

高強度콘크리트의 施工特性和 利用

오 병 환* 정 범 석**

* 서울대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 서울대학교 대학원 박사과정

〈머리말〉

다음의 기술기사는 1990년 12월 10일 미국 콘크리트학회(ACI)회장단이 내한하여 발표한 학술세미나 주제중에서 고강도 콘크리트 분야에 관한 내용 3편중 첫번째로 요약한 것입니다. 이때 실제 발표는 현재 ACI 회장인신 John M. Hanson 박사께서 하였습니다.

1. 고강도 콘크리트의 이용현황

콘크리트 구성재료의 품질향상과 기술혁신은 압축강도 700kg/cm²이상의 콘크리트 생산을 가능하게 하였으며, 더우기 일반 콘크리트 보다 향상된 내구성과 부식과 마모에 대한 저항성을 증가시킬 수 있었다. 공학자들은 이러한 잇점을 이용하여 고강도 콘크리트의 활용범위를 점차 확대시키고 있다. 반면 고강도 콘크리트의 사용을 위해서는 설계, 시방규정, 품질관리 및 시험방법에 세심한 주의와 책임이 뒤따르게 되며, 설계자와 시공자 간의 상호협조와 정보교환이 반드시 필요함을 주지해야 한다.

고강도 콘크리트는 주로 고층건물에서 압축을 받는 부재에 많이 쓰여지고 있는데, 이는 일반 콘크리트를 사용할 경우 건물 저층 부분의 기둥은 주어진 하중을 지탱하기 위하여 상대적으로 거대한 단면을 갖게 되므로 경제적인 건축물이 될 수 없기 때문이다. 1975년 당시 가장 큰 압축강도를 갖는 콘크리트를 사용한

건축물은 시카고의 Water Tower Place로서 건물높이가 260m이며 630kg/cm²의 고강도 콘크리트를 사용하였다. 이후 현재까지 시카고 지역에서 고강도 콘크리트를 사용한 건축물 중에서 가장 큰 압축강도를 갖는 구조물은 311 South Wacker Drive로 284m의 높이와 840kg/cm²의 압축강도를 가진다.

고강도 콘크리트의 활용은 교량과 같은 토목 구조물에도 적용되어 왔으며 이들은 주로 장기간의 교량에서 상기의 잇점과 더불어 자중을 줄일 목적으로 사용되고 있다. 교량의 고강도 콘크리트의 응용은 Ohio강을 가로지르는 East Huntington Bridge와 캐나다 British Columbia주 Vancouver 부근의 Annicis Bridge의 상부구조물에 560kg/cm²압축강도의 콘크리트를 사용했으며, Washington주에 있는 여러개의 프리스트레스트 콘크리트 거더 교량에 압축강도 630kg/cm²의 고강도 콘크리트를 사용한 예가 있다. 이외에도 고강도 콘크리트의 사용범위가 넓어져 최근에는 창고, 주차시설물, 교량 상판 덮개, 댐의 방수로, 해양구조물, 은행 금고실 및 공장의 슬래브에 이용되고 있다.

2. 고강도 콘크리트의 강성과 탄성계수

콘크리트의 압축강도와 탄성계수의 관계에 대한 연구보고에 따르면, 압축강도가 증가할수록 탄성계수는 커지게 된다. 현행 ACI Building Code에서는 탄성계수가 압축강도의 제곱근에 비례한다고 하고 있으나, 고강도에서의 탄

성계수 값은 이와 다른 성향이 나타나는 것을 알 수 있다. Texas주 Dallas에 있는 Interfirst Plaza Tower의 고강도 건물은 철골뼈대구조보다 6배의 강성을 갖고 있다 한다. 또한, Seattle지역의 Two Union Square에서는 압축강도 1,330kg/cm²의 초고강도 콘크리트를 사용한 예가 있다. 단지 하중을 지지하기 위한 강도는 980kg/cm²가 충분하였으나, 구조물이 필요로 하는 강성을 얻기 위해서는 더욱 높은 탄성계수를 필요로 했으므로, 1,330kg/cm²까지 강도를 높여야했다. 이와같이 탄성계수는 고강도 콘크리트를 선택하는 중요한 요인이 되므로 탄성계수를 결정하기 위한 시험방법은 구체화 되어야 한다.

