

콘크리트 기술자를 위한 배합설계 이론(2)

이 상 수

〈(주)대우 건설기술연구소 선임연구원, 공학박사〉

원 철

〈(주)대우 건설기술연구소 주임연구원〉

김 동 석

〈(주)대우 건설기술연구소 주임연구원〉

박 상 준

〈(주)대우 건설기술연구소 주임연구원〉

2. 배합이론

2.1 콘크리트의 재료특성에 대한 시멘트 페이스트상의 역할

(1) 강도에 관한 경험칙

(a) 指數法則

콘크리트의 압축강도와 물/시멘트비의 관계는 다음식과 같은 지수관계로 표현된다. 이것을 Abrams의 지수법칙이라 한다.

$$f_c = \frac{A}{B^{1.5\left(\frac{W}{C}\right)}} \dots\dots\dots(2.1)$$

여기에서,

f_c : 콘크리트의 압축강도

W/C : 물시멘트비

A, B : 정수

B 를 밑으로 하는 지수를 취하고, 또한 밑을 10으로 변환하면 (2.1)식은 다음식과 같은 형태로 된다.

$$\log f'_c = A' + B' \left(\frac{W}{C} \right) \dots\dots\dots(2.2)$$

A', B' : 정수

(b) 시멘트물비 법칙

물시멘트비의 변화 범위가 별로 크지 않을 경우에, 콘크리트의 강도는 시멘트물비와 직선관계에 있다. 이것을 Lyse의 시멘트물비 법칙이라 한다. 시멘트물비 법칙은 다음식으로 표현된다.

$$f'_c = A + B\left(\frac{W}{C}\right) \dots\dots\dots(2.3)$$

[例題]

콘크리트의 물시멘트비와 압축강도에 대해서, [표 2.1]에 나타낸 5조의 실험결과를 얻었다. 이것들이 전체로서 지수법칙 및 시멘트물비 법칙에 따르고 있는가의 여부를 조사하시오.

[표 2.1] 물시멘트비와 콘크리트 압축강도의 관계

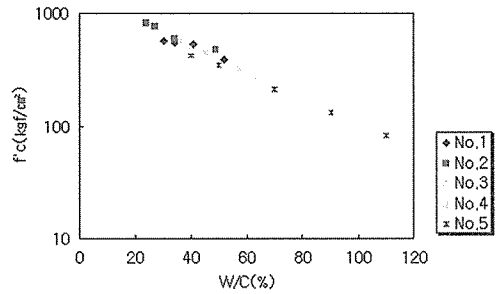
No.	W/C(%)								
	24	26.7	27	30	34	36	39	40	41
1	-	-	-	561	539	-	-	-	528
2	805	-	761	-	598	-	-	-	-
3	-	894	-	-	-	-	477	-	-
4	-	-	-	-	-	563	-	503	-
5	-	-	-	-	-	-	-	420	-

No.	C/W								
	45	49	50	52	57.5	62.5	70	90	100
1	-	-	-	380	-	-	-	-	-
2	-	476	-	-	-	-	-	-	-
3	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	442	-	-	-	320	272	-	-	-
5	-	-	340	-	-	-	212	130	81

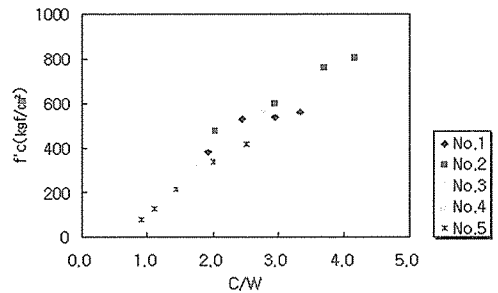
[略解]

W/C와 f'_c의 관계를 반대수표시한 것이 [그림 2.1], C/W와 f'_c를 통상의 그림으로 나타낸 것이 [그림 2.2]이다. 두가지 그림 모두 전체로서 직선으로 간주할 수 있지만, 실험결과를 1조씩 보면, W/C가 40%정도보다

작아지면 시멘트물비 법칙보다 강도가 작아지는 경향이 확인되었다.



[그림 2.1] 지수법칙의 적용 결과



[그림 2.2] 시멘트물비 법칙의 적용 결과

회귀직선의 식과 상관계수는 다음과 같다.

$$\log f'_c = 3.169 - 1.172\left(\frac{W}{C}\right), \gamma = -0.986$$

$$f'_c = 230.7\left(\frac{C}{W}\right) - 95.3, \gamma = 0.963$$

(2) 강도이외의 성질에 대한 시멘트 페이스트상의 역할

(a) 동결융해에 대한 저항성

동결융해의 반복에 대한 콘크리트의 내구성은 주로 공기량에 따라 결정되고, 공기량 2~4% 사이에 내구성의 천이영역이 있다.

따라서, 콘크리트의 내구성에 관해서는 공기량이 물시멘트비와는 독립적인 지배요인이 된다.

또한, 내구성이 양호한 콘크리트를 얻기 위해 필요한 공기량은 콘크리트중에 접하는 시멘트 페이스트의 체적비에 비례하기 때문에, 단위 시멘트 페이스트량이 많은 콘크리트에서는 소요의 공기량이 증대하고, 강도를 일정하게 유지하기 위해서는 물시멘트비를 작게 해야한다.

(b) 체적변화

콘크리트는 함수상태의 변화 및 온도변화에 따라 팽창 또는 수축한다. 그 경우, 시멘트 페이스트쪽이 골재보다 변화율이 크기 때문에, 골재는 시멘트 페이스트의 체적변화를 구속하는 작용을 한다. 그 결과, 콘크리트의 체적변화는 시멘트 페이스트량이 많을수록 크고, 예를 들면, 건조수축은 시멘트 페이스트 체적비의 1.2~1.7승에 비례한다. 따라서, 단위페이스트량은 물시멘트비와는 독립적인 배합요인이다.

(3) 워커빌리티에 대한 시멘트 페이스트상의 역할

(a) 단위수량과 컨시스턴시의 관계

단위시멘트량을 일정하게 하고 단위수량을 증대시키면, 시멘트 페이스트의 점성이 감소함과 동시에 단위페이스트량이 증가한다.

