

고강도 콘크리트의 역학적 성질

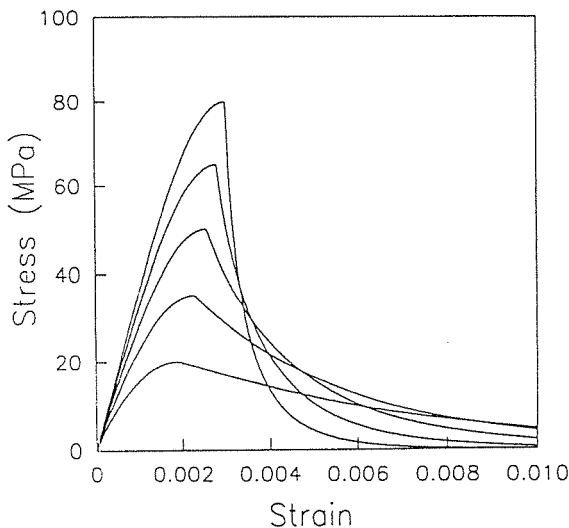
박 연 동

(동양중앙연구소 건설재료연구실 선임연구원, 공·박)

1. 응력—변형도 관계

콘크리트는 강도수준이 높을수록 그림 1에 나타나 있는 바와 같이 최대응력 전후의 응력—변형도 곡선의 기울기가 급해지고, 최대응력 이전의 거동은 선형화되는 경향이 있으며, 최대응력 이후에는 응력이 급격히 감소하는 성질이 있다.

이러한 응력—변형도 곡선의 형태는 콘크리트



〈그림 1〉 콘크리트의 응력—변형도 관계

내부의 미세균열 진전 현상을 통하여 설명되어 질 수 있는데, 콘크리트는 하중을 받기 이전부터 블리이딩 현상, 수화과정 중의 시멘트 페이스트의 체적변화, 경화후의 건조수축 등에 의해 이미 골재와 시멘트 매트릭스 경계부분에 미세균열이 존재하며, 이 균열을 부착균열이라 칭한다. 응력—변형도 곡선은 크게 3단계로 나눌 수 있고 (그림 2 참조), 미세균열이 거의 진전하지 않는 단계를 초기단계로 본다. 이러한 초기단계의 응력범위는 콘크리트 강도수준에 따라 다소의 차이는 있으나 보통강도 콘크리트의 경우는 최대응력의 약 40% 정도인 반면, 압축강도 800kgf/cm² 이상의 고강도 콘크리트는 최대응력의 70% 또는 그 이상의 값을 가진다. 즉, 응력—변형도 곡선을 선형으로 가정할 수 있는 응력범위는 고강도 콘크리트가 보통강도 콘크리트보다 넓다. 제2단계에서는 기존의 미세균열이 진전되어 그 수 및 길이, 폭이 증가하여 매트릭스 균열로 발달하기 시작하며, 이러한 균열의 발달에 의해 응력—변형도 곡선은 비선형성을 나타내기 시작한다. 제2단계의 범위는 보통강도 콘크리트의 경우 최대응력의 70%, 고강도 콘크리트는 90% 정도이다. 제3단계에서는 매트릭스 균열이 더욱 발전하여 주균열을 형성하며, 응력—변형도 곡선의 비선형성은 더욱 커지게 된다. 주균열이 형성된 이후 콘크리트는 최대응력에 도달하여 파괴에 이르게 된다. 최대응력 이후 콘크리트는 변형도가 증가함에 따라 응력이 서

서히 감소하는 변형연화(strain softening) 현상을 보이는데, 이는 콘크리트 내부에 발생된 주균열로 인해 콘크리트 공시체가 부정정 구조물과 같이 거동하기 때문이다.

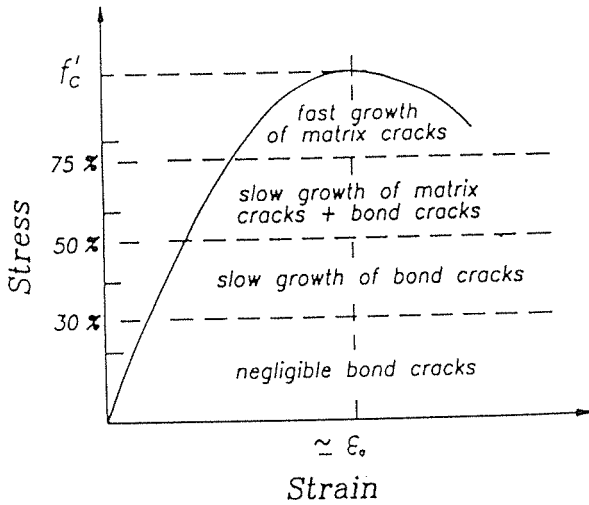
통강도 콘크리트에 비하여 미세균열현상을 적게 나타내기 때문에 축하중을 받는 경우 비탄성 영역에서의 횡방향 팽창이 보통 콘크리트에 비해 작아 기둥에서의 나선철근에 의한 횡방향 구속 효과가 작게 나타난다.

2. 탄성계수

콘크리트의 탄성계수는 주로 압축강도에 영향을 받으며, 골재의 종류 및 크기, 혼합재(주로, 실리카흙)의 사용량, 습윤상태 등에 의해 약간씩 영향을 받는다. 압축강도가 동일할 때는 일반적으로 쇠석을 사용한 경우가 강자갈을 사용한 경우보다 탄성계수가 높으며, 굵은골재의 최대크기가 커질수록 탄성계수는 증가한다. 실리카흙의 첨가량이 증가할수록 탄성계수는 감소하며, 습윤상태인 경우가 건조상태인 경우보다 탄성계수가 높다.

고강도 콘크리트 배합은 플라이애쉬, 실리카흙 등 시멘트 이외의 결합재 사용, 고성능감수제 사용, 낮은 물-시멘트비 적용, 품질이 상대적으로 양호한 골재의 사용 등 보통강도 콘크리트 배합과는 상이한 점이 많기 때문에 이러한 요인들에 의해서 탄성계수는 영향을 받게 된다. 따라서, 고강도 콘크리트의 탄성계수를 정확히 예측하기 위해서는 보통강도 콘크리트에 대하여 쓰고 있는 기존의 탄성계수 식을 보완 또는 수정해줄 필요가 있다.

콘크리트 탄성계수를 예측하는 콘크리트 표준시방서 식이나 ACI(미국콘크리트학회) 표준식을 압축강도 420kgf/cm² 이상의 고강도 콘크리트에 적용하게 되면 그림 3에 나타나 있는 바와 같이 실제값보다 과대하게 평가하는 경향이 있다. 따라서 ACI 363 위원회⁽¹⁾(고강도 콘크리트 위원회)의 고강도 콘크리트에 관한 보고서에서는 보통중량 콘크리트에 대하여 아래의 식을 사용하도록 권장하고 있다.



〈그림 2〉 콘크리트의 균열진전단계

보통강도 콘크리트는 미세균열의 수가 상대적으로 많아 부정정·차수가 높은 구조물과 같이 거동하여 응력이 서서히 감소하고, 고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트에 비하여 미세균열이 발달이 적기 때문에 응력이 상대적으로 급격히 감소하게 된다. 고강도 콘크리트가 미세균열이 적게 발생하는 이유는 골재와 매트릭스의 탄성계수 차이가 적고 골재 절대 최적이 작아 균열이 진전되기 시작하는 골재-매트릭스 경계부분의 면적이 작으며, 최대크기가 작은 골재를 사용하여 경계부분의 부착강도가 커지기 때문으로 설명된다.