고강도 콘크리트의 인장강도는 압축강도의 제곱근에 비례한다. 따라서 프리스트레스트 콘크리트 휨부재를 설계할 때 고강도 콘크리트를 사용함으로써 부재의 선단 인장 응력이 허용인장응력의 범위 내에 있을때까지 그 작용하중을 증가할 수 있다.

3. 고강도 콘크리트의 크리프 특성

단위 응력 당 크리프 변형은 압축강도에 반 비례한다. 즉, 같은 응력 수준에서 고강도 콘크리트 기둥은 낮은 강도의 기둥보다 작은 변형량을 갖는다. 따라서 고강도 콘크리트 기둥은 크리프변형의 증가없이 더 높은 응력 수준까지 하중을 받을 수 있게 된다. 프리스트레스트 콘크리트 부재에서는 콘크리트의 단위 응력당 크리프 변형량이 감소할 수록 프리스트레스 손실량과 텐던의 사용량을 줄일 수 있다. 이에 따라 고강도 콘크리트를 사용한 프리스트레스트 콘크리트 부재는 일반 콘크리트를 사용할 때보다 더욱 긴 시간과 큰 하중저항능력을 갖게 된다.

4. 동결융해특성

고강도 콘크리트는 주로 고층건물의 내부구조에 사용되기 때문에 고강도 콘크리트의 동결융해특성에 대한 자료가 제한되어 있는 실정

다. 낮은 물-시멘트비의 콘크리트에서도 포화상태로 동결융해작용이 반복된다면 어느 정도 연행된 공기량을 포함해야 한다. 그러나 콘크리트 내부의 공극에서 물이 동결함으로써 발생하는 파쇄력(bursting force)에 의해 고강도 콘크리트가 파괴되는 경우도 있다. 따라서 정확한 연행공기량은 추후 연구과제가 된다.

물-시멘트비가 작고, 내부 공극의 체계가 불연속적이며 그 수가 제한될수록 고강도 콘크리트는 침투성이 작아지며 염화물과 같은 부식제에 대한 저항성이 증가한다. 높은 압축강도와 낮은 침투성을 요구하는 구조물인 주차시설, 교량상판, 공장의 마루표면의 시공을 위한 고강도 콘크리트는 실리카 폼과 같은 혼화제를 첨가함으로써 그 효과를 얻을 수 있다. 이러한 고강도 콘크리트를 사용할 경우 주차시설물의 사용연한을 15년에서 40년까지 늘린 예를 찾을 수 있다.

5. 고강도 콘크리트의 배합, 운반, 온도조절, 양생

고강도 콘크리트의 혼합, 운반, 타설 및 양생은 원칙적으로 일반 콘크리트와 일치한다. 그러나 고강도 콘크리트는 오차의 허용한계가 상대적으로 작기때문에 품질관리에 있어 많은 주의를 필요로 하며 일반 콘크리트에서는 무시될 수 있는 특별한 고려사항이 존재한다.

고강도 콘크리트에서는 상대적으로 큰 단위 시멘트량을 사용해야 하므로 효과적인 혼합을 위해서는 배치크기를 작게 해야하며, 배합이전에 믹서의 성능과 효율성이 반드시 검토되어야 한다. 또한 믹서 속에 들어가는 콘크리트 재료에는 특별한 주의와 공정이 필요하게 된다. 여기서 고성능 감수제(HRWR)는 배합공정의 마지막에 첨가해야 가장 효과적이다. 매우 낮은 물-시멘트비의 콘크리트는 Dry Mix를 하게 되는데 그 배합공정은 상당히 까다로우며 이 경우 고성능 감수제는 배치플랜트에서 일부분을 첨가하고 나머지는 현장에서 첨가해야 한다. 믹서의 성능 시험은 균질한 콘크리트를 생산

하기 위한 배합시간의 결정 이전에 이루어져야 한다. 배합시간이 길어지면 슬럼프값과 워커빌리티가 감소하게 된다. 슬럼프의 손실을 막기 위해 현장에서 재배합하는 것은 콘크리트의 강도 저하를 유발하게 되며 특별한 경우 고성능 감수제를 재첨가함으로써 워커빌리티를 증진시키기도 한다.