물시멘트비를 일정하게 하고 단위수량을 증대시킨 경우에는 단위시멘트량도 증가하기 때문에, 단위시멘트량을 일정하게 한 경우보다도 단위페이스트량의 증가는 커진다. 어떠한 경우라도 단위수량은 증대시키면 단위페이스트량이 증가하고, 콘크리트의 유동성은 증대한다.

컨시스턴시를 나타내는 양을 y , 단위수량을 w 로 해서 y 의 변화량과 w 의 변화율이 비례한다고 하면,

$$dy = m \left(\frac{dw}{w} \right) \dots \dots \dots (2.4)$$

y 의 변화율이 w 의 변화율에 비례한다고 하면,

$$\frac{dy}{y} = m \left(\frac{dw}{w} \right) \dots \dots \dots (2.5)$$

이다.

이것을 적분함에 따라, 다음식이 얻어진다.

$$y = m \ln w + k_1 \dots \dots \dots (2.6)$$

$$y = k_2 w^n \dots \dots \dots (2.7)$$

대수식은 m 과 k_1 2개의 실험정수를 포함하고 있지만, y 로서 슬럼프 S_L (cm)를 채용한 경우에는 「단위수량이 3% 변화하면 슬럼프는 2.5cm 변화한다」라는 경험칙을 식(2.4)에 적용시킴에 따라, 다음과 같이 m 의 값을 정하는 것이 가능하다.

$$m = \frac{dy}{dw} = \frac{2.5}{0.03} = 83.3$$

따라서, 식(2.6)은 다음식이 된다.

$$S_L = 192 \log w + k_1 \dots \dots \dots (2.8)$$

지수식에 있어 n 은 컨시스턴시 시험방법에 따라 정해진 器械定數이고, y 로서 슬럼프를 사용한 경우에는 $n = 10$ 으로 했을 때에 실험치에 적합하다⁽¹⁾고 하기 때문에, 식(2.7)은 다음식이 된다.

$$S_L = k_2 w^{10} \dots\dots\dots(2.9)$$

대수식과 지수식에 있어서 k_1, k_2 는 사용재료나 배합, 기타 조건에 따라서 정해진 정수이기 때문에, 단위수량이 w_0 일 때의 슬럼프 S_0 가 시험치로서 얻어지는 경우에는

$$k_1 = S_0 - 192 \log w_0$$

$$k_2 = \frac{S_0}{w_0^{10}}$$

따라서, 식(2.8), (2.9)는 다음식이 된다.

$$S_L = S_0 + 192 \log \left(\frac{w}{w_0} \right) \dots\dots\dots(2.10)$$

$$S_L = S_0 \left(\frac{w}{w_0} \right)^{10} \dots\dots\dots(2.11)$$

또한, 식(2.4)에 있어서, $dw = w - w_0$, $dy = S_L - S_0$ 로 하고, 前記한 경험칙을 적용하면,

$$S_L = S_0 + \frac{2.5}{0.03} \left(\frac{w - w_0}{w_0} \right) = S_0 + 83.3 \left(\frac{w}{w_0} - 1 \right) \dots\dots\dots(2.12)$$

이 된다. 이것을 w 에 대해서 고쳐 쓴 다음 식은 실제의 배합설계에 있어서 단위수량의 보정에 이용되고 있다.

$$w = w_0 [1 + 0.012(S_L - S_0)] \dots\dots\dots(2.13)$$

(b) 일정 단위수량의 법칙

사용재료가 동일하고, 굵은·잔골재비가 일정한 콘크리트의 경우, 단위수량이 일정하다면 실용적인 범위에서 단위시멘트량이 변화해도 슬럼프는 거의 일정하게 유지된다. 이것을 Lyse의 일정 단위수량의 법칙이라 한다.

단위수량을 일정하게 하고 단위시멘트량을 증감시키면, 콘크리트중에 접하는 미립분의 체적비가 증가해서 슬럼프는 반대로 감증하는 경향을 보인다. 따라서, Lyse의 법칙은 엄밀한 것은 아니지만, 물시멘트비를 변화시켜 슬럼프가 같은 콘크리트를 만드는 경우에 이용하는 것이 가능한 실용적인 경험칙이다.

(c) 재료분리저항성

시멘트 페이스트의 점성이 지나치게 작은 경우, 또는 페이스트량이 지나치게 적은 경우에는 콘크리트로부터 물이 遊離, 모르타르와 굵은골재의 분리 등이 일어나기 쉽게 된다. 페이스트의 점성이 사용재료와 페이스트의 조성에 지배되고, 페이스트량은 단위시멘트량, 단위수량 및 공기량에 따라 정해지기 때문에, 재료분리저항성에는 시멘트 페이스트상이 크게 관여하고 있지만, 그밖에, 잔골재와 굵은골재의 성질 및 사용비율도 관계하고 있다.

2.2 골재상의 공극특성 해석

(1) 세조혼합골재의 조성파 공극량을 나타내는 지표

(a) 조성을 나타내는 지표

잔·굵은골재의 혼합비율을 나타낼 때는 잔골재에 대한 굵은골재의 중량비(G/S), 또는 畚骨材에 대한 잔골재의 절대용적비를 %로 나타낸 잔골재율(s/a)이 일반적으로 사용되고 있다. 그러나, 혼합골재의 공극량을 해석하는 경우에는 畚骨材에 대한 굵은골재의 체적비가 적합하기 때문에, 이것을 조성의 지표로서 사용한다. 혼합골재중에 접하는 잔골재의 입자체적을 s, 굵은골재의 입자체적을 g, 조성을 x로 나타내면, 조성 x는 다음식으로 정의된다.

$$x = \frac{g}{s+g}, \quad 1-x = \frac{s}{s+g} \quad (2.14)$$

식(2.14)에서 밝힌 바와 같이, $x=0$ 은 잔골재에, $x=1$ 은 굵은골재에 대응한다.