앞서 언급한 바와 같이 고강도 콘크리트는 보

$$E_c = 10600\sqrt{f'_c} + 70340 \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

for 210 kgf/cm² < f'_c < 850 kgf/cm²

여기서, E_c는 탄성계수, f'_c은 압축강도(kgf/cm²)이다.

Ahmad와 Shah⁽²⁾는 고강도 콘크리트의 탄성계수는 기존의 ACI 표준식을 따르지 않는다는 연구결과를 발표하였다. 그들은 기존의 실험 결과 분석으로부터 ACI 표준식은 콘크리트 압축강도 350kgf/cm² 이하에서는 탄성계수를 과소평가하고, 350kgf/cm² 이상에서는 과대평가한다고 주장하며, 다음과 같은 탄성계수 예측식을 제안하였다.

$$E_c = 1.62 \times 10^{-4} w^{2.5} (f'_c)^{0.325} \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

여기서, w는 콘크리트의 단위질량(kg/cm³)이다

다.

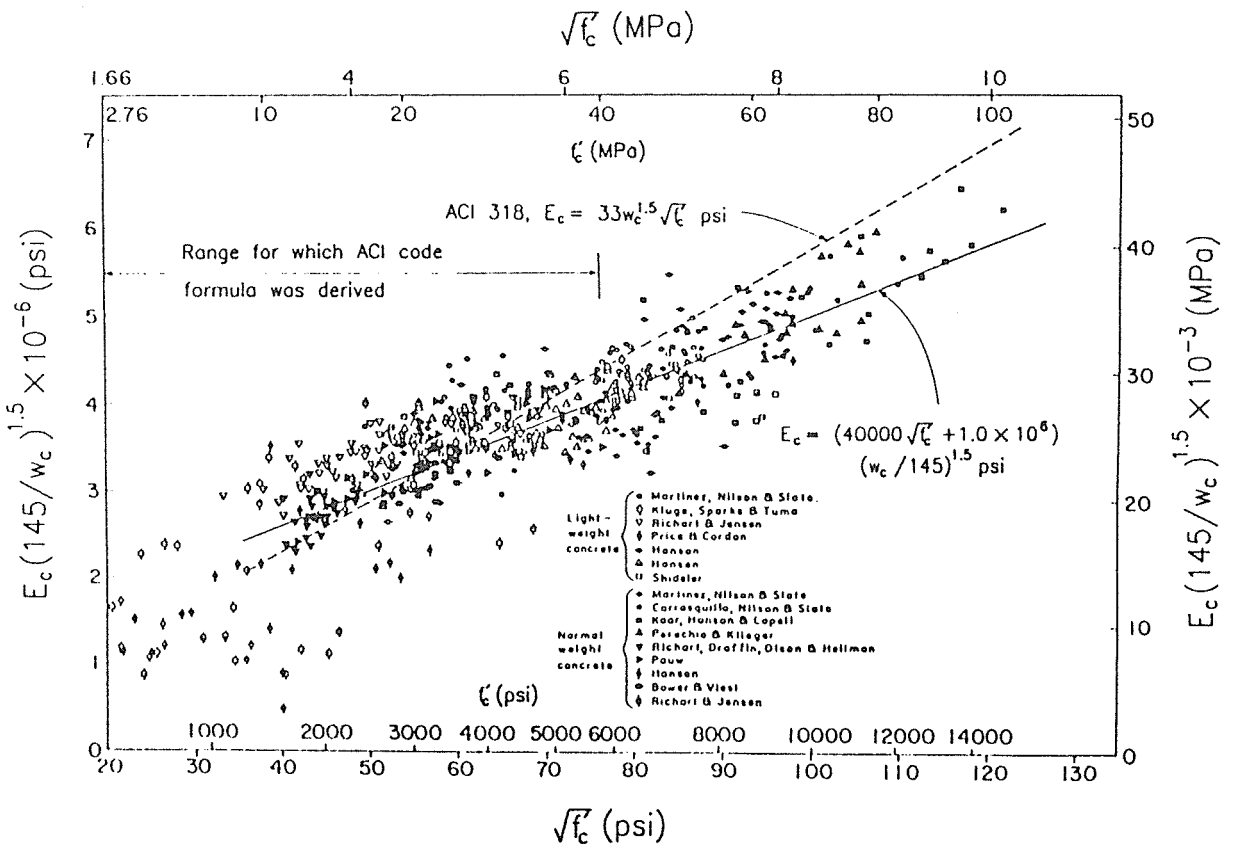
노르웨이 규격⁽³⁾에서는 콘크리트 탄성계수와 압축강도의 관계를 예측하는 식을 다음과 같이 제안하고 있다.

$$E_c = 48256 (f'_c)^{0.3} \text{ (kgf/cm}^2\text{) for } f'_c < 870 \text{ kgf/cm}^2$$

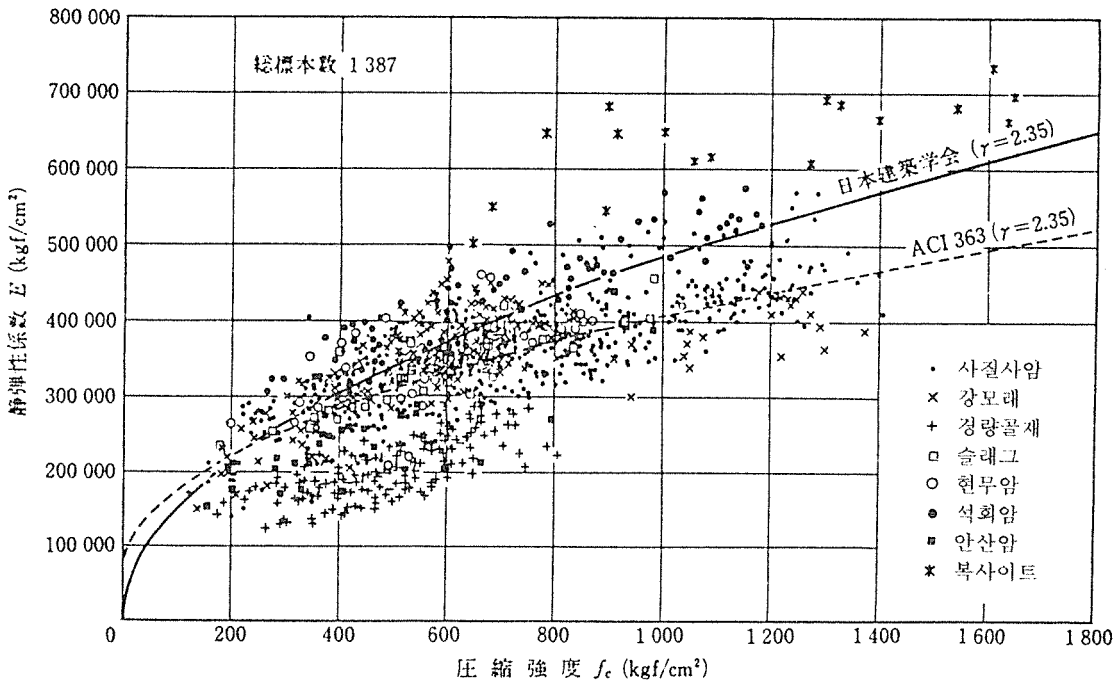
한편, 일본건축학회 '고강도 콘크리트 기술의 현상' 보고서⁽⁴⁾에서는 그림 4에 나타난 바와 같이 1387개의 실험치에 대한 회귀분석을 통하여 아래와 같은 식을 콘크리트 탄성계수 예측식으로 제안하였다. 이 식이 사용될 수 있는 콘크리트 압축강도 범위는 200~1400kgf/cm² 이다.

$$E_c = 9200 \gamma_c^2 (f'_c)^{0.3} \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

여기서 γ_c는 콘크리트의 비중이다.



