는 불충분한 다짐작업, 적당치 않은 다짐 기술, 유연성있는 1회용 몰드 사용(특히 부주의하게 취급할 경우) 그리고 공시체 단부의 상태가 양호하지 않은 경우(비록 캐핑을 잘할지라도)등이 있다. 초기 양생조건에 따라서도 강도는 낮게 평가될수 있다. 낮거나 높은 온도, 불충분한 습도, 굳지 않은 콘크리트 교란등으로도 이러한 문제가 발생할수 있다. 실린더를 운반하는 동안에 거칠게 취급하는 것도 강도를 보다 낮게 할수 있다. 부적절한 캐핑재료와 캐핑기술을 적용하는 것은 가장 나쁜 일이며, 캐핑을 너무 두껍게 하거나 캐핑표면이 평면을 이루지 않는 것도 좋지 않은 영향을 미치게 된다. 하중 실험시 잘못된 기술로는 실험시에 시편의 습기가 부적절한 것, load frame에 시편이 잘못 놓인 것, 기계 영점조준이 잘못된 것등이 있다. 기계특성에 대한 내용도 포함하고 있으며 시편파괴의 거동과 보고기술등도 언급되어 있다.

1. 서 론

콘크리트 생산업체에서는 기 타설되거나 현장타설된 콘크리트의 합격여부를 결정하는데 주로 콘크리트 압축강도 실험결과에 의존하고 있다. 물론 중대한 결정은 콘크리트 강도다. 그러므로 정확한 결과를 얻는 것은 대단히 중요하다. 이러한 콘크리트 압축강도 시험은 여러가지 목적으로 수행된다.

첫째, 물리적인 법칙이나 특성을 규명하고자 할때,

둘째, 형틀을 해체하거나, 앞으로 공정을 진전시킬 것을 결정할때, 건설중에 현장타설 콘크리트 강도의 평가가 요구될때,

셋째, 배합비가 적당한지를 입증할 필요가 있을때,

넷째, 품질관리를 위해 필요할때, 압축강도 시험을 수행하게 된다. 품질관리중의 문제는 콘크리트를 사용할수 있는지를 결정하는데 있다. 따라서 여기서는 마지막항인 네번째항에 초점을 맞추었고, 이것이야말로 레미콘 관계자에게 도움이 되리라 사료된다.

현재 경화된 콘크리트의 품질평가는 직경 150mm, 길이 300mm의 원주형 공시체의 압축강도를 기준으로하여 평가한다. 이러한 형태의 시험을 선택한 이유중의 하나는 시험방법이 간단하다는데 있다. 그러나, 이런 시험의 단순성은 측정결과가 표준화된 통일된 과정을 엄격히 준수하느냐에 따라 결과가 크게 변하므로 때로는 잘못된 결과를 초래하기도 한다. 이러한 과정을 준수하지 않을 경우 부정확한 결과를 초래할수 있다는 뜻이다. 강도의 크기와 변동을 가지고 배치콘크리트를 수용할수 있는지를 결정하는 것이 중요하다. 종종 강도 측정결과를 실험실수를 내포한다.

대부분의 실험실수는 낮은 강도결과를 나타낸다는데 문제가 있다. 실수로 콘크리트의 강

도를 낮게 측정하면 다음과 같은 결과를 초래할수도 있다.

(1) 불필요한 공사지연

(2) 비용이 많이드는 후속시험

(3) 비경제적인 과다 설계

(4) 좋은 품질의 콘크리트를 폐기할 가능성
여기서는 150×300mm의 원주형 콘크리트 시편의 표준 압축강도에 각 실험요인이 미치는 상대적인 영향을 고찰하기 위한 것으로서 시료채취부터 결과보고까지 모든 시험과정을 망라하고 있다. 5%이하의 오차는 통계적으로 별로 중요하지 않다고 할수 있다.

2. 시료 채취

만일 측정된 강도의 값이 배치콘크리트의 강도를 대표한다고 가정하면 시료 그 자체는 배치를 대표한다고 볼수 있다. 비록 간단한 개념이지만 때로는 시료로 배치를 대표할수 없을 때도 있다. ASTM C172에서는 시료는 트럭 중간부의 최소한 2군데로 부터 채취해야 한다고 규정하고 있다. 트럭으로 부터 나오는 첫번째 부분을 취하지 말고 Waiting forms로 나머지를 보내야 한다. 샘플을 재 혼합하는 것은 샘플의 균일성을 유지하기 위하여 필요하고, 이것은 운반수레로 하면 대단히 좋다. 땅바닥에서 배합할때는 오염되지 않도록 주의해야한다.

시료채취와 성형간의 최대 시간차도 규정되어 있다. 여러 지방서를 보면 7, 14, 28일 또는 7일과 28일에 측정할 공시체의 수를 다르게 규정하고 있다. 마지막으로 중요한 것은 한세트의 공시체를 만드는데 사용되는 콘크리트는 동일한 트럭에서 채취한 것이라야 한다. 다른 트럭에서 채취한 콘크리트로 공시체를 만들었을 경우, 14일 강도가 7일 강도보다 낮게 측정되는 경우도 일어날수 있다.

3. 성 형

3. 1 압 밀

성형에 있어 주요목적은 표준다짐작업과 균일한 시편을 만드는데 있다. 가장 나쁜 경우는 아무런 다짐도 하지 않은 상태로 트럭 슈트에서 직접 원주형 몰드로 콘크리트를 채우는 것이다. 다짐을 잘 하기 위해서는 다짐방법이 다져질 재료에 적합해야 한다. ASTM C31에서는 슬럼프치가 76mm이상일때는 막대다짐을, 25mm보다 낮을 경우에는 바이브레이션을 사용하도록 규정하고 있고, 25~76mm사이일 때는 막대다짐이나 진동다짐의 어느 경우도 좋다.