입자체적은 골재입자가 점하는 공간의 체적, 즉, 표건상태의 골재중량을 표건상태에 있어서의 밀도로 나눈 것이기 때문에, 이것을 절대용적이라고 바꿔 부르는 것도 가능하다. 단, 절대용적은 엄밀히 말하면, 굳지 않은 콘크리트에 있어서 각 재료가 점하는 용적(일본건축학회, 건축공사표준시방서, JASS 5)이다.

(b) 공극비

골재를 용기에 충전시켰을 때, 공극량의 다소를 나타내는 지표로서 통상 사용되고 있는 것은 공극율과 실적율이다. 그러나, 이러한 것들은 변수인 공극체적을 분모에 포함시키고 있기 때문에, 공극량에 관한 해석에는 적합하지 않다. 그래서, 분모에 변수를 포함시키지 않고, 그 위에, 조성의 지표와 공통의 분모를 가진 공극비를 공극량에 관한 지표로서 사용한다.

공극총체적을 v , 간극비를 e 로 나타내면, 간극비는 다음식으로 정의된다.

$$e = \frac{v}{s+g} \quad (2.15)$$

공극체적을 간극비로 나타내면,

$$v = e(s+g) \quad (2.16)$$

이므로, 필요하다면 공극율, 실적율은 간극비에서 계산하여 구할 수 있다.

공극율은 $\varepsilon \times 100(\%)$ 로 하면, ε 와 실적율은

$$\varepsilon = \frac{e}{1+e} \quad (2.17)$$

$$\text{실적율} = (1 - \varepsilon) \times 100\% = \frac{1}{1+e} \times 100\%$$

$$(2.18)$$

이고, 간극비를 ε 으로 나타내면,

$$e = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \quad (2.19)$$

이다.

(c) 고유간극비와 고유공극체적

잔골재와 굵은골재를 혼합하기 전에 각각의 간극비를 고유간극비라 하고, e_s 및 e_g 로 나타낸다.

잔골재와 굵은골재의 입자체적인 s, g 일 때, 이것들의 공극체적(고유공극체적)은

$$v_s = s e_s \quad (2.20)$$

$$v_g = g e_g \quad (2.21)$$

여기에서,

v_s, v_g : 잔골재와 굵은골재의 고유공극체적

e_s, e_g : 잔골재와 굵은골재의 고유간극비이다.

(2) 조성과 간극비의 관계

(a) 假想간극비직선

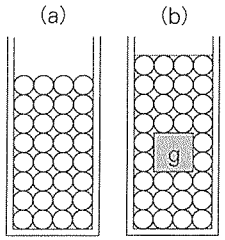
잔골재를 等大球로 가정하고, [그림 2.3(a)]와 같이 충전시킨 상태에서 方形의 굵은골재 입자를 넣어서 [그림 2.3(b)]와 같은 상태가 되도록 하면, 공극체적은 잔골재만인 경우의 공극체적(고유공극체적) v_s 로 바뀌지 않고, 입자체적은 굵은골재의 체적분 만큼 증가한다.

따라서, 이 상태에 있어서의 간극비를 e_1 라

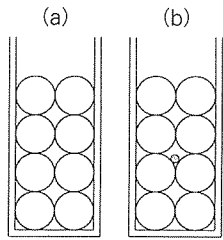
하면, e_1 은

$$e_1 = \frac{v_s}{s+g} = e_s(1-x) \quad (2.22)$$

이다.



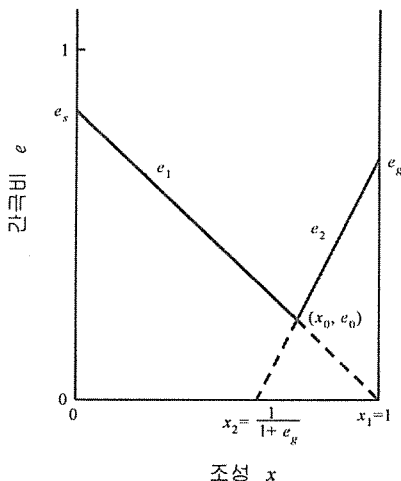
(그림 2.4) 세립자상에
조립자를 더한 경우



(그림 2.4) 조립자상에
세립자를 더한 경우

또한, [그림 2.4(a)]와 같이 충전시킨 굵은골재의 공극에 [그림 2.4(b)]와 같이 잔골재 입자가 들어 갔다고 하면, 공극체적의 굵은골재의 고유공극체적 v_g 보다 잔골재의 입자체적분만 감소하고, 입자체적은 잔골재의 입자체적분만큼 증가한다.

따라서, 이 상태에 있어서의 간극비를 e_2 로



(그림 2.5) 가상간극비 직선

하면, e_2 는

$$e_2 = \frac{v_g - s}{s+g} = (1+e_g)x - 1 \quad (2.23)$$

이다.

식(2.22), (2.23)은 [그림 2.5]에 나타낸 2 직선으로 표현된다.

[그림 2.3(b)] 상태의 조립자의 크기를 크게 함에 따라서 $g \rightarrow \infty$ 로 하면, $x=1$, $e_1=0$ 으로 되고, [그림 2.4(b)] 상태의 세립자의 크기를 액체분자와 같이 작게 하고, 또한, $s \rightarrow v_g$ 로 하면, $e_2=0$, $x=1/(1+e_g)$ 로 된다.

그러나, 실제로는 조립자도 세립자도 유한의 크기이고, (b)에서 서술한 바와 같이, 혼합골재의 간극비는 2직선보다 항상 커지기 때문에, [그림 2.5]의 실선부분을 가상간극비직선이라 부른다.

직선 e_1 및 e_2 가 x 축과 교차하는 점의 조성을 x_1 , x_2 라 하면,

$$x_1 = 1 \quad (2.24)$$

$$x_2 = \frac{1}{1+e_g} \quad (2.25)$$

이다.