〈그림 3〉 콘크리트 압축강도와 탄성계수의 관계



〈그림 4〉 콘크리트 압축강도와 탄성계수의 관계 (일본)

3. 포아송비

콘크리트가 종방향으로 압축력을 받으면 종방향 압축변위가 발생하며, 이와 더불어 횡방향으로도 인장변위(팽창하는 변위)가 발생하는데, 종변형도에 대한 횡변형도의 비를 포아송비라 한다. 그림 5는 공시체 압축강도 실험시의 종변형도, 횡변형도 및 체적변형도를 도시한 것이다.

포아송비는 콘크리트의 파괴에 중요한 의미를 갖는 재료특성상수로서, 보통강도 콘크리트의 경우 포아송비는 0.16~0.20 정도에서 압축응력이 최대인 점에 이르면 0.3~0.6 정도로 증가한다. 그러나 고강도 콘크리트는 포아송비가 거의 일정하게 유지되다가 최대응력에 이르게 되면 갑자기 증가하는 경향을 보이며, 최대응력에서의 포아송비 역시 보통강도 콘크리트보다 낮아 횡보강 효과가 낮게 나타나는 것으로 알려져

있다.

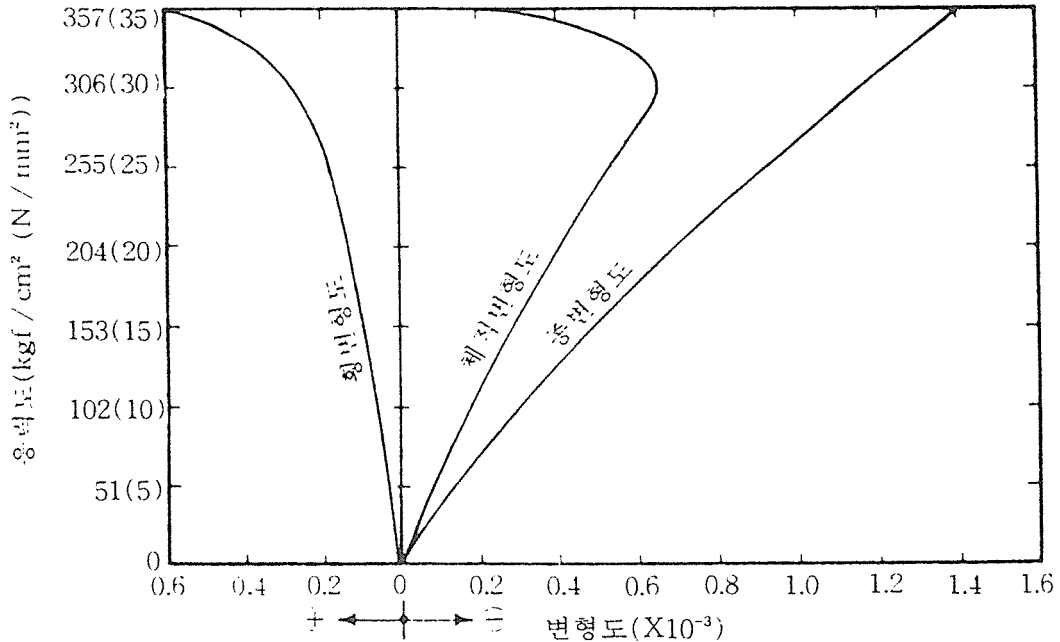
일반적으로 콘크리트는 파괴응력의 70%정도까지는 횡변형도와 종변형도가 거의 같은 비율로 증가한다. 즉, 포아송비가 거의 일정하다. 그러나, 작용응력이 70%를 상회하게 되면 콘크리트 내부에 발생하는 균열 때문에 횡방향 변형도가 커지게 되어, 포아송비가 증가한다. 보편적으로 콘크리트의 포아송비는 작용응력이 강도의 40% 수준일 때의 값으로 대표되며, 포아송비에 영향을 미치는 인자로는 물시멘트, 단위골재량 등이 있다.

실제로 고강도 콘크리트의 포아송비에 관한 연구결과는 그다지 많지 않다. Shideler⁽⁵⁾와 Carrasquillo 등⁽⁶⁾의 실험결과에 의하면, 경량골재를 사용한 고강도 콘크리트의 포아송비는 압축강도 750kgf/cm² 수준까지 압축강도, 재령, 함수율에 관계없이 0.2 정도의 값을 가진다고

한다. 반면, Perenchio와 Klieger⁽⁷⁾는 압축강도 550~800kgf/cm² 고강도 콘크리트의 포아송비는 0.20과 0.28 사이이며, 물-시멘트비가 증가함에 따라 감소한다는 연구결과를 발표하였다. Kaplan⁽⁸⁾은 동적 비파괴 실험장치를 사용

하여 구한 결과로부터 압축강도 200~800kgf/cm² 콘크리트의 포아송비는 압축강도, 굵은골재, 재령 등에 관계없이 0.23~0.32 정도가 된다고 하였다.

현재까지의 실험결과에 의하면, 탄성영역에서



〈그림 5〉 콘크리트의 종변형도, 횡변형도 및 체적변형도

의 고강도 콘크리트의 포아송비는 보통강도 콘크리트와 유사하거나 약간 큰 값을 가지는 것으로 나타나고 있으며, 경량 콘크리트의 포아송비는 보통중량 콘크리트의 포아송비보다 다소 큰 값을 가진다.

비탄성 영역에서는 고강도 콘크리트가 보통강도 콘크리트보다 횡방향 변형도값이 낮는데, 이는 고강도 콘크리트가 보통강도 콘크리트에 비하여 미세균열이 적게 발생한다는 것을 의미한다. Ahmad⁽⁹⁾는 고강도 및 보통강도 콘크리트의 포아송비에 대한 실험결과에 근거하여 최대 응력에서의 콘크리트 포아송비를 예측할 수 있는 다음과 같은 식을 제안하였다.

$$\nu' = 41(f_c')^{-0.77}$$

고강도 콘크리트는 비탄성 영역, 특히, 최대 응력 이후의 영역에서 횡방향 변형도가 상대적으로 작기 때문에 나선철근의 횡보강 효과가 낮게 나타난다.