적절한 다짐층, 다짐작업, 막대형태, 몰드형태도 중요하다. 충분히 다지지 않았을 경우에는 61% 정도의 강도손실을 초래한다. 15%만큼 공극을 갖고있는 공시체에 있어서 1% 공극당 5%의 강도가 손실됨을 우리는 알수있다. 끝이 납작한 막대기를 사용하면 실린더 바닥으로 자갈을 밀어 버리거나 위쪽으로 올리게 된다. 레버를 다짐봉으로 사용할 경우 2%의 강도손실이 발생됨을 연구결과로부터 알 수 있다. 또한 재료분리가 일어나지 않도록 주의해야 한다. 슬럼프가 50mm이하인 콘크리트로 공시체를 만들 경우, 공극을 제거하기 위해 몰드측면을 가볍게 두드리면 매우 효과적이다. 그러나 ASTM시방서에서는 두드리는 정도는 개인의 주관적인 판단에 맡기고 있다. 비록 슬럼프치가 적당할지라도 몰드측면을 과도하게 두드리면 강도손실을 초래할수 있다. 한 연구결과에서는(Richardson, 1989) 두드리지 않은 시편이 두드린 시편보다 6%정도 강도가 높은 것으로 나타났다. 과도하게 두드리면 국부적으로 재료분리가 발생하거나 약한 층이 생길수 있다. 평평하거나 길다란 자갈이 많이 섞인 배합물을 막대기로 다짐했을때 자

갈을 수직으로 서게 하며, 이로 인해 40%까지 강도가 감소할수 있다. 이러한 경우에는 진동다짐이 보다 효과적이다.

3. 2 몰드의 재질

몰드 재질의 형태는 강성, 물의흡수, 팽창등에 중요하다. 보다 강성이 큰 몰드는 다짐을 하는 동안 지지조건이 좋기 때문에 덜 유동적이어서 보다 다짐이 좋은 시편을 만들수 있다. 1964년 Cusens의 연구에 의하면 저판은 두꺼운 철판으로 하고, 위틀은 보드지로 만든 몰드를 사용하면, 강성이 큰 벽면몰드를 사용할때 보다 더 치밀하고 강한 시편을 만들수 있다고 한다. 강제몰드는 가장 단단하지만 일상적인 시험에 사용할때 다루기가 귀찮고 비용이 많이 든다. 또한 접합부위에서 물이 새기도 한다. ASTM에서는 몰드가 물이 새지 않아야 한다고 규정하고 있으며 이러한 규정은 시간영향의 중요성을 무시하는 것 같다. 밀봉된 강제 몰드를 사용하면 보다 많은 물을 보관할수 있는 반면에 보다 약하고 밀도가 낮은 콘크리트(7%손실)를 만들게 된다. 물이 새는 몰드를 사용하게 되면 표준공시체로 사용할수 없다.

고강도 콘크리트 시험에서는 강성이 큰 몰드를 사용하는 것이 매우 중요하다고 Holland는 밝히고 있다. 보편적인 플라스틱 몰드를 사용하면 14% 정도의 강도손실을 초래할수 있다. 한정된 실험결과에 따르면 플라스틱몰드를 20회 재사용했을 경우, 몰드의 유연성이 증가하고, 바닥이 찌그러져서 22%까지 강도손실을 초래할수 있다. 플라스틱몰드에서 생기는 이런 현상은 몰드의 질이 떨어지기 때문만이 아니라, 압축된 공기를 갖고있는 몰드를 제거할때 공시체 바닥면이 Chipping되어 캐핑이 균일하게 되지 않게 하므로 보드몰드를 사용하면 각각 손실이 다소 크게 나타날수 있지만 평균적으로 3~21%의 강도 손실이 있다. 그러나 파라핀을 입힌 판지몰드를 사용하

여도 흡수는 별로 문제시 되지 않는다. 흡수성이 있는 몰드를 사용하면 초기 콘크리트 (green concrete)의 늘음과 응력이 생기게 된다. 물은 측면이나 밑면을 통해 흡수된다. 보드는 플라스틱몰드통에 있는 응축된 물을 몰드위쪽 가장자리에서 흡수한 후, 이 때문에 몰드는 팽창될수 있다. 날씨가 더울때, 몰드표면에 있는 파라핀은 몰드바닥으로 흘러내려 몰드표면이 더욱 흡수성이 있게 된다. 원주형 몰드의 흡수성과 다른 특성은 ASTM C470에 규정되어 있다. 세가지의 몰드재료는 모두 몰드단면을 원형으로 유지하지 못하므로 문제가 있다. 강제로 만들어진 몰드조차도 측벽이 약간 얇아지는 경우가 있다. 플라스틱이나 보드몰드에서는 상부자유단쪽에서 원형보다는 계란형을 갖는 경향이 있다. 습도손실을 방지하기 위해 공급되는 플라스틱덮개는 단면의 구형유지에도 도움을 준다. 단부가 계란모양으로 일그러지면 10%의 강도손실이 있는 것으로 나타났다.

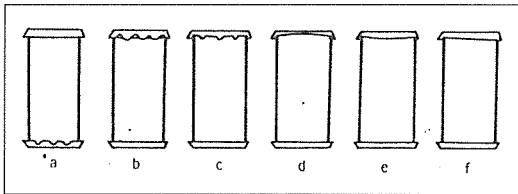


그림 1 콘크리트의 각종단부조건

(a) 밑면이 거친 경우 (b) 캐핑밀에 기포가 있고 윗면이 거친 경우 (c) 기포가 없고 윗면이 거친 경우 (d) 윗면이 불록한 경우 (e) 윗면이 오목한 경우 (f) 단면이 경사진 경우

3. 3 공시체의 단부조건

공시체 단부의 마무리 상태는 중요하다. 단부를 캐핑할 것이므로 시편 상부 표면을 평평하게 하지 않아도 된다고 생각하는 것은 큰 잘못이다. 과도하게 막대짐을 하면 보드몰드의 얇은 밑면철관에 손상부가 생겨 움푹 들어간 자국이 발생하게 된다. 단면이 거칠면 캐