콘크리트의 온도는 반드시 32°C 이하로 하며 가능한 한 낮게 유지해야 한다. 강제로 콘크리트의 온도를 낮추어야 할 경우에는 찬물이나 얼음 및 액체질소를 사용할 수 있다.

고강도 콘크리트는 여러가지 방법과 장비에 의해 운반되어질 수 있지만, 슬럼프 감소를 줄이기 위하여 가능한 한 운반시간을 짧게 해야 한다. 고강도 콘크리트의 운반에 가장 많이 사용되는 방법은 펌핑에 의한 운반으로써 시공업자는 고성능 감수제를 첨가함으로써 슬럼프를 유지한다. 이 방법에서는 가능한 한 펌프를 타설장소에 가깝게 설치해야 하며, 펌프관은 굽힘을 최소화하고 확실한 지지를 하여야 한다. 또한 펌프 작동기와 타설장소는 직접 연결되어야 하며 연속적인 펌핑이 되어야 한다.

고강도 콘크리트는 현장에 도착하는 즉시 타설해야 하므로 시공업자와 배치 플랫폼 사이의 긴밀한 협조가 선행되어야 한다. 또한 현장 타설시 충분한 진동기를 준비해야 한다. 즉, 작업에 필요한 3대의 진동기에 1대 꼴로 비상용 진동기를 비치해야 한다.

고강도 콘크리트 양생에서 가장 중요한 점은 시멘트 재료의 수화작용이 발생하는 동안 적당한 습도와 온도를 유지하는 것이다. 고강도 콘크리트는 낮은 물-시멘트비와 높은 시멘트량을 갖기 때문에, 콘크리트 배합시의 습기를 유지하는 피막양생에 비해, 추가로 물을 공급하는 습윤양생(ponding, immersion, fog spray, wet burlap)이 가장 효율적인 양생방법이다. 그러나 콘크리트 기둥과 같은 구조물은 실제적으로 습윤양생이 불가능하기 때문에 설계강도를 획득할 때까지 거푸집을 제거하지 않고 양생을 해야 한다. 따라서 배합 설계시 이러한 양생조건을 반영해야 한다. 주차 차고의 마루표면이

나 교량 상판 구조물과 같은 강도보다 내구성이 우선되는 경우에는 노출 표면의 양생방법을 결정하는 것이 가장 중요하며, 배합시간 또한 증발에 따른 표면균열을 방지하기 위해 중요한 고려사항이 된다.

고강도 콘크리트에서 발생하는 수화열은 콘크리트 내부온도를 크게 상승시키는 데, 예를 들면 760mm기둥의 내부온도를 현장에서 측정 한 결과 그 온도가 66~82°C 까지 상승하였다. 균열에 의한 온도변화를 최소화하기 위해서는, 배합 온도를 가능한 한 낮게 유지하고 설계강도를 얻기 위해 필요한 최소의 시멘트량을 사용해야 한다. 또한 무기질 혼화제와 낮은 수화열을 발생시키는 시멘트를 사용할 것을 권장하고 있다. 콘크리트의 강도가 온도에 의해 발생하는 인장응력에 충분히 저항할 수 있을때, 온도변화를 최소화하기 위하여 거푸집을 제거해야 한다. 고강도 콘크리트를 사용한 슬래브는 급속한 수분증발로 소성 건조 수축에 의한 균열이 발생한다. 즉, 콘크리트 표면으로부터 증발하는 수분의 탈출속도가 블리딩하는 물의 속도보다 빠르기 때문에 콘크리트 표면은 건조수축현상이 발생하여 인장응력을 유발하고, 콘크리트내부의 약한 면을 따라 균열이 발생한다.