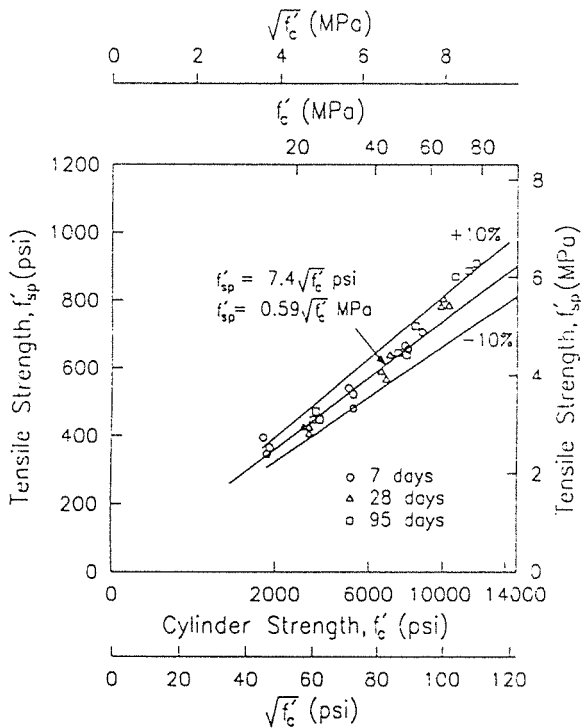
4. 인장강도

현재 콘크리트의 인장강도를 측정하는 방법에는 직접인장시험법, 할렬인장시험법 및 휨인장시험법 등 3가지가 있다. 직접인장시험법은 하중을 시험체의 축방향으로 정확하게 가하기가 어렵기 때문에 실제 인장강도를 과소평가하는 경향이 있고 실험결과에의 흠여짐이 심하여 잘 사용되지 않고 있다. 휨인장시험(콘크리트 보를

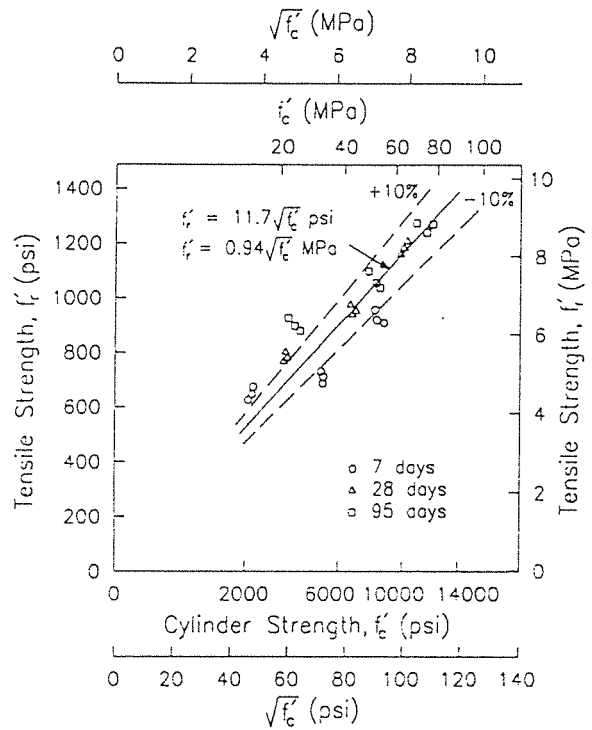
이용하여 실험)은 콘크리트의 인장강도를 과대 평가하는 경향을 나타낸다. 보편적으로 받아들여지고 있는 인장강도는 활렬인장시험법에 의하여 얻어진 값이며, 활렬인장강도는 휨인장강도의 65~75% 수준이다.

시멘트 페이스트의 인장강도 한계는 시멘트 페이스트 내부 미세결합의 크기와 응력집중에 관계되는 미세결합의 형상과 큰 관계가 있다. 폴리머를 시멘트 페이스트 내에 함침시켜 내부 결함을 줄인 경우 인장강도 648kgf/cm²의 콘크리트를 제조할 수 있다는 보고도 있다.

물-시멘트비가 감소함에 따라 인장강도는 증가하나, 그 증가율은 압축강도 증가율에 비하여 낮다. 또한, 시멘트를 실리카흙 등의 혼합제로 치환하여 콘크리트의 압축강도를 높인 경우에는 압축강도 증가에 수반되는 인장강도 증가는 미미하며, 치환율이 상승함에 따라 오히려 인장강도가 감소하는 경우도 있다. 동일 압축강도 하



〈그림 6〉 압축강도와 활렬인장강도의 관계



〈그림 7〉 압축강도와 휨인장강도의 관계

에서는 증기양생을 행한 경우가 수중양생을 행한 경우보다 인장강도가 다소 크게 나타나며, 이러한 경향은 고강도 콘크리트에서 더욱 현저하다. 강섬유보강에 의한 콘크리트 인장강도 상승효과는 고강도 콘크리트가 보통강도 콘크리트에서보다 작게 나타난다.

ACI 363 위원회 보고서에 의하면, 보통강도 콘크리트의 경우 활렬인장강도는 압축강도의 10% 수준이며, 활렬인장강도와 압축강도의 비율은 콘크리트 강도가 증가함에 따라 감소하여 압축강도가 850kgf/cm² 정도에 이르면, 약 5% 정도까지 감소한다. 또한, 쇠석을 사용한 경우가 강자갈을 사용한 경우보다 활렬인장강도가 8% 정도 높다.

Carrasquillo 등(6)은 보통중량의 고강도 및 보통강도 콘크리트에 대한 활렬인장강도 및 휨인장강도 예측식을 제안하였으며, 그림 6 및 그

림 7에 그 결과를 도시하였다.

한편, Ahmad와 Shah⁽²⁾는 저강도, 보통강도, 고강도 콘크리트에 대한 실험결과로부터 압축강도 850kgf/cm²까지의 콘크리트에 대한 할렬인장강도 및 휨인장강도 예측 실험식을 아래와 같이 제안하였다.

$$f_{sp}' = 1.13 f_c'^{0.55} \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

$$f_r' = 0.95 f_c'^{2/3} \text{ (kgf/cm}^2\text{)}$$

여기서, f_{sp}' 은 할렬인장강도, f_r' 은 휨인장강도이다.

일본 건축학회 '고강도 콘크리트 기술의 현상' 보고서에 따르면, 콘크리트의 고강도화에 수반하여 압축강도에 대한 인장강도의 비율은 감소하며, 압축강도 400kgf/cm²에서는 그 비율이 1/13 정도이나 압축강도 1000kgf/cm²에서는 1/18 정도가 된다(그림 8 참조).