핑하는데 문제가 있으며, 유황캐핑 밑에 공극이 생겨 12% 정도까지 강도가 감소된다. 공극이 없을지라도 콘크리트와 캐핑재료사이의 거친표면으로 인해 실험하는 동안 공시체 윗면에 표준 강도 분포가 나타나지 않게 된다. 현재까지, 이것으로 인해 강도가 증가할 것인지 감소할 것인지, 혹은 아무런 영향을 미치지 않을 것인지에 대하여 아무런 확신을 갖고 있지 않다. 조사보고서에 의하면 어떤 상황에서 콘크리트 강도수준과 캐핑재료에 따라, 이러한 일이 일어날 가능성이 있음을 알수 있다. 27%의 강도가 손실된 경우도 있고 4% 정도 감소된 경우도 있었다. 비록 적절하게 캐핑하였다 할지라도 캐핑밑에 있는 시편이 위로 불록한 경우 10% 정도 강도가 감소하며 오목한 경우에는 12% 정도 강도가 줄어든다. 성형할때, 시편단부는 수평하고 표면이 매끄럽도록 유지해야 한다. 만일 시편을 어떤 장소로 운반해야 할 경우, 운반도중에 공시체 바닥을 반드시 받쳐 주어야 한다. 수평이 아닌 장소에 공시체를 놓게되면 공시체 상단면이 경사지게 되어 캐핑시에 어려움이 따르게 된다. 비록 캐핑을 평평하게 했을지라도 다른 데보다 더 두껍게 캐핑된 부분이 있을수 있으며 실험을 할때 비표준 응력분포가 나타날수 있다. 이 경우, 5% 정도 강도손실이 있는 것으로 밝혀졌다. 공시체 상단부를 잘라내면 상당히 좋지만 비용이 많이 든다. ASTM C617에서는 캐핑두께가 약 3mm 정도, 그리고 캐핑한 어떤 부분의 두께도 8mm를 넘지 않도록 규정하고 있다.

그림 1은 서로 상이한 단부조건을 나타낸 그림이다.

3. 4 공시체의 균질성

충분한 막대다짐을 하지 않거나 각 층별 부착이 좋지 않을 경우, 공시체는 특이하게 파괴된다. 이러한 경우 측정 결과는 부정확하게 된다.

4. 초기 양생

시방서상의 다른 문제점은 작업장에서의 비 표준 양생조건이다. ASTM C31에서는 초기 현장 양생시 습기의 손실을 방지한 상태에서 15.6~26.7°C의 온도를 유지할수 있도록 규정하고 있다. 온도와 습도가 적당치 않으면 강도 측정치가 정확하지 않다.

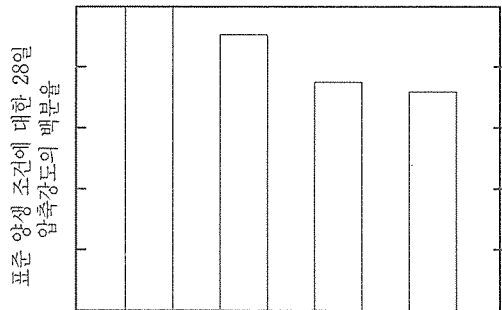
4. 1 온 도

하루동안 표준 양생온도보다 낮은 곳에서 양생을 했을때에는 28일 강도가 낮아지지 않지만 3~7일 동안 낮은 온도에서 양생을 하면 약 7%정도 강도가 떨어진다. 콘크리트가 동결되면 심각한 결과를 초래하게 된다. 표준 양생전 하루동안 콘크리트를 동결시키면 28일 강도가 56%정도 낮아질수 있다. 온도와 동결기간은 강도손실에 미치는 영향이 적다. 그러나 동결이 시작되기 전에 콘크리트를 좋은 환경에 놓아두는 시간이 길면 길수록 강도 손실은 적어진다. 어떤 경우에는 동결된 콘크리트일지라도 온도가 낮은 곳에서 양생했을 경우에 극한강도(28일 강도일지라도)가 높을 수도 있다. 문제는 동결기간이후에 주어지는 양생조건이 얼마나 좋은지에 더 많은 영향을 받게된다. 표준 양생온도보다 높은 경우에는 초기강도가 증가하지만 차후 강도(28일 강도 포함)는 떨어진다. 연구결과에 의하면 현장에서 하루동안 양생하게 되면 10~12%의 손실이 있으며 3일동안 있으면 22%손실, 일주일이면 26%까지 강도가 낮아지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 그림 2에 표시되어 있다. 마포로 공시체를 덮으면 열이 보존되어 강도가 낮아지게 될수도 있다고 한다. 오히려 더운 날씨에 온도를 낮추기 위해 마포를 물로 적당히 적셔 주어야 한다.

4. 2 습 도

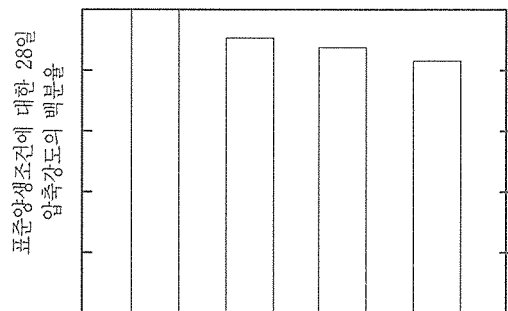
초기 양생기간 동안 습도가 불충분하면 측정강도가 낮게 나타난다. 한 연구보고에 의하면 온도가 적당할지라도 공기양생을 할 경우 1일이면 8%, 3일이면 11%, 7일이면 18%까지 강도가 낮아진다고 밝히고 있다(그림3).

공시체를 덮어 주면 습도를 적절히 유지할 수 있다. 양생상자를 사용하면 적절한 온도를 유지하는데 도움이 된다. 통상, 공시체는 24시간 내에 실험실로 옮겨져야 한다.