낮은 물-시멘트비의 고강도 콘크리트는 작은 배합수량을 함유하므로 블리딩현상이 감소하며, 이러한 콘크리트가 낮은 습도와 강한 바람 및 높은온도의 기후조건을 받을때 소성 건조 수축에 의한 균열이 발생한다. 이와 같은 소성 건조 수축균열을 없애기 위해 타설 마무리 과정중에 fog nozzle을 사용하여 슬래브표면 위의 공기를 포화상태로 만들고, 콘크리트 표면에 거적을 덮는다. 균열을 줄이기 위해 블리딩현상을 증가시키는 것은 콘크리트 강도나 내구성을 감소시키는 결과를 초래하기도 하므로 주의해야 한다.

콘크리트가 굳지 않은 상태에서 발생하는 기둥 상부의 과대균열과 스폴(spall)은 주로 침하균열에 의해 일어난다. 굳지 않은 콘크리트는 부분적으로 보강재나 거푸집에 의해 구속되며, 구속된 요소주위에 공극과 균열이 형성된다.

최근 고강도 콘크리트를 사용하는 많은 건축물에는 180~200mm이상의 큰 슬럼프를 갖는 콘크리트가 기동을 타설할 때 사용된다. 따라서, 이 구조물은 소성상태에서 심한 침하 균열이 발생하며, 대부분의 균열은 보강된 철근과 연결되어 일어난다. 슬럼프가 커지고, 콘크리트 덮개가 줄어 들수록 균열의 발생 확률은 증가하게 되며, 균일하지 못한 부분적 진동이나 유연한 거푸집 또한 소성상태의 침하균열을 유발하게 하는 요인이 된다. 이러한 문제점은 가능한 한 100mm이하의 슬럼프를 갖는 콘크리트를 사용함으로써 해결할 수 있다. 또한 충분한 진동다짐과 최대한의 콘크리트 덮개 및 적당한 거푸집설계가 선행되어야 한다. Post vibration과 같은 재진동다짐도 소성상태의 침하균열을 줄일 수 있고, 먼저 형성된 균열의 전파를 막을 수 있다. 재진동다짐은 내부진동기가 자중에 의해 콘크리트 내부로 들어갈 수 있을 정도로 콘크리트가 굳지 않은 상태에서 가능한 한 늦게 수행되어야 한다. 외부의 거푸집 진동기를 사용하기도 한다.

6. 고강도 콘크리트의 시험

콘크리트는 강도가 커질수록 시험방법 및 시편제작에 따른 오차의 정도가 커진다. 일반 콘크리트에서 시험결과에 거의 영향을 주지않는 요인도 고강도 콘크리트에서는 심각한 결과를 초래할 수 있다. 또한, 시편의 크기도 문제점이 된다. 비록 고강도 콘크리트를 주로 사용하는 지역에 위치한 실험실은 시험기기의 용량을 늘릴 수 있다하더라도, 다른 여러 실험실에서는 시편의 표준 크기인 15×30cm실린더를 사용하여 고강도 콘크리트를 시험하기에는 시험기의 성능이 부적합한 경우가 많다. 그러나, 시방서의 규정은 이러한 표준크기의 시편에 대한 강도결과를 기준으로 설정하고 있기 때문에, 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 15×30cm 표준 실린더와 10×20cm의 작은 실린더에 대한 강도의 상관관계를 밝힘으로써, 작은 실린더를 고강도 콘크리트의 시험시편으로 사용가능하게

할 수 있다. 플라스틱이나 양철로 만든 몰드나 판지를 사용하여 ASTM규정에 따라 제작한 콘크리트시편은 강철 몰드로 만든 시편보다 강도가 어느 정도 떨어지게 된다. 실제 일반 콘크리트는 주로 플라스틱 몰드를 사용하여 제작되는데 고강도 콘크리트에 사용하는 것도 무방하다. 다만, 플라스틱 몰드의 재사용은 허용되지 않는다.