또한, 2직선 e_1 , e_2 의 교점은 간극비의 이론상 최소치를 부여하기 때문에, 이 점을 이론최밀점으로 하고, 그 조성(이론최밀조성)을 x_0 , 간극비(이론최밀간극비)를 e_0 라 하면, 이것들은 다음식으로 부여된다.

$$x_0 = \frac{e_s + 1}{e_s + e_g + 1} \quad (2.26)$$

$$e_0 = \frac{e_s e_g}{e_s + e_g + 1} \quad (2.27)$$

여기에서,

x_0 : 이론최밀조성

e_0 : 이론최밀간극비

(b) 혼합골재의 간극비곡선

잔골재에 굵은골재의 입자를 조금씩 더할 때, 잔골재입자의 배열에 변화가 생기지 않으면 간극비는 가상간극비직선 e_1 에 따라 감소한다. 그러나, 실제로는 굵은골재입자가 들어감에 따라, 그 주변의 잔골재상이 영향을 받고, 그에 따른 공극체적의 증가가 발생한다. 그 때문에, 굵은골재입자를 더했을 때의 간극비의 감소량은 가상간극비직선보다 작아지고, 그 차는 굵은골재입자의 양이 많을수록 커진다.

또한, 굵은골재에 잔골재입자를 조금씩 더했을 때도 굵은골재입자의 배열에 변화가 생기지 않으면, 간극비는 가상간극비직선 e_2 에 따라 감소하지만, 잔골재입자는 굵은골재상의 공극보다 작은 것만이 아니기 때문에, 굵은골재입자의 간극이 넓어짐에 따른 공극체적의 증가가 발생해서, 간극비의 감소량은 가상간극비직선보다 적어지고, 그 차는 잔골재입자의 양이 많을수록 커진다.

이와 같은 사실로부터, 혼합골재의 조성 and 간극비의 관계를 나타내는 간극비곡선은 [그림 2.6]과 같은 형상으로 되고, 혼합골재 최밀점의 조성 및 간극비는 이론최밀조성 및 이론최밀간극비에 대해서

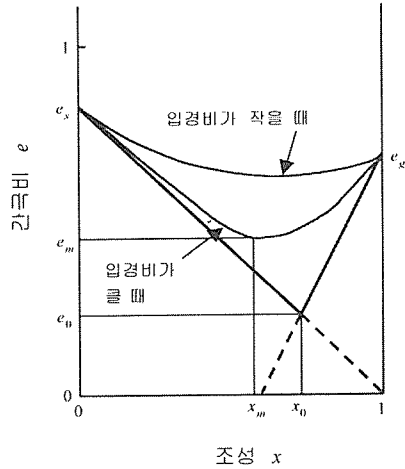
$$\begin{matrix} x_m < x_0 \\ e_m < e_0 \end{matrix}$$

여기에서,

x_m : 혼합골재의 최밀조성

e_m : 혼합골재의 최밀간극비

이다.



(그림 2.6) 혼합골재의 간극비선도

또한, 간극비곡선과 가상간극비직선의 차는 잔골재 입경에 대한 굵은골재 입경의 비가 작을수록 커진다. 따라서, 잔골재의 입도가 일정한 경우, 굵은골재의 최대치수가 클수록 혼합골재의 공극율은 작아진다.

(c) 굵은골재상의 겉보기 간극비와 가상간극비직선의 관계

굵은골재만의 경우, 간극비는 고유간극비 e_g 이지만, 이것에 잔골재를 더한 경우에는 잔골재량의 증가에 따라서 굵은골재입자의 충전 상태가 점차 느슨해지고, 굵은골재만에 着眼한 간극비는 고유간극비보다 커진다. 이것을 겉보기 간극비라 한다. 조성이 x 일 때의 겉보기 간극비를 e'_g 로 나타내는 것으로 한다.

만일, 처음부터 굵은골재의 간극비가 e'_g 인 것 같은 상태로 굵은골재입자가 배치되어 있어, 그 공간에 조성이 x 가 될 때까지 잔골재입자를 더한 경우에는 굵은골재의 배열은 최초의 상태대로 보존되기 때문에, 이 과정은 고유간극비가 e'_g 인 굵은골재의 가상간극비직

성으로 표현된다. 따라서, 조성 x 의 혼합골재의 실제 간극비를 e_x 로 하면, x 와 e_x 는 식(2.23)에서 다음식을 만족시켜야 한다.

$$e_x = (1 + e'_g)x - 1 \dots\dots\dots(2.28)$$

이에 따라, 겉보기 간극비 e'_g 는

$$e'_g = \frac{1 + e_x}{x} - 1 \dots\dots\dots(2.29)$$

이 된다.

이 식은 잔골재의 입자체적을 공극체적으로 간주해서 간극비의 정의에서 유도하는 것도 가능하다.

겉보기 간극비는 굵은골재의 분산정도를 나타내는 지표의 한 가지이다.

[例題]

고유간극비가 0.56인 잔골재와 0.75인 굵은골재를 중량비로 2 : 3의 비율로 혼합하였을 때, 공극율이 28.2%인 것으로 한다. 이 상태에 있어서의 굵은골재의 겉보기 간극비를 구하시오. 단, 잔골재와 굵은골재의 비중은 2.59 및 2.66으로 한다.

[略解]

$$x = \frac{g}{s + g} = \frac{\frac{0.6}{2.59}}{\frac{0.4}{2.59} + \frac{0.6}{2.66}} = 0.594$$

간극비 e_x 는 식(2.19)에 따라

$$e_x = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} = \frac{0.282}{1 - 0.282} = 0.393$$

굵은골재의 겉보기 간극비 e'_g 는 식(2.29)에 따라

$$e'_g = \frac{1 + e_x}{x} - 1 = \frac{1 + 0.393}{0.594} = 1.35$$

(3) 細粗混合骨材의 비표면적

(a) 혼합골재의 조성 및 체적비표면적의 관계

체적비표면적이 σ_s 및 σ_g 인 잔·굵은골재를 혼합한 골재의 조성이 x 일 때, 잔골재의 전표면적과 굵은골재의 全表面積은 각각

$$S_s = s\sigma_s$$

$$S_g = g\sigma_g$$

여기에서,

S_s , S_g : 잔골재와 굵은골재 각각의 전표면적

이므로, 혼합골재의 총표면적 S 는

$$S = s\sigma_s + g\sigma_g$$

이고, 전체로서의 체적비표면적은

$$\sigma_x = \frac{S}{s + g} = \frac{s\sigma_s}{s + g} + \frac{g\sigma_g}{s + g} = (1 - x)\sigma_s + x\sigma_g \dots\dots\dots(2.30)$$

여기에서,

σ_x : 조성이 x 인 혼합골재의 체적비표면적(cm^2/cm^3)이다.