28일 1일 38°C양생 3일 38°C양생 7일 38°C양생 27일 표준양생 표준양생 25일 표준양생 21일 표준양생

그림 2 초기 양생온도가 높은 경우의 강도 변화



28일 1일공기양생 3일공기양생 7일공기양생 27일표준 표준양생 양생 25일표준양생 21일표준양생

그림 3 초기 상대습도가 낮은 경우의 강도 변화

4. 3 초기 양생기간 동안의 시편교란

시편을 현장에 오래 놓아 두면 들수록 교란의 기회는 점점 증가한다. 교란은 전체교란(gross disturbance)이나 진동의 형태를 나타낸다. 응결하는 도중이나 초기경화도중에 시편을 거칠게 취급하면 시편에 손상을 줄수 있다. 콘크리트를 타설한후, 그리고 초기 응결후 콘크리트에 진동을 가했을 경우에 대한 보고서가 많다. 어떤 자료에 의하면 콘크리트를 배합한 후 어떤 시간에 약간의 진동을 주게 되면 반드시 해로운 것만은 아니고, 때로는 유리할수도 있다고 알려져 있다. 그러나 최근의 연구에서는 사소한 문제가 있는 것으로 나타났다. 차량통행에 의해 진동이 발생될때 묶은 반죽의 콘크리트는 재료분리가 일어나 5% 정도의 강도손실을 가져올수 있으며, 된 반죽의 콘크리트는 압밀효과로 인해 4% 정도의 강도가 증가할수도 있다. 궁극적으로는 왜 이것이 위험한가의 문제이다. 조심해서 취급하면 시편에 어떤 교란도 주지 않는다.

5. 운 반

단순히 굳지 않은 시편을 주의하지 않고 취급한 이유때문에 강도가 낮아지는 경우가 시편을 만들고, 성형하고, 양생하고, 시험할때 발생할 것인가? Richardson(1989)은 픽업트럭 뒤에 실은 시편이 좌우전후로 흔들리거나 둔덕을 차가 넘을때 튀기 때문에 강도가 7% 정도 낮아진다고 밝히고 있다. 공시체를 허리 높이에서 떨어뜨릴 경우에는 최소한 5%까지 강도가 떨어질수 있다. 운반도중 공시체에 충격이 가해지지 않도록 완충물질로 충진시켜야 하며 항상 조심성있게 취급하여야 한다.

6. 실험실 양생

실험실로 공시체를 운반하는 즉시, 형틀을

제거한후 기록하고 실험시까지 적당한 장소에서 양생시켜야 한다. 적당한 양생환경이란 표준방법에 맞추어 항온항습실이나 석회가 포화된 물탱크안에서 $22.8^{\circ}\text{C}(\pm 3^{\circ})$ 를 유지할수 있는 곳 등을 말한다. 이 탱크는 수온이 여름에는 차갑게 할수 있고, 겨울에도 따뜻하게 할수 있는 곳에 두어야 한다. 더운 온도를 유지시키기 위해서는 탱크히터를 사용할수도 있다. 온도 기록계기를 이용하면 온도의 변동을 확인할수 있다. 탱크나 양생실안의 온도 진폭은 최소가 되도록 하여야 한다. 습윤양생의 목적은 시멘트 수화작용을 최소화하기 위한 것이다. 그러므로 적절하게 실험실 양생을 하려면, 공시체를 운반하는 당일에 탈형한 후, 양생을 시작하여야 한다.

7. 캐 핑

7. 1 단부조건

흙손으로 공시체 단부를 아무리 잘 다듬더라도 약간 불규칙한 면이 있을 수 있다. 또한 몰드 밑바닥도 완전히 편평하지는 않다. 실험 전과정중 가장 심각한 결과를 초래하는 실수는 단부를 표준화시키지 않았을 경우에 생긴다. 표준 단부표면을 만들지 못하게 하는 방법에는 여러 원인이 있으며, 원인이 분명치 않은 것들도 있다. 물론, 캐핑이나 표면연마를 잘못했을 때는 공시체를 사용할수 없으며, 캐핑된 공시체일지라도 시방서 규정이 맞지 않는 경우도 있을수 있다. ASTM C617에는 4가지 기본적인 시방규정이 있다.

- (1) 캐핑된 단부는 15cm지름일때 0.05mm 이내로 편평해야 한다.
- (2) 단부표면은 시편중심축과 거의 직각이어야 한다.
- (3) 양 단부면은 서로 거의 평행해야 한다.
- (4) 캐핑은 너무 두꺼워서 안된다.

기본적인 개념은 응력의 집중, 휨, 공시체내의 비표준적인 응력분포등을 방지하기 위한 것이다. 단면이 약간 불룩하면 75%정도까지 강도손실이 발생할수 있으며 단면이 오목하면 30%정도까지 강도손실이 있을수 있다. 정6면체 콘크리트 시편에 대해서도 비슷한 결과가 나타난다고 알려져있다. 강도손실을 초래하는 또 다른 경우를 살펴보면 공시체 단면이 시편중심축과 수직이 아닐 경우 약8%의 강도손실, 양 단면이 서로 평행하지 않을 경우 약4%의 강도손실, 캐핑을 약간 깎아낸 경우 약4%의 강도손실, 캐핑이 두꺼운 경우 약6%의 강도손실이 있을수 있다.

수평 캐핑장치는 캐핑이 두껍게 되어 약 6% 정도의 강도손실을 초래하는 것으로 밝혀졌다. 항상 그렇지는 않지만 시편 단면을 적절히 연마할 경우에는 3~6% 또는 그 이상의 강도 증가를 일으킨다. 비록 비용이 많이 들더라도 고강도 콘크리트 시편의 경우에는 연마를 할 필요가 있다. 왜냐하면 콘크리트 강도가 캐핑재료의 강도에 가깝거나 초과할수 있기 때문이다(캐핑재료는 콘크리트강도보다 커야 함). 유황으로 캐핑을 하면 시편 단면 마무리에 대한 강도가 증가한다고 주장하는 보고서가 있다. 그러나 그 결과가 실제 표면을 연마한 경우인지, 혹은 단지 썬우는 경우인지가 분명치 않다. 썬우는 방법은 단면을 갈아내는 방법보다 표면이 편평하지 못하다. 캐핑을 편평하게 하기 위하여 캐핑몰드 용기를 주기적으로 정밀하게 유지할 필요가 있다. 캐핑에 부주의하게 되면 공시체가 수직이 되지 않으며 캐핑이 경사지게 되는 결과를 초래한다.