그림 8은 일본에서 실험된 실험치에 근거하여

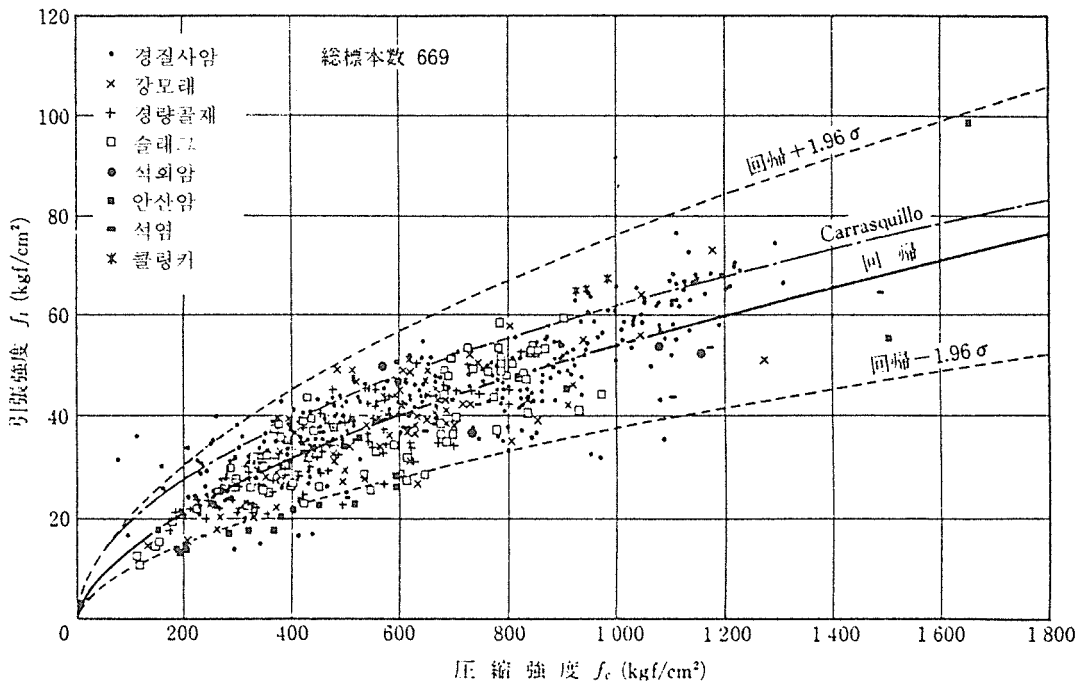
회귀분석한 결과이며, 그 결과로부터 압축강도와 인장강도의 관계를 아래식과 같이 제안하였다.

$$f_{sp}' = 1.07 f_c'^{0.566}$$

인장강도의 압축강도에 대한 비율은 시멘트 종류에 따라서는 거의 영향을 받지 않으나 혼합재 종류 및 치환율에는 영향을 받으며 굵은골재 종류에 따라서도 영향을 받는 것으로 나타나고 있다.

5. 전단강도 및 피로강도, 부착강도

콘크리트의 전단강도를 구하는 것은 매우 어려우며, 실험적으로 구한 전단강도는 파괴이론적으로 구한 전단강도의 약 2배의 값을 가진다. 실험치가 이론치보다 큰 이유는 균열이 휨의 영향 등으로 인해 파괴면과 반드시 일치하지 않기 때문이다.



〈그림 8〉 콘크리트의 인장강도와 압축강도의 관계 (일본)

콘크리트의 압축강도가 상승하면 전단강도도 증가하며, 근사적으로 선형관계에 있다고 가정할 수 있다. 압축강도 300~600kgf/cm² 범위에서는 전단강도는 압축강도의 1/3~1/5정도이고, 그 비율은 강도수준이 높아짐에 따라 조금씩 감소하는 경향이 있다.

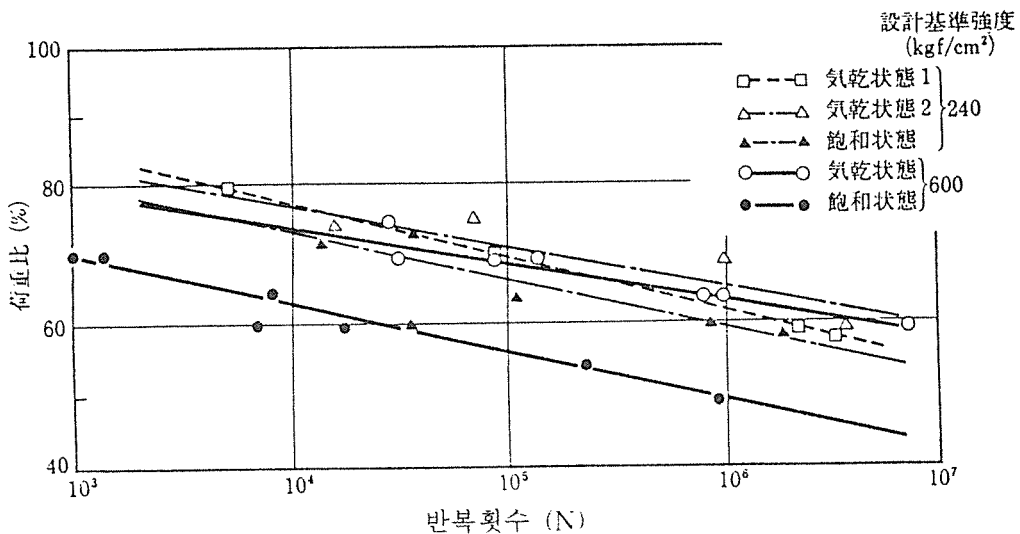
콘크리트는 정적강도(압축강도, 인장강도 등)보다 낮은 응력하에서도 그것을 반복해서 받으면 파괴에 이른다. 콘크리트의 피로강도는 일반적으로 200만번의 반복횟수에 견디는 응력의 크기로 결정하며, 그 값은 정적강도의 50~65% 정도인 것으로 알려져 있다.

그림 9는 고강도 및 보통강도 콘크리트 원주형 공시체의 압축피로 시험결과를 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 설계기준강도 600kgf/cm² 고강도 콘크리트의 압축피로강도는 설계기준강도 240kgf/cm² 보통강도 콘크리트의 압축피로강도와 비슷하나 포화상태에서는 다소 감소하는 경향이 있다. 이와 같은 현상이 발생하는 이유는 고강도 콘크리트의 경우, 미세균열 사이의 공극수가 하중의 반복작용에 의해 균열진전을 촉진하기 때문으로 고찰해 볼 수 있다.

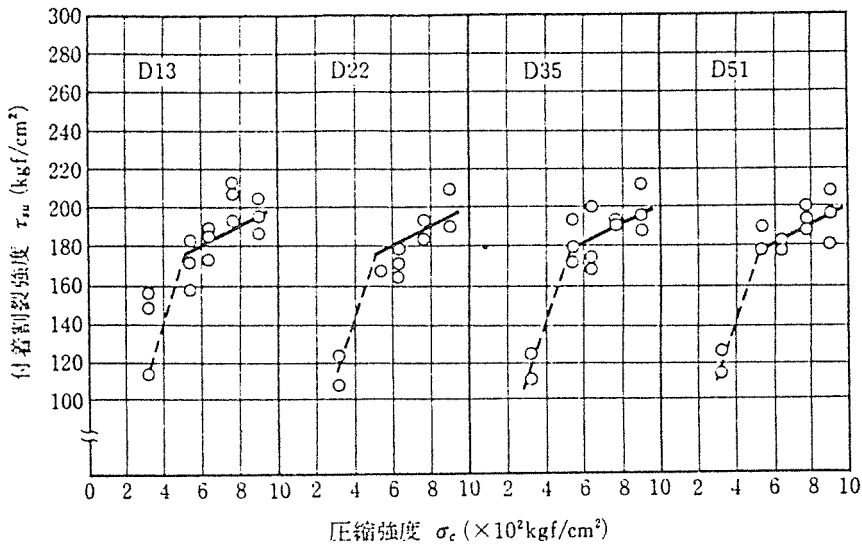
그러나 실리카흙을 사용한 고강도 콘크리트는 실리카흙의 포졸란 작용 및 미세결합 억제작용에 의해 포화상태에서의 피로강도가 오히려 증진된다는 보고도 있다. 한편, 고온고압증기양생을 행한 고강도 콘크리트의 피로강도는 보통강도 콘크리트와 유사하다.