(b) 잔·굵은골재의 혼합비와 비표면적의 관계

혼합골재에 있어서 잔골재와 굵은골재의 중량비를 w_s , w_g 로 하고, 각각의 비표면적을 S_{As} , S_{Ag} 라 하면, 혼합골재의 비표면적 S_A 는

$$S_A = w_s S_{As} + w_g S_{Ag} \dots\dots\dots(2.31)$$

이다.

(c) 혼합골재의 비표면적과 체적비표면적의 관계

혼합골재의 전중량을 M 이라 하면, 잔골재와 굵은골재 각각의 중량과 입자체적은

$$\begin{aligned} m_s &= Mw_s \\ m_g &= Mw_g \\ s &= \frac{m_s}{\rho_s} = \frac{Mw_s}{\rho_s} \\ g &= \frac{m_g}{\rho_g} = \frac{Mw_g}{\rho_g} \end{aligned}$$

여기에서,

ρ_s, ρ_g : 잔골재와 굵은골재의 밀도 (g/cm^3)

이고, 혼합골재의 전표면적은

$$S = \sigma_x(s + g) = S_A M$$

이다. 이로부터 다음식이 얻어진다.

$$\sigma_x = \frac{S_A M}{s + g} = \frac{S_A m}{\frac{Mw_s}{\rho_s} + \frac{Mw_g}{\rho_g}} = \frac{S_A}{\frac{w_s}{\rho_s} + \frac{w_g}{\rho_g}} \quad (2.32)$$

체분석에 따라서 잔골재와 굵은골재의 비표면적이 구해질 때, 이것들을 혼합한 골재의 비표면적은 식(2.31)로 계산하고, 또한, 식(2.32)에 따라서 체적비표면적을 구하는 것이 가능하다.

(d) 공극의 체적비표면적과 평균경

공극측에서 본 표면적은 입자의 총표면적과 같기 때문에, 공극의 체적비표면적을 σ_v 라 하면,

$$\sigma_v = \frac{S}{v} = \frac{\sigma_x(s + g)}{e_x(s + g)}$$

$$\therefore \sigma_v = \frac{\sigma_x}{e_x} \quad (2.33)$$

공극을 이것과 동일체적을 갖는 球로 간주할 때의 직경을 d_v 라 하면,

$$\sigma_v = \frac{\pi d_v^2}{6 d_v^3} = \frac{6}{d_v} \quad (2.34)$$

$$\therefore d_v = \frac{6}{\sigma_v} = 6 \left(\frac{e_x}{\sigma_x} \right) \quad (2.35)$$

이와 같이 해서 얻어진 공극의 직경은 비표면적에 기초하여 구해진 것이기 때문에, 비표면적경이다. 단, 실제의 공극은 독립된 것이 아니라 전체가 연속된 상태로 존재한다.

[例題]

밀도가 2.59 및 2.66, 비표면적이 $62.9\text{cm}^2/\text{g}$ 및 $2.33\text{cm}^2/\text{g}$ 인 잔골재와 굵은골재를 중량비로 2 : 3의 비율로 혼합하였을 때, 공극율이 28.2%인 것으로 한다. 이 혼합골재의 체적비표면적과 공극의 비표면적경을 구하시오.

[略解]

혼합골재의 비표면적은 식(2.31)에 따라

$$\begin{aligned} S_A &= w_s S_{As} + w_g S_{Ag} = 0.4 \times 62.9 + 0.6 \times 2.33 \\ &= 26.6\text{cm}^2 / \text{g} \end{aligned}$$

체적비표면적은 식(2.32)에 따라

$$\sigma_x = \frac{S_A}{\frac{w_s}{\rho_s} + \frac{w_g}{\rho_g}} = \frac{26.6}{\frac{0.4}{2.59} + \frac{0.6}{2.66}} = 70.0\text{cm}^2 / \text{cm}^3$$

간극비를 e_x 라 하면, 식(2.19)로부터

$$e_x = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} = \frac{0.282}{1 - 0.282} = 0.393$$

공극의 비표면적경을 d_v 라 하면, 식(2.35)로부터

$$d_v = 6 \left(\frac{e_x}{\sigma_x} \right) = 6 \times \frac{0.393}{70.0} = 0.034 \text{ cm}$$

2.3 페이스트-골재 二相系의 배합이론

(I) 시멘트 페이스트 층두께의 해석

(a) 페이스트 층두께에 관한 지표

굳지 않은 콘크리트에 유동성, 분리저항성, plasticity 등의 성질을 부여하는 역할은 주로 페이스트상이 담당하고 있지만, 경화 후의 콘크리트 성질에 기초해서 시멘트 페이스트의 성질, 즉, 물/시멘트비와 공기량이 부여된 경우에, 굳지 않은 콘크리트의 성질은 골재와 페이스트의 상대량과 골재의 특성, 특히 공극량과 표면적에 의해 영향을 받는다.

이러한 것들을 종합적으로 나타내는 지표로서, 평균 페이스트 두께⁽²⁾, 잉여 페이스트 층두께⁽³⁾, 부착 페이스트 막두께⁽²⁾ 등이 있고, 각각 다음과 같이 정의 된다.

평균 페이스트 두께

$$= \frac{\text{페이스트의 체적}}{\text{골재의 전표면적}} \dots\dots\dots (2.36)$$

잉여 페이스트 층두께

$$= \frac{\text{페이스트의 체적} - \text{골재의 고유공극체적}}{\text{골재의 전표면적}} \dots\dots\dots (2.37)$$

부착 페이스트 막두께

$$= \text{골재입자를 시멘트 페이스트중에서 뽑아 내어, 10초간 滴下시킨 후에 골재표면에 남은 페이스트량을 표면적으로 나누어 구한 두께} \dots\dots\dots (2.38)$$

(b) 페이스트의 층두께와 콘시스턴시의 관련성

콘크리트중의 골재입자는 시멘트 페이스트로 덮혀 있기 때문에, 골재입자끼리는 떨어진 상태로 존재하고, 골재의 고유공극체적보다 페이스트 체적쪽이 큰 통상의 콘크리트에서는 골재사이의 평균적인 간격(분산거리)은 잉여 페이스트 층두께의 2배이다.