고강도 콘크리트에서 시험강도는 시편의 마감조건에 따라 크게 변화된다. 고강도의 캡핑 컴파운드는 3mm의 균일한 두께로 사용되어야 한다. 캡핑을 위한 다른 방법으로 ASTM마감조건에 따라 실린더의 끝단면을 회전 연마반으로 갈아서 시험할 수 있으나, 이방법은 시험 단가가 높아지는 단점이 있다. 또한 이 방법을 사용할 경우 콘크리트가 강도를 획득하는 중에서 시편을 갈기가 어렵기 때문에 시편 제작후 1~2일이 경과한 다음에 이루어져야 한다. 압축 시험기는 ASTM규정에 만족해야 하며, 고강도 콘크리트에서 시험기의 강성은 압축강도의 측정에 크게 영향을 미친다. 또한 시험기기는 매 6개월마다 점검하여 보정하여야 한다.

7. 콘크리트의 강도 증가 전망

아주 오래전에 Cornell University의 Hollister 교수는 1934년 ACI's 30th Annual Dinner에서 다음과 같은 말을 한 적이 있다. "가령 700kg/cm²의 압축강도를 갖는 콘크리트를 상상해 보자. 이는 기동단면을 더욱 작게할 것이며, 보와 슬래브 또한 얇고 가볍게 제작할 수 있을 것이다. 현재의 건물높이와 교량지간길이의 한계가 최소한 두배로 길어질 것이며, 새로운 설계자료와 시방규정이 필요하게 될 것이다." 익히 알고 있듯이 Hollister교수의 꿈은 벌써 이루어졌으며, 700kg/cm²이상의 압축강도를 갖는 콘크리트가 북미지역 및 다른 여러나라에서 실제 활용되고 있다.

1950년대에 압축강도 350kg/cm²의 콘크리트가 생산되었으며, 1960년대에는 420~530kg/cm²의 콘크리트가 상업적으로 사용되어 졌다.

1970년대 초에는 시카고 지역을 중심으로 630 kg/cm²의 고강도 콘크리트가 사용되었으며, 1980년대 후반에는 압축강도 1,400kg/cm²의 콘크리트가 생산 가능하게 되었다. 앞으로 2,000년대에는 1,750kg/cm²의 고강도 콘크리트가 생산될 것이며, 압축강도 2,100kg/cm²의 초고강도 콘크리트가 상업적으로 생산이 가능하게 될 전망이다.

Hollister교수의 예측과 같이 고강도 콘크리트를 사용함으로써 기둥의 단면이 현저히 작아져 부재의 횡좌굴에 대한 안전성 검토가 재고되어야 할 것이다. 또한 보와 슬래브는 더욱 경량화 되고, 현수교나 프리스트레스트 거더 교량과 같은 장지간의 구조물이 시공되게 되었다. 더욱 중요한 것은 고강도 콘크리트의 우수한 역학적 특성 때문에 그 사용성이 증가하고 있다는 사실이다. 최근에는 고속도로의 교량 상판, 주차시설, 공장시설 및 해양 구조물과 같이 내구성을 요구하는 구조물에 고강도 콘크리트를 널리 사용하고 있다. 추후 연구과제는 재료특성과 구조물 성능의 관계를 밝힘으로써 최적의 고강도 콘크리트를 생산해 내는 것이다.

다음으로 기존의 설계자료를 검토해 볼 필요가 있다. Hollister교수가 새로운 시방규정의 필요성을 역설한 바와 같이 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 현행 시방규정의 전반적인 수정이 필요하게 되었다. 1988년 ACI committee 363의 고강도 콘크리트에 대한 보고서에는 새로운 재료특성에 적합한 시방규정으로의 수정을 위한 많은 연구결과가 제출되었다. 그러나 이 연구결과도 700~1,050kg/cm²의 고강도 콘크리트를 사용한 시험이었으므로, 공학적 측면에서 1,050~1,750kg/cm²의 압축강도를 갖는 콘크리트의 계반특성을 파악함으로써 기존의 설계방법을 수정할 수 있는 토대를 구축해야 한다.

산업화가 가속됨에 따라, 거의 강재에 가까운 압축강도를 갖는 콘크리트에 대한 연구가 이루어 질 것이다. 그러나, 현재의 공학수준에서 볼 때, 재료의 생산기술이 재료의 특성에 관한 연구를 앞지르고 있으므로 앞으로 수년내에 두 분야에서 균형있는 발전이 이루어 지도록 많은 연구가 수행되어야 할 것이다.