일반적으로 콘크리트의 부착강도는 철근과의 부착강도를 뜻한다. 콘크리트의 부착력은 철근과 시멘트 페이스트와의 순수 부착력, 철근과 콘크리트 경계면에 가해지는 축압력에 의해 발생하는 마찰력, 철근 표면요철에 의한 기계적 저항력 등이다. 부착강도는 철근의 배치방향과 콘크리트 압축강도 및 철근의 표면상태에 영향을 받는 것으로 알려져 있다.

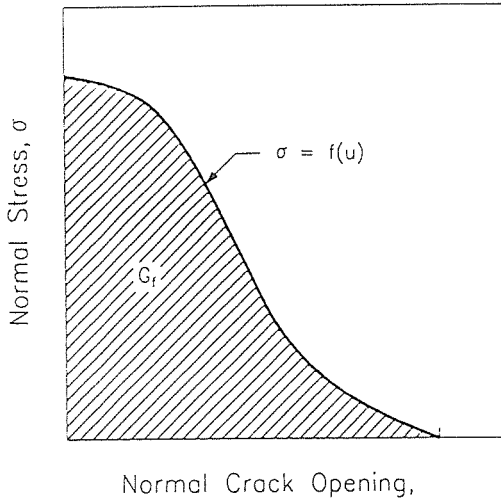
그림 10은 철근 직경에 따른 부착할렬강도와 압축강도의 관계를 나타내고 있다. 부착할렬강도는 철근직경에 관계없이 콘크리트 압축강도가 상승함에 따라 증가하나 그림에 나타나 있는 바와 같이 그 증가율이 압축강도 500~600kgf/cm² 이상에서는 둔화된다. 따라서, 고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트보다 압축강도 증가에 대한 부착강도 증진율이 낮다.



〈그림 9〉 원주형 공시체의 압축피로 시험결과



〈그림 10〉 콘크리트의 압축강도와 부착할렬강도의 관계



〈그림 11〉 변형연화 곡선

콘크리트에 매입된 볼트의 인발내력은 콘크리트의 성질 및 볼트 매입깊이 등에 영향을 받으나 콘크리트 인장강도와 매우 밀접한 관계가 있

어 콘크리트 인장강도에 의한 인발내력산정식이 제안되고 있다. 고강도 콘크리트도 보통강도 콘크리트와 유사하게 인장강도와의 상관성이 보고 되고 있다.

6. 파괴 에너지 (fracture energy)

그림 11에 나타나 있는 바와 같이 인장응력—변형도 곡선의 변형연화(strain softening)부분은 일반적으로 균열개구(crack opening)의 함수로 표시할 수 있다. 따라서, 균열개구가 시작하는 시점의 응력은 콘크리트의 인장강도 f_t' 과 일치하며, 균열개구가 진전됨에 따라 인장응력은 감소하고 극한균열개구 u_c 에서의 인장강도는 0이 된다. 인장응력—변형도 곡선에서 변형연화부분 아래의 면적(그림 11 참조)은 균열이 진전됨에 따라 흡수된 단위면적당 에너지이며, 이를 파괴에너지라 칭하고 기호로는 G_f 로 나타낸다. 파괴에너지는 압축강도, 탄성계수 등과 마찬가지로 재료의 성질을 나타내는 재료상수이다.

고강도 콘크리트의 파괴에너지에 관한 연구는

그다지 많지 않다. RILEM 기술위원회 90⁽¹⁰⁾의 보고에 의하면, 물—시멘트비 40% 이상에서는 배합재료나 배합비, 시험방법에 관계없이 물—시멘트비가 감소함에 따라 파괴에너지는 증가한다. 즉, 물—시멘트비의 증가에 의해 콘크리트 강도가 감소함에 따라 파괴에너지와 인장강도가 비슷한 경향으로 감소한다.

Hassanzadeh와 Haghpassand⁽¹¹⁾의 연구 결과에 의하면, 파괴에너지는 동탄성계수의 경우와 유사하게 콘크리트의 물—결합재비가 감소함에 따라 일정한 값에 수렴하는 형태로 증가하여, 물—결합재비가 44%(10cm 정육면체 공시체 압축강도 930kgf/cm²) 정도가 되면 거의 최대 값에 도달하며, 그 값은 석영의 파괴에너지 160 N/m(길이 30cm, 직경 6cm, 노치 깊이 3cm 코아 공시체에 대한 3점 휨시험으로부터 측정)보다 다소 작은 값을 나타낸다.

7. 취성계수 (brittleness number)

콘크리트 구조물의 취성도는 아래와 같이 취성계수 β 에 의해 나타낼 수 있다.

$$\beta = D/l_{ch} = ft'^2 D/EcGr$$

여기서, D=구조물의 크기 (characteristic size of the structure)

l = 특성길이 (characteristic length)

ft' = 인장강도

Ec = 탄성계수

Gr = 파괴에너지

특성길이는 취성적인 재료일수록 짧아지는 성질이 있다. Peterson⁽¹²⁾의 연구에 따르면, 구조용 콘크리트의 특성길이는 일반적으로 200~400mm 범위에 있다. 그러나, 가끔 콘크리트의 특성길이가 1000mm 이상된다는 보고도 있다.⁽¹³⁾

한편, Galeota 등⁽¹⁴⁾은 압축강도 770kgf/cm² 정도의 고강도 콘크리트 특성길이는 85~150mm 범위에 있다는 연구결과를 발표하였으며,

Daerga 등⁽¹⁵⁾은 압축강도 1260kgf/cm² 고강도 콘크리트의 특성길이는 다른 문헌에 발표된 보통강도 콘크리트 특성길이의 하부 경계영역(low boundary) 부근의 값을 가진다고 결론지었다.

Hassanzadeh와 Haghpassand⁽¹¹⁾의 실험 결과에 따르면, 콘크리트의 특성길이는 물—결합재비가 감소함에 따라 선형적으로 감소하며, 압축강도 450kgf/cm²(정육면체 공시체를 사용하여 실험) 콘크리트의 특성길이는 압축강도 1630kgf/cm²(정육면체 공시체를 사용하여 실험) 콘크리트 특성길이의 3배 정도이다.