콘크리트가 유동 또는 변형할 때, 부착 페이스트 부분은 골재표면에 고정되어 있다고 생각되기 때문에, 3종류의 지표를 비교하면, 잉여 페이스트 층두께가 콘크리트의 콘시스턴시와 가장 직접적인 관련성을 갖는 요인이라고 생각할 수 있다.

이러한 지표를 조합시켜, 예를 들면 잉여 페이스트 층두께에서 부착 페이스트 막두께를 공제한 것, 또는, 잉여 페이스트 층두께에 평균 페이스트 두께를 가미시킨 것 등을 요인으로 하는 쪽이 합리적이라고 하지만, 복잡함도 증가하게 된다.

(c) 잉여 페이스트 층두께의 산정식

잔골재와 굵은골재만을 혼합한 혼합골재의 공극체적(고유공극체적)

$$v_{sg} = e(s + g) \dots\dots\dots (2.39)$$

여기에서,

v_{sg} : 혼합골재의 고유공극체적

e : 혼합골재의 고유간극비

s, g : 잔골재와 굵은골재의 입자체적

콘크리트중의 잉여 페이스트 체적 p_e 는 골재의 전표면적과 잉여 페이스트 층두께의 곱이 거의 같기 때문에

$$p_e = \sigma(s + g)\delta_p \dots\dots\dots (2.40)$$

여기에서,

σ : 혼합골재의 체적비표면적

δ_p : 잉여 페이스트 층두께
 공기포를 포함한 페이스트의 총체적을 p 로 하면, 식(2.39), (2.40)에 따라

$$p = v_{sg} + p_e(s + g)(e + \sigma\delta_p) \dots\dots\dots(2.41)$$

$$\therefore \delta_p = \frac{1}{\sigma} \left(\frac{p}{s + g} - e \right) \dots\dots\dots(2.42)$$

골재중에 미립분이 다량 함유되어 있는 경우에는 이것을 골재에서 제외시켜 페이스트를 算入할 필요가 있다. 예를 들면, 썩기분석으로 손실된 입자분을 페이스트 성분으로 간주하는 것으로 하면, 0.075mm이하인 입자가 이것에 해당한다.

쇄사에 함유된 석분의 브레인 비표면적이 1,500~8,000cm²/g정도라⁽⁴⁾는 것을 고려해서, 비표면적 1,500cm²/g에 대응하는 비표면적경을 구하면 약 0.02mm가 된다. 0.04mm를 경계치수로 한 연구⁽⁵⁾도 있다.

(2) 잉여 페이스트 이론에 따른 최적 잔골재율

(a) 최적 잔골재율의 존재역

조성이 x 인 혼합골재의 체적비표면적은 식(2.30)에 따라 다음식으로 표현된다.

$$\sigma = (1 - x)\sigma_s + x\sigma_g \dots\dots\dots(2.43)$$

여기에서,
 $\sigma, \sigma_s, \sigma_g$: 혼합골재, 잔골재 및 굵은골재의 체적비표면적

이 잔·굵은골재에 대한 간극비곡선을 $f(x)$ 로 나타내고, 식(2.43)의 관계를 사용하면, 식(2.41)은 다음식으로 된다.

$$p = (s + g) \left[f(x) + \left\{ \sigma_s(1 - x) + \sigma_g x \right\} \sigma_p \right] \dots\dots\dots(2.44)$$

잉여 페이스트 층두께 δ_p 가 일정할 때, 컨시스턴시는 거의 일정하게 유지되는 것으로

생각하고, 일정한 컨시스턴시를 가진 콘크리트에서 p 가 최소가 되도록 하는 조성을 최적 조성 x_p 라 하면, x_p 는 다음식을 만족한다.

$$\left[\frac{dp}{dx} \right]_{x=x_p} = 0 \dots\dots\dots(2.45)$$

x_p : 페이스트량이 최소가 되도록 하는 혼합골재의 조성

$$\text{단위페이스트량} = \frac{p}{p + s + g} = 1 - \frac{s + g}{p + s + g}$$

이므로, $s + g$ 가 일정할 때, p 가 작을수록 단위페이스트량은 작아진다. 즉, 식(2.45)는 단위페이스트량을 최소로 하는 조건이고, 이로부터 $f'(x_p)$ 가 다음과 같이 구해진다.

$$\left[\frac{dp}{dx} \right]_{x=x_p} = (s + g) \left[f'(x_p) + \delta_p(\sigma_g + \sigma_s) \right] = 0$$

$$\therefore f'(x_p) = -\delta_p(\sigma_g + \sigma_s) \dots\dots\dots(2.46)$$

이 식은 $f'(x_p)$ 가 항상 正이라는 것을 나타내고 있기 때문에, 페이스트량이 최소가 되는 골재의 조성은 x 와 함께 e 가 증가하는 영역, 즉, e 를 최소로 하는 조성보다 x 가 큰 영역에 있다는 것을 알 수 있다.⁽⁶⁾

식(2.46)에 식(2.42)를 대입하면 다음식이 된다.

$$f'(x_p) = \frac{\sigma_s + \sigma_g}{\sigma} \left(\frac{p}{s + g} - e \right) \dots\dots\dots(2.47)$$

잔골재율과 조성의 관계는

$$s / a = (1 - x) \times 100\% \dots\dots\dots(2.48)$$

이므로, 컨시스턴시가 일정할 때에 단위페이스트량이 최소가 되도록 하는 잔골재율을 최적 잔골재율이라고 하면, 최적 잔골재율은 δ_p 일정한 조건에서 간극비가 최소가 되는 잔

골재율로 된다.