7. 2 캐핑재료

요즘에는 여러가지 캐핑재료를 사용한다. 하지만 어떤 캐핑재료를 사용하든지 간에 공시체에 응력분포를 감소시켜 부정확한 강도가 측정되도록 하여서는 안된다. 유황 반죽과 같

이, 캐핑재료라 하면 과도하게 사용하거나 과열을 하여도 강도와 강성이 떨어지지 않아야 한다. 과거에 가소제(可塑劑)를 함유하고 있는 유황은 가소제를 함유하지 않은 것보다 이러한 문제를 일으키기가 더 쉬웠다. 캐핑재료의 정6면체시편의 강도시험은 주기적으로 수행되어야 한다. 일단 콘크리트 공시체를 캐핑하면 유황혼합물은 충분한 강도와 강성을 얻을수 있어야 한다. ASTM C617에서는 캐핑 후 최소 2시간 정도 대기해야 한다고 규정하고 있다. Richardson(1989)은 유황 혼합물로 캐핑한 후 15분뒤에 하중시험을 하게 되면 2%까지 강도가 감소될수 있다고 주장하였다. 양생된 캐핑의 재령에 따른 효과는 특정한 합성물의 구성에 따라 상이하다. 그림4에서 보는 바와 같이, 비교적 연질 캐핑재료를 사용하여 하중을 받을때 횡방향흐름이 생길수 있도록 하는 방법에서는 콘크리트 시편에 방사 응력(radial stress)을 유발시켜서 시편 단부에 측면구속이 낮아지게 된다. 이러한 경우는 연질 유황이나 석고로 캐핑하거나 단부가 금속제 링으로 적절히 구속되지 않은 탄성지지 고무받침이나 입상재료로 캐핑했을때 발생할수 있다. 어느정도까지는 캐핑의 강도가 크면 클수록, 측정된 콘크리트 강도값은 크게 된다. 회반죽이나 100%유황과 같은 강도가 낮은(2500psi) 캐핑재료는 저강도 콘크리트에 사용할수 있지만 ASTM C617에서는 일반적으로 회반죽과 같은 부드러운 재료의 사용을 금하고 있다. 이와 같은 재료를 사용할 경우 강도는 3~43%까지 감소할수 있다고 보고된 바 있다. 고강도 석고반죽(350kg/cm²)과 유황 반죽은 700kg/cm² 정도의 강도가 콘크리트 캐핑에 효과적이다. 왜냐하면 이러한 재료로 아주 얇게 캐핑할 경우 실제로 700kg/cm² 이상의 강도를 낼수 있기 때문이다. 강도와 탄성 계수의 조합이 잘못된 경우와 함께 보다 열악한 캐핑재료를 사용하게 되면 캐핑한 후 응력과 양생하는 동안에 평면을 유지하지

못하게 된다. 이런 문제는 온도나 습도에 의한 부피변화에 기인한다. 과도하게 열을 가한 유황 혼합물이나 과소 열처리한 유황 혼합물은 고무처럼되어 콘크리트 강도가 낮아지게 된다. 유황 혼합물에 오랫동안 열을 가하게 되면 강도와 강성이 떨어지게 된다. 제품에 표시되어 있는 온도를 초과하지 않는 한 캐핑 재료를 여러번 사용하더라도 혼합물의 거동에는 영향을 미치지 않는다. 일반적으로 온도가 높으면 유황 혼합물의 강도와 강성은 떨어지는 경향이 있다. 많은 연구를 통해 캐핑재료로서 뽑어붙이기 같이 치밀하지 못한 입상의 재료를 사용하려고 수차 시도해 보았지만 포기했다. 문헌조사에 따르면 구속을 갖지 않은 탄성고무막을 사용하면 53% 정도의 강도손실이 있고, 반면에 조금 큰 금속 구속링을 사용해도 강도는 낮아진다. 적당한 크기의 구속링을 갖춘 탄성고무막을 사용하면 가능성이 있을 수 있다. 그러나 새로운 탄성고무와 금속링을 함께 사용하는 방법(elas fomer-and-metal-ring Method)을 사용하여 측정하면 콘크리트 강도는 각종 강도수준과 재료로된 콘크리트 배합에 대하여 재래의 캐핑방법에 따른 결과와 상관관계를 맺어야 한다. 고강도 콘크리트에 대하여는 실험데이터가 탄성고무캐핑과 어떤 관계를 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 캐핑재료의 압축강도는 캐핑두께가 감소함에 따라 증가한다. 이는 캐핑재료의 강도에 대한 콘크리트 강도의 비가 증가함에 따라 더 중요하다. 고강도 콘크리트를 시험하는 경우나 또는 저강도 캐핑 재료를 사용할때 그 비가 크게 나타날 수 있다. 또한 유황으로 두껍게 캐핑하면, 불균등하게 수축되며 표면이 편평하지 않게 된다고 알려졌다. ASTM C39에는 공시체를 파괴하는 방법과 실험 장치에 대해 규정되어 있다. 실험하기 전에 단면적으로 계산하기 위하여 시편 중간 높이에서 시편 직경을 측정해야 한다.