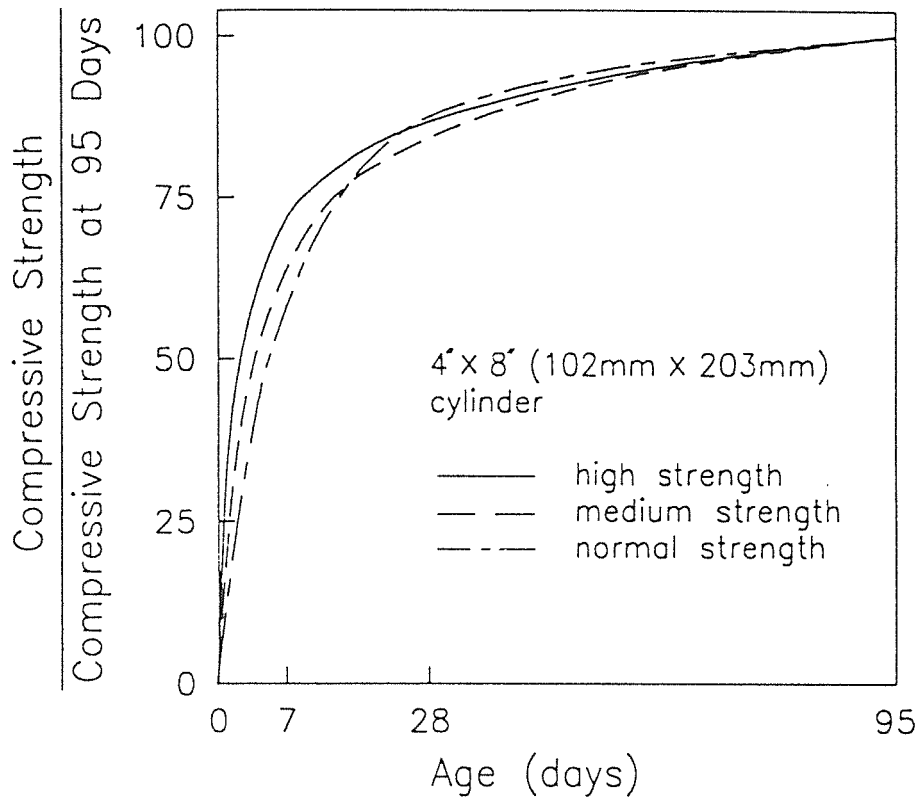
8. 재령에 따른 강도증진

고강도 콘크리트의 재령에 따른 강도증진율은 그림 12에 나타나 있는 바와 같이 재령 28일 이전의 초기재령에서는 보통강도 콘크리트보다 크고 28일 이후의 장기재령에서는 보통강도 콘크리트보다 작다.

Parrott⁽¹⁶⁾은 재령 7일과 재령 28일 압축강도의 비가 고강도 콘크리트에서는 0.8~0.9, 보통강도 콘크리트에서는 0.7~0.75 정도라고 보고하였다. 한편, Carrasquillo 등⁽⁶⁾은 재령 7일과 재령 95일 콘크리트의 압축강도 비가 고강도 콘크리트에서는 0.73, 보통강도 콘크리트에서는 0.65, 저강도 콘크리트에서는 0.60 정도임을 밝혀냈다.

이와 같이 고강도 콘크리트가 초기재령에서 강도발현율이 높은 이유는 콘크리트 강도수준이 높아질수록 단위시멘트량이 증가하기 때문에 수화열의 상승으로 내부 양생온도가 올라가고, 낮은 물—시멘트비로 인해 시멘트 수화 입자간의 간격이 좁아 수화반응이 촉진되기 때문인 것으로 여겨진다.

Maage 등⁽¹⁷⁾은 실리카흙을 사용한 고강도 콘크리트의 강도발현율은 실리카흙을 사용하지 않은 동일 물—결합재비의 고강도 콘크리트의 강도발현율보다 재령 28일 이전에는 낮으나 재령 28일 이후에는 높다고 하였다. 한편, 재령



〈그림 12〉 콘크리트의 재령에 따른 강도증진율

10년까지의 고강도 콘크리트 장기강도 증진율에 관한 연구로부터, 실리카흙 사용 유무에 관계없이 수중 및 기건양생 공시체의 압축강도 손실은 발생하지 않는다고 보고하였다.

9. 다축응력하에서의 거동

다축응력 하에서의 고강도 콘크리트의 거동에 관한 연구는 많지 않다. 고강도 콘크리트는 횡보강에 의한 극한강도 증진효과가 보통강도 콘크리트에 비하여 낮다. 또한, 횡보강 효과는 경량골재 콘크리트에서도 낮게 나타나며, 이와 같이 고강도 콘크리트와 경량골재 콘크리트에서 횡보강 효과가 낮게 나타나는 이유는 내부 균열 진전현상과 밀접한 관계가 있다.

압축과 전단의 조합응력을 받는 콘크리트에 대한 거동이 Khaloo와 Ahmad⁽¹⁸⁾에 의해 연구되었는데, 고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트에 비하여 낮은 (전단응력/압축강도) 비에서 파괴가 발생하였다고 한다. 또한, 고강도 콘크리트는 최초 표면 전단균열이 발생한 시점의 전단변형도가 상대적으로 낮게 나타났다.

한편, 2축 또는 3축 응력하에서의 콘크리트 응력—변형도 곡선의 상승 및 하강부분을 예측하기 위한 모델식이 Ahmad 등⁽¹⁹⁾에 의하여 제안되었다. 이 모델식에 따르면, 고강도 콘크리트는 비탄성 영역에서의 팽창이 보통강도 콘크리트보다 낮다.

Khaloo와 Ahmad⁽²⁰⁾는 낮은 횡보강 응력하에서 비틀림 3축 응력을 받는 고강도 콘크리트

의 거동에 관하여 실험적으로 연구하였다. 연구 결과 고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트에 비하여 최대응력 이후의 응력감소현상이 급격한 것으로 나타났다.

10. 변형도율 효과(strain rate effect)

지진과 같은 동하중을 받을 경우 콘크리트 구조물은 높은 변형도율 하에서 거동하게 된다. 이와 같은 높은 변형도율 하에서의 고강도 콘크리트 거동에 관한 자료는 매우 제한되어 있다. Khaloo와 Ahmad⁽²¹⁾는 콘크리트의 압축강도(최대 압축강도 500kgf/cm²)와 변형도율(최대 변형도율 0.03/초)을 변수로 두고 실험을 수행하였으며, 실험 결과에 근거하여 높은 변형도율 하에서의 탄성계수 및 최대응력, 최대응력 시점의 변형도율을 예측할 수 있는 실험식을 제안하였다. 제안된 실험식에 따르면, 탄성계수는 변형도율이 증가하면 상승하고, 변형도율 증가에 의한 압축강도 상승은 고강도 콘크리트가 보통강도 콘크리트에 비하여 낮다.

Reinhardt⁽²²⁾는 압축강도 및 인장강도에 대한 변형도율 효과는 콘크리트 압축강도가 증가할수록 감소한다고 보고하였다. 최근의 국내 연구 논문⁽²³⁾에서는 콘크리트 압축강도를 변수로 두고(최고 압축강도 1100kgf/cm²) 고강도 콘크리트의 응력—변형도 관계 및 탄성계수에 미치는 변형도율의 효과를 실험적으로 연구하였다. 연구 결과, 콘크리트 압축강도 수준이 상승함에 따라 변형도율의 효과는 감소하는 것으로 나타났다.