최적 잔골재율은 단위 페이스트량이 일정할 때에 콘크리트의 유동성 또는 변형성이 가장 커지도록 하는 잔골재율이라고 생각하는 것도 가능하기 때문에, 그 경우에는 $p =$ 일정한 조건에서 잉여 페이스트 층두께 δ_p 가 최대로 되는 잔골재율이 최적 잔골재율이 된다. 이와 같은 잔골재율이 간극비가 최소로 되는 잔골재율보다 약간 작아지는 것은 실험적으로 확인되고 있다.⁽⁵⁾

(b) 최적 잔골재율에 영향을 미치는 요인

식(2.46), (2.47)을 고찰함에 따라, 최적 잔골재율에 대한 각종 요인의 영향을 알 수 있다.

예를 들면, 물/시멘트비가 일정한 조건에서 단위수량을 증가시키면, 단위 페이스트량이

증가해서 δ_p 가 증대한다. 그 결과, $f'(x_p)$ 는 커지고, 간극비곡선의 형상에서 최적 잔골재율은 작아진다는 것을 알 수 있다.

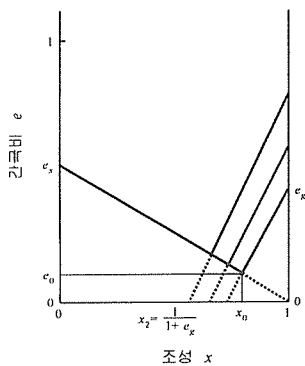
골재의 입자형상, 입도 등이 변화한 경우에는 간극비곡선도 변화하지만, 간극비곡선은 가상간극비직선과 관계가 깊기 때문에, 가상간극비직선에 대해서 고찰함에 따라 최적 잔골재율에 대한 현을 얻는 것이 가능하다.

예를 들면, 쇄석을 사용한 경우에는 강자갈을 사용한 경우보다도 굵은골재의 고유간극비 e_g 가 커져 이론최밀조성 x_0 는 작고, 또한 이론최밀간극비 e_0 는 커진다(그림 2.7). 그 결과, 간극비곡선의 최밀조성 x_m 은 작고, 또한 최밀간극비 e_m 은 커진다는 것을 추측할 수 있다. 따라서, 최적 잔골재율은 커진다.

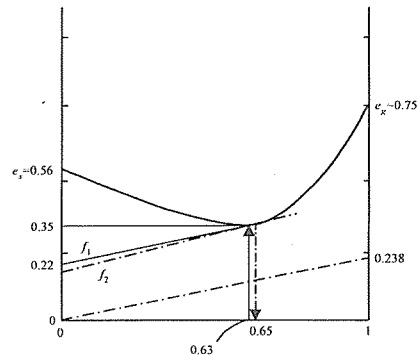
[표 2.2]는 각종요인이 최적 잔골재율에 미

[표 2.2] 최적 잔골재율에 영향을 미치는 요인

조 건	요 인 변 화	결 과	$f(x_0)$ 에의 영향	최적s/a에의 영향
W/C 일정	슬럼프가 크다	페이스트량 증가	δ_p 증대	작아진다.
슬럼프 일정	W/C가 작다 페이스트의 유동성이 작다	페이스트량 증가	δ_p 증대	작아진다.
W/C 일정 슬럼프 일정	잔골재의 조립율이 작다 굵은골재의 최대치수가 크다.	비표면적이 변화	δ_p 증대 ($\sigma_s - \sigma_g$)증대	작아진다.
페이스트량 일정	쇄사, 쇄석 사용	비표면적 증대 간극비 증대	σ, e 증대	커진다.



[그림 2.7] 굵은골재의 고유간극비에 따른 골재의 최밀 조성의 변화



[그림 2.8] 간극비곡선에 따른 최적잔골재의 추정

치는 영향을 종합한 것⁽⁷⁾이다.

[例題]

고유간극비가 0.56, 체적비표면적이 $162\text{cm}^2/\text{cm}^3$ 인 잔골재와 고유간극비가 0.75, 체적비표면적이 $6.2\text{cm}^2/\text{cm}^3$ 인 굵은골재에 대해서, [그림 2.8]과 같은 간극비곡선을 얻을 수 있고, 이 골재를 사용한 어느 배합의 콘크리트에서 최적 잔골재율이 37%이라는 것을 알 수 있게 되었다. 잔골재의 조립율이 0.20 작아질 때, 콘크리트의 컨시스턴시를 변화시키지 않는 것으로서 최적 잔골재율을 추정하시오.

[略解]

최적 잔골재율에 대응하는 골재조성을 x_p 라 하면

$$1 - x_p = 0.37$$

$$\therefore x_p = 1 - 0.37 = 0.63$$

간극비곡선에서 $x = 0.63$ 에 있어 접선 f_1 의 구배 $f'(x_p)$ 를 구하면, [그림 2.8]에서

$$f'(x_p) = \frac{0.35 - 0.22}{0.63} = 0.206$$

식(2.46)에서, 이 콘크리트의 잉여 페이스트 층두께를 추정하면,

$$\delta_p = \frac{f'(x_p)}{\sigma_s - \sigma_g} = \frac{0.206}{162 - 6.2} = 0.00132\text{cm}$$

잔골재의 조립율이 0.20만큼 작아졌을 때, 입자형상은 변하지 않는 것으로 하면, 잔골재의 평균입경은 2.1.3 (2)(c)의 예제보다 약 13% 작아진다.

한편, 체적비표면적은 입자형상이 일정하다면, 식(2.34)와 같이 평균입경에 반비례하기 때문에, 조립율이 0.20만큼 작아진 잔골재의 체적비표면적을 σ'_s 라 하면,

$$\sigma'_s = \frac{\sigma_s}{1 - 0.13} = \frac{162}{0.87} = 186.2\text{cm}^2/\text{cm}^3$$

이 잔골재를 사용했을 때의 최적조성을 x'_p 라 하면, 식(2.46)에서

$$f'(x'_p) = \delta_p(\sigma'_s - \sigma_g)$$

$$= 0.00132 \times (186.2 - 6.2) = 0.238$$

잔골재의 조립율이 변화하면 간극비곡선 및 잉여 페이스트 층두께가 변화하지만, 이러한 변화는 작다고 생각하고, δ_p 의 값과 [그림 2.8]을 그대로 이용하는 것으로 해서 접선 f_2 의 구배가 0.238이 되도록 하는 점을 구하면, x'_p 는 약 0.65가 되고, 최적 잔골재율은 35%로 37%보다 작아진다.