7. 3 습도조건과 온도

공시체는 캐핑한 후 건조되지 않도록 해야 한다. 비록 모든 연구에서 사실로 밝혀지지는 않았지만 건조된 시편을 젖은 것보다 2~30% 정도 강도가 높아진다. 이것도 드물기는 하지만 실수로 강도가 높게 나오게 하는 비표준화된 방법중의 하나다. 형습실을 갖춘 실험실에서는 유황으로 캐핑된 공시체를 그 공간에 놓아둘 수 있다. 탱크에서 양생된 공시체는 시험을 할때까지 젖은 담요등으로 덮어 놓아야 한다. 실험온도는 실험을 기다리는 동안 공시체 온도가 급격히 변하지 않는 한 별로 중요하지 않다. 건조시킴에 따라 강도가 증가하는 이유에 대하여는 여러가지 이론이 있다. 최근의 연구결과에 따르면 습도 인자는 중요하며 표면이 건조되면 건조수축과 횡방향 2축 압축력을 일으켜 표준강도보다 높게 측정되는 결과를 초래한다.

7. 4 재하속도(Loading Rate)

시편은 규정된 재하속도로 시험하여야 한다. 재하속도가 빠를수록 압축강도는 증가하는데, 압축강도와 재하속도와 관계는 대략적으로 대수(logarithm)관계를 나타낸다. 그러나 그 영향은 실험시 통상 적용하는 속도 범위내에서는 작게 나타난다. 2.5kg/cm²/sec의 속도와 비교하여 볼 때 0.5kg/cm²/sec에서 150mm 6면체 공시체의 강도는 -2%까지 변화하며, 5kg/cm²/sec에서는 +2%까지 변화함을 알 수 있다.

ASTM의 최대 허용 속도 범위내에서 변화시키면서 원주형 공시체를 시험하면, 측정강도의 1% 정도까지 변화가 발생한다. 모든 실험실은 ASTM C39에 따라 사용할 속도를 정해야 하며 감속하기 쉽게 그 속도를 일정하게 해야 한다.

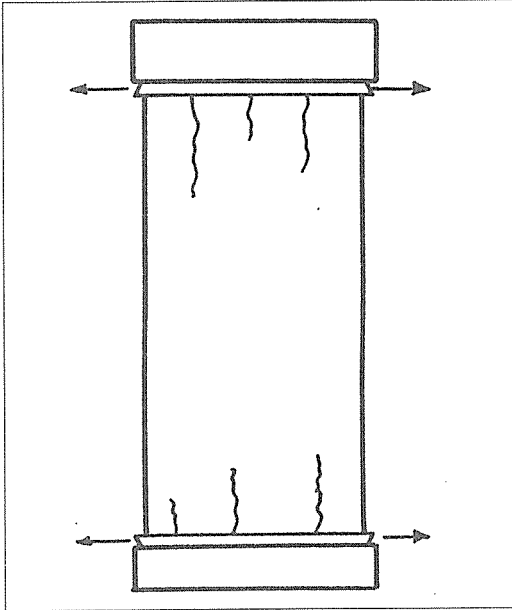


그림 4 방사응력(Radial stress)을 일으키는 연질 캐핑 재료의 횡방향 흐름

7. 5 공시체의 거치

하중 재하시 편심이 발생하지 않도록 시편을 놓아야 한다. 편심재하를 하면 12% 정도까지 측정강도가 감소한다. 기계의 머리부위와 시편단부사이가 팽팽하도록 받침(bearing block)중의 하나는 등글게 되어야 한다. 만일 시편의 한 단부가 약간 경사져 있다면 경사진 면을 등글게 놓인 재하판에 가까이 놓아야 한다. 그러나 등근부분의 중앙이 평편한 지압면 중앙과 정확히 일치하지 않는다면, 그리고 시편의 양 단부가 완전히 평행하지 않다면, 바닥판이 이러한 평행하지 않은 면에 맞춰지도록 회전될때 재하중심이 시편축에 있지 않게 되며 편심이 발생된다. 접촉할때 가로흔들이 작용력이 작용하며 시편이 움직이거나 휨모멘트가 작용하게 된다.

7. 6 가력재하판(Loadng Plates)

강재 재하판의 강성도는 실험공시체내의 응

력분포에 영향을 줄수 있다. 재하시 구부러지는 재하판(그림 5)은 콘크리트 시편 중앙에 높은 응력이 발생하는 경향이 있으며 시편에 불룩한 단면을 갖도록 한다. 상대적으로 얇은 재하판을 사용하거나 시편보다 작은 재하판을 사용할때 구부러지는 현상이 발생한다.

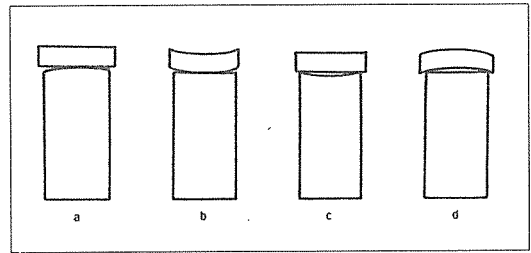


그림 5 시험중의 비평면 단부 조건

- (a) 불룩한 공시체 단면 (b) 오목한 재하판
- (c) 오목한 공시체 단면 (d) 오목한 재하판

이는 측정강도에 영향을 미친다. 재하판의 기하형상도 이러한 것과 관련이 있다. 한 연구보고에 의하면 재하판과 공시체의 직경이 잘못 조합되면 실험공시체내에 큰 응력경사를 일으키는 경우가 있다. ASTM C39에는 재하판의 기하형상과 강성도를 등근 받침블록의 반경, 최소두께, 최소 및 최대폭등의 향으로 규정하고 있다. 구체의 반경은 중요하다. 반경이 작으면 재하시 충분히 구속하지 못하며, 반경이 크면 처음에 시편을 잘 정렬하기 힘들다. 또 다른 문제는 처음 접촉이 이루어지는 동안 구체좌대블록의 암수부분이 잘못 정렬되었을때 발생된다. 그림6은 적용가능한 구체의 기하형상을 표시한 것이다. 재하판은 시편을 깔은 후 반드시 닦아 주어야 한다. 시편캐핑은 너무 기름칠을 하지 말아야 한다. 단면이 너무 미끄러우면 2%까지 강도를 감소시킬수 있지만 캐핑하는 동안 몰드를 해체하기 쉽게 하기위해 얇은 오일로 막을 형성하는 것은 해롭지 않다고 밝혀져 있다.