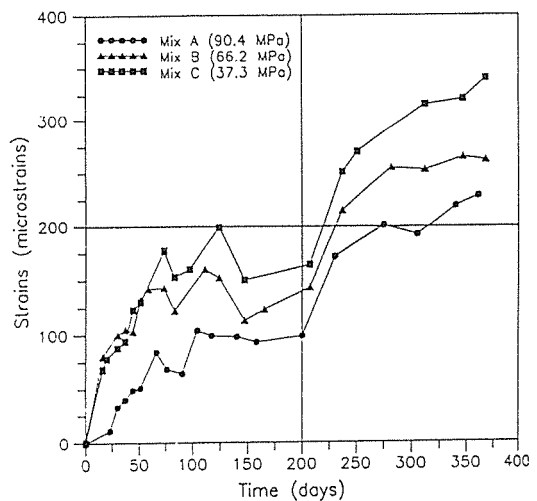
11. 건조수축 및 크리이프

비교적 오래된 고강도 콘크리트에 관한 연구 보고들에 의하면 고강도 콘크리트와 보통강도 콘크리트의 건조수축량은 거의 유사하다고 한

다. 그러나, 최근의 연구결과^(24, 25)에 따르면, 보통강도 콘크리트의 건조수축이 고강도 콘크리트의 건조수축보다 큰 것으로 나타나고 있다. 그림13은 시간의 경과에 따른 콘크리트의 건조수축량을 나타내고 있다.

ACI 고강도 콘크리트 위원회 보고서에 의하면, 건조수축량은 물—시멘트비의 변화에 영향을 받지 않고, 콘크리트 단위체적당 수량에 큰 사적으로 선형비례한다고 한다. 즉, 과거에는 성능이 뛰어난 고성능감수제를 사용하지 않고 고강도 콘크리트를 제조하였기 때문에 단위수량이 상대적으로 높아 건조수축이 크게 나타난 것으로 사료된다.

많은 연구결과^(1, 24, 25)에서 밝혀진 바와 같이 고강도 콘크리트의 크리이프 계수(creep coefficient)와 비크리이프(specific creep)는 동일 응력수준 하에서의 보통강도 콘크리트의 크리이프



〈그림 13〉 콘크리트 원주형 공시체(15×30cm)의 시간에 따른 건조수축

프 계수 및 비크리이프보다 낮다. 동시에 크리이프 계수가 일정한 값을 유지하는 응력수준이 고강도 콘크리트가 보통강도 콘크리트보다 높다. 그러나, 일반적으로 고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트에 비하여 높은 응력상태에 놓이기 때문에 총 크리이프는 콘크리트 강도수준과 관계없이 비슷한 값을 나타낸다.

12. 참고문헌

- 1) ACI Committee 363. "State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete." (ACI 363R-84). American Concrete Institute, Detroit, 1984, 48 pp.
- 2) Ahmad, S.H., and Shah, S.P., "Structural Properties of High Strength Concrete and Its Implications for Precast Prestressed Concrete," J. of the Prestressed Concrete Institute, V. 30, No.6, Nov.-Dec. 1985, pp. 92-119.
- 3) Norwegian Standard NS 3473, "Concrete Structures, Design Rules," Norway, 1989.
- 4) 日本建築學會, "高強度コンクリート技術の現狀," 1991, 290 pp.
- 5) Shideler, J.J., "Lightweight-Aggregate Concrete for Structural Use," ACI J., V. 54, No.4, Oct.1957, pp. 299-328
- 6) Carrasquillo, R.L., Nilson, A.H., and Slate, F.O., "Properties of High Strength Concrete Subjected to Short-Term Loads," ACI J., V.78, No.3, May-June 1981, pp. 171-178.
- 7) Perenchio, W.F., and Klieger, P., "Some Physical Properties of High Strength Concrete," Research and Development Bulletin No. RD056.01T, Portland Cement Association, Skokie, 1978, 7 pp.
- 8) Kaplan, M.F., "Ultrasonic Pulse Velocity, Dynamic Modulus of Elasticity, Poisson's Ratio and the Strength of Concrete Made with Thirteen Different Coarse Aggregate," RILEM Bulletin(Paris), New Series No. 1, Mar. 1959, 58-73.
- 9) Ahmad, S.H., "Properties of Confined Concrete Subjected to Static and Dynamic Loading." Ph.D. Thesis, University of Illinois at Chicago Circle, March 1981.
- 10) RILEM Technical Committee 90-FMA, "Fracture Mechanics of Concrete Structures-From Theory to Applications." Report, RILEM, 1989, 407 pp
- 11) Hassanzadeh, M., and Haghpassand, A., "Brittleness of Normal and High-Strength Concrete," Proceedings of Third International Symposium on Utilization of High Strength Concrete, Norway, June 1993, pp. 1092-1099.
- 12) Petersson, P.E., "Crack Growth and Development of Fracture Zones in Plain Concrete and Similar Materials," Report TVBM-1006, Division of Building Materials, Lund Institute of Technology, Sweden, 1981.
- 13) Hillerborg, A., "Results of Three Comparative Test Series for Determining the Fracture Energy G_f of Concrete," Materials and Structures (RILEM, Paris), V.18, No.107, 1985, pp. 407-413.
- 14) Galeota D., "Giammatteo, M.M., and Marino, R., "Fracture Properties of High Strength Concrete," Proceedings of Third International Symposium on Utilization of High Strength Concrete, Norway, June 1993, pp. 1062-1069.
- 15) Daerga, P.A., Pettersson, M.,

and Pontinen, D., "Fracture Properties in Tension of a High Performance Concrete," Proceedings of Third International Symposium on Utilization of High Strength Concrete, Norway, June 1993, pp. 1193-1200.

16) Parrot, L.J., "The Properties of High Strength Concrete," Technical Report No.42.417, Cement and Concrete Association, Wexham Springs, 1969, 12 pp.

17) Maage, M., Smeplass, S., and Johansen, R., "Long Term Strength of High-Strength Silica Fume Concrete," High-Strength Concrete-Second International Symposium, SP-121, American Concrete Institute, Detroit, 1990, pp. 399-408.

18) Khaloo, A.R., and Ahmad, S.H., "Behavior of Normal and High-Strength Concrete under Combined Compression-Shear Loading," ACI Materials J., V.85, No.6, Nov-Dec, 1988, pp. 551-559.

19) Ahmad, S.H., Shah, S.P., and Khaloo, A.R., "Orthotropic Model of Concrete for Triaxial Stresses," J. of Structural Engineering, ASCE, V.112, No.1, Jan. 1986, pp. 165-181.

20) Khaloo, A.R., and Ahmad, S.H., "Behavior of High-Strength Concrete

under Torsional Triaxial Compression," ACI Materials J., V.86, No.6, Nov.-Dec. 1989, pp. 550-558.

21) Ahmad, S.H., and Shah, S.P., "Behavior of Hoop Confined Concrete under High Strain Rates," ACI J., V.82, No.5, Sept.-Oct. 1985, pp. 634-647.

22) Reinhardt, H.W., "Simple Relations for the Strain Rate Influence of Concrete," Darmstadt Concrete, Annual J. on Concrete and Concrete Structures, V.2, 1987.

23) 김진근, 박찬규, 박연동 "고강도 콘크리트의 재료역학적 특성 연구—변형도율과 인장 강도를 중심으로," 한국콘크리트학회 가을학술발표회, 제4권, 제2호, 1992년 11월 pp. 111-118.

24) Smadi, M.M., Slate, F.O., and Nilson, A.H., "Shrinkage and Creep of High-Medium-, and Low-Strength Concretes, Including Overloads," ACI Materials J., V. 84, No.3, May-June 1987, pp. 244-234.

25) Paulson, K.A., Nilson, A.H., and Hover, K.C., "Long-Term Deflection of High-Strength Concrete Beams," ACI Materials J. V.88, No.2, Mar-Apr. 1991, pp. 197-206.