또한, 콘크리트 표준시방서에서는 잔골재의 조립율이 0.1만큼 작아질 때마다 s/a 는 0.5만큼 작게 하는 것으로 하고 있기 때문에, 이에 따른 보정 후의 s/a 는 36%이다.

상기의 방법을 실제로 사용하기 위해서는 최밀점부근의 간극비곡선을 상세하게 구할 필요가 있는 등 번잡한 경우도 있고 실용화되기 힘들다.

2.4 모르타르-굵은골재상계의 배합설계

(I) 콘크리트중에 있어서 굵은골재의 분산상태의 해석

(a) 굵은골재의 분산정도를 나타내는 지표

컨시스턴시가 일정한 조건하에서, 모르타르가 과다한 상태에서 조금씩 굵은골재량을 늘려가면 단위수량은 감소한다. 그러나, 굵은골재량이 어느 한도보다 많아지면 소요의 워커빌리티가 얻어지지 않기 때문에, 굵은골재는 모르타르중에 어느 정도 분산된 상태로 되어

있을 필요가 있다. 따라서, 콘크리트중에서 굽은골재의 분산정도는 콘크리트의 배합을 정하는 경우에 고려해야할 요인의 한 가지이다.

굽은골재의 분산정도는 굽은골재의 겉보기 간극비 e'_g , 굽은골재 입도의 평균분산거리 t_g , 콘크리트 1m³중에 포함된 굽은골재의 입자체적 g 와 굽은골재 1m³중에 포함된 입자체적 g_0 의 비 g/g_0 등을 지표로서 나타낼 수 있다.

(b) 모르타르-굽은골재계에서 굽은골재상의 겉보기 간극비

굽은골재만을 고체입자로 생각하고, 굽은골재 이외의 모두를 공극이라고 한 겉보기 간극비를 e'_g 라 하면, 공극체적은 모르타르 체적과 같아져,

$$e'_g = \frac{m}{g} \dots\dots\dots(2.49)$$

여기에서,

m : 콘크리트 1m³에 포함된 모르타르의 체적 (공기포를 포함)(m³)

g : 콘크리트 1m³에 포함된 굽은골재의 입자체적(m³)

이다.

(c) 굽은골재 입자의 평균분산거리

굽은골재의 고유공극을 채운 뒤 남은 모르타르가 굽은골재의 표면을 균일한 두께 δ_m 으로 덮는다고 하면, 굽은골재 입자의 평균분산거리 t_g 는 $2\delta_m$ 이다.

잉여 페이스트의 경우와 마찬가지로의 계산에 따라, 모르타르 체적 m 은 다음식으로 표현된다.

$$m = g(e_g + \sigma_g \delta_m) \dots\dots\dots(2.50)$$

$$\therefore t_g = 2\delta_m = \frac{2}{\sigma_g} \left(\frac{m}{g} - e_g \right) \dots\dots\dots(2.51)$$

(2) 굽은골재의 분산정도를 요인으로 하는 배합이론

(a) 배합요인으로서의 m/g

식(2.49), (2.51)은 m/g 가 굽은골재의 분산정도에 관련한 배합요인이라는 것을 나타내고 있다. m/g 가 주어지면, 콘크리트 1m³에 대해서는

$$m + g = 1$$

이므로

$$g = \frac{1}{1 + \left(\frac{m}{g} \right)} \dots\dots\dots(2.52)$$

에서, 콘크리트 1m³에 사용한 굽은골재의 입자체적, 즉, 절대용적이 구해진다.

g 가 구해지면, 콘크리트 1m³당의 잔골재 절대용적 S 는 콘크리트 체적에서 잔골재 이외의 사용재료의 절대용적과 공기량을 뺀에 따라 구해져 모든 재료의 단위량이 정해진다.

이와 같이, m/g , 또는 g/m 은 배합설계에 사용될 수 있는 가능한 요인이고, 아주 된비법 콘크리트의 다짐의 용이와의 관계 등이 연구되고 있다.⁽⁸⁾

(b) 단위 굽은골재용적과 굽은골재의 분산정도의 관계

굽은골재 1m³중에 포함된 입자의 총체적을 g_0 , 공극체적을 v_0 , 굽은골재의 고유간극비를 e_g 라 하면,

$$g_0 + v_0 = 1, \quad e_g = \frac{v_0}{g_0}$$

이므로

$$g_0 = \frac{1}{1 + e_g} \dots\dots\dots(2.53)$$

또한, 콘크리트 1m³중에 포함된 굽은골재의 총입자체적을 g , 모르타르 체적을 m , 굽은골재상의 겉보기 간극비를 e'_g 라 하면,

$$g + m = 1, e'_g = \frac{m}{g}$$

에서

$$g_0 = \frac{1}{1 + e'_g} \dots\dots\dots(2.54)$$

식(2.54)와 (2.53)의 비를 취하면,

$$\frac{g}{g_0} = \frac{1 + e'_g}{1 + e'_g} \dots\dots\dots(2.55)$$

로 된다.

g/g_0 는 굽은골재의 고유간극비 e_g 와 겉보기 간극비 e'_g 를 포함하므로, 굽은골재의 분산정도를 나타내는 지표로 생각할 수 있다. 그래서,

$$\begin{aligned} \frac{g}{g_0} &= \frac{\text{콘크리트 1m}^3\text{중의 굽은골재의 총입자체적}}{\text{굽은골재 1m}^3\text{중의 굽은골재입자의 총체적}} \\ &= \frac{\text{콘크리트 1m}^3\text{에 쓰이는 굽은골재의 용적}}{\text{굽은골재 1m}^3\text{의 용적}} \end{aligned}$$

이다.

배합설계에 실제 사용되고 있는 단위 굽은골재용적은 「단위 굽은골