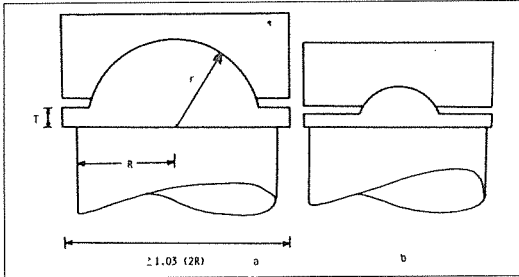


그림 6 구형 좌대블록 (a) 중요한 치수
(b) 작은 반경구형, 얇은 재하판

7. 7 공시체 거동

실제 거동은 극단과 극단조건 사이의 중간 형태를 취하겠지만 하중을 재하하는 동안 시편은 기본적으로 3가지 형태로 거동하게 된다. 이들 거동형태는 시편과 재하판간의 거동과 관련되어 있다. 즉 양단이 핀으로 연결된 경우, 양단 고정인 경우, 한쪽 끝은 핀이고 다른 끝은 고정된 경우(그림 7)등이다. 처음에는 경사진 단부조건에 부합되도록 상부구체 재하판을 조정해야 한다.

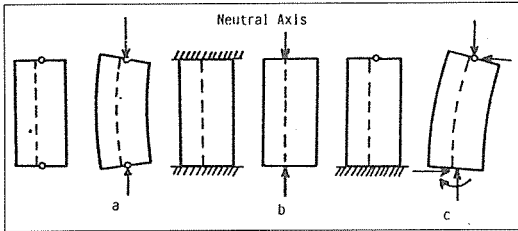


그림 7 공시체 거동 (a) 양단 핀 거동 (b) 양단 고정단 거동 (c) 일단 고정-타단 핀거동인 경우

그러나 일단 충분한 하중이 작용되면 공시체의 기울어짐은 휨을 일으키고, 불균일한 변형율을 발생하여 결국은 측정강도의 손실을 가져온다. 이러한 상황은 잘못 정렬된 시편, 불균일한 단면적을 가진 시편, 시험기 후레임의 잘못된 정렬, 또는 시험기 기둥의 강성도 차이등으로 부터도 발생할수 있다. 여기서 등

글게 놓여진 재하판의 거동은 중요하다. 단부가 고정된 상황일 경우에는 재하하는 동안 아무런 기울어짐이 없고 그로 인해 동일한 변형이 발생함으로 훨씬 더 민감하다. 가벼운 기계는 많은 회전을 일으키는 경향이 있으며, 이로 인해 강도손실을 초래하게 된다.

7. 8 공시체 받침판 거동(Seating behavior)

구형 재하받침판의 거동은 기울기 종류와 측정강도에 영향을 준다. 받침판 거동은 윤활유의 종류, 구체와 받침판의 접촉면적, 접촉형태, 구체와 받침판간의 접촉표면마감, 재하판의 기하형상에 따른다. 마감처리가 미끄럽고, 윤활작용이 매우 좋으며 접촉면적이 크면 양단 핀 거동을 하게 된다.

7. 9 기계의 검정

연구결과에 의하면 어떤 주어진 시간에 사용중에 있는 실험기기의 상당수가 검정에 불합격하게 되면 19% 정도의 강도 편차가 발생된다고 한다. 이들 연구에서는 많은 기계가 작은 하중에서보다 큰 하중에서 더 부정확한 결과를 나타낸다고 밝혔다. 6개월 미만의 짧은 기간에도 정밀도가 변할수 있다. 그리고 어떤 기계의 밀도는 램(ram)의 영향을 받는데, 즉 램이 확장될수록 측정된 하중은 더 부정확하게 된다. 만일 기계의 오일 순환이 느리게 되면, 계속되는 실험을 위해서 기계운전원이 매번 cross head를 조정해야 한다. 그리하여 실험하는 동안 램은 점차적으로 확장된다. 기계를 적절히 검정하는 것은 대단히 중요하다. 검정하는 동안 재하판에 손상이 가지 않도록 주의하여야 한다. 재하판은 검정용 하중 재하시에는 보호되지 않으므로 수평을 유지하지 못할수도 있다. 전술한 바와 같이 공시체와 재하판간에 평면을 이루지 못하면 극단적인 결과를 초래한다(그림 5). 손상된 재하판 표면을 미리 기계적 손질을 해 두는 것이 필요하다.

7. 10 시험기 후레임의 강성도

기계 후레임의 강성은 특히 고강도 콘크리트에서 중요할수 있다. 후레임의 종방향 가성이 부족할수록 재하하는 동안 늘음이 증가한다. 그러므로, 더 많은 탄성에너지를 저장하게 된다. 공시체 파괴가 임박했을때 기계가 유연하게 되면 이와 같이 저장된 후레임 에너지를 공시체에 쉽게 전달시킬수 있게 된다. 그러므로 기계의 강성이 부족하면 공시체의 급격한 변형을 초래하게 되고 따라서 파괴는 더욱 폭발적이 된다. 측정된 하중이 낮으나 높으나에 대한 의견은 분분하다. 그럼에도 불구하고 폭발적 파괴는 기계에 무리를 주며 검정이 매우 곤란하게 된다.

7. 11 파괴 후의 검사 (Postfailure Inspection)

파괴를 육안으로 식별하여도 많은 사실을 밝힐수 있다. 압축을 받아 파괴된 보통 공시체에서 보면, 공시체가 파괴되기 직전의 순간에는 공시체의 측면이 배가 나와 마치 barrel (포도주 저장용 목재통)과 같은 형상을 하게 된다. 전단파괴는 재하하는 동안 재하관중의 하나가 회전하였거나 또는 캐핑이 수평을 유지하지 못했을때 발생한다. 전술한 바와 같이 한 층의 표면을 형성하면서 파괴가 일어나는 것은 다짐이 잘 안 됐을 경우에 주로 발생하며, 이런 파괴는 전번 층에 부착시킨 공시체의 한 층이 파괴 됨으로써 대개 발생한다. 시편의 단부구속과 시편의 변동때문에 정확한 파괴 형태를 모든 실험에 대해 예측하기는 매우 어렵다. 보통 강도에서는 파괴성상이 원추형으로 되지만 고강도 콘크리트에서는 종방향의 파괴형태를 이룬다. 예상강도에 미치지 못하는 원주형 공시체는 내부를 관측한 후 완전히 파괴될때까지 하중을 재하해야 한다. 굵은 골재의 부착력 결핍, 재료분리, 다공성의 연결 시멘트 결합재, 많은 공기량, 경도가 낮은 굵

은골재가 사용되었는가를 내부검사해야 한다. 캐핑과 공시체사이에 틈이 있는지, 캐핑 두께가 너무 두꺼운가도 검사해야 한다.

8. 보 고

실험결과 강도가 낮게 나왔을 경우에는 이상황을 경감시킬 수 있는 조치를 취할수 있도록 문제의 본질을 환기시켜야 한다. 무엇때문에 시험이 잘못되었는지를 결정하는 과제는 실험보고서를 검토하면 쉽게 해결할 수 있다. 잘 설계된 보고양식은 풍부한 정보를 제공하지만 그 효용성은 영향 받은 부분이 얼마나 진지하게 보고양식의 빈 공간에 채워지는가에 달려있다. 보고서를 잘 작성하기만 하면 의심스러운 공시체에 대하여 배치 플랜트까지도 그 전과정을 추적할 수 있다. 보고서를 보고 다른 사항들을 결정할 수 있어야 한다.

- 배치 무게
- 배치로 부터 현장운반까지의 시간간격
- 타설 위치
- 공시체를 준비하는 동안의 기상조건
- 콘크리트의 슬럼프치, 공기함유량, 온도
- 공시체의 제조 및 성형자
- 공시체 운반자
- 공시체 시험자
- 성형으로부터 실험실로 운반하기까지의 시간 간격
- 캐핑, 공시체 및 다루기 부주의등에 관한 특기사항 주석
- 파괴 형태
- 압축 강도의 변동
- 7일, 14일, 28일강도
- 시편 무게(꼭 필요한 것은 아님)

배치로부터 현장운반까지의 긴 시간간격, 과도한 현장양생기간, 더운 날씨, 추운 날씨, 거칠게 다루는 것, 거칠거나 경사진 공시체 단면, 벌집모양을 한 공시체, 단면이 둥글지 않은 공시체, 탈형이 곤란한 보드몰드, 동결된

공시체, 한 배치내에서 현저히 무게가 다른 시편들, 원추형으로 파괴되지 않은 파괴형태, 7, 14, 28일강도의 추세가 일정치 않은 경우, 28일강도에 대한 7일강도의 비가 기지의 배합에 대한 보통 추세를 따르지 않는 경우, 과다한 공기량, 예기치 못한 높은 슬럼프치, 슬럼프나 공기량의 무변동, 과대 실험 변동계수 등에 대하여 관심을 가져야 한다. 만일 전체 실험과정이 적어도 “잘 되었다”라고 생각되어 진다면, 강도 감소는 5%이내로 될 것이다. 위의 모든 사항으로부터 강도가 낮게 나온 결과를 설명하기 위해 거짓 보고서가 아닌 그럴 듯한 보고서를 작성할 수 있다. 콘크리트가 실제로 주된 문제의 원인이라고 하는 표현의 예로 들면 다음과 같다 ;

높은 공기량, 높은 콘크리트 온도를 지닌 채 운송하는 시간이 길 경우, 슬럼프치가 낮다는 보고에서조차 나중에 첨가한 가수량을 포함시

키지 않은 경우, 미리 알고 있는 배합의 슬럼프치와 공기량이 일치하지 않는 경우등.

가능한 모든 문제들의 대부분은 주로 교육을 통해 피할 수 있다.

9. 결 언

이처럼 간단한 실험에서도 콘크리트에 문제를 일으킬 수 있는 방법이 수없이 많으며, 이들 대부분은 또한 콘크리트의 강도를 떨어뜨린다는 사실을 알수 있었다. 표 1은 이들 영향 인자별 강도손실량을 정량적으로 나타낸 표이다. 결과를 정확하고 그 결과가 대표값이 되기 위하여는 KS의 시험과정을 따를 것을 제안한다. 만일 이러한 모든 과정을 잘 준수한다면 콘크리트 공시체의 강도시험결과로부터 강도가 낮아져서 생기는 문제는 상당히 감소될 수 있을 것으로 판단된다.

TABLE 1. Measured Strength Reduction by Nonstandard Condtlons

영향 인자 (1)	강도손실 (2)	실험실(L) 야외(F)
Convex ends	up to 75	L
Insufficient consolidation	up to 61	F
Immediate freezing for 24 hours	up to 56	F
Rubber cap, no restraint	up to 53	L
Weak, soft capping compound	up to 43	L
Flat particle vertical orientation	up to 40	F
Concave ends	up to 30	L
Rough end before capping	up to 27	F
Seven days in field, warm temperature	up to 26	F
Reuse of plastic molds	up to 22	L
Cardboard mold	up to 21	F
Seven days in field at 73°F, no added moisture	up to 18	F
Plastic mold	up to 14	F
Rough end, air gaps under cap	up to 12	F
Convex end, capped	up to 12	F
Eccentric loading	up to 12	L
Out-of-round diameter	up to 10	F
Ends not perpendicular to axis	up to 8	F
Rough handling	up to 7	F
Three days at 37°F, mixed at 73°F	up to 7	F
One day at 37°F, mixed at 46°F	up to 7	F
Excessive tapping	up to 6	F
Thick cap	up to 6	L
Sloped end, leveled by cap	up to 5	F
Wet mix subjected to vibrations	up to 5	F
Chipped cap	up to 4	L
Rebar rodding	up to 2	F
Insufficient cap cure	up to 2	L
Slick end cap	up to 2	L
Slow loading rate	up to 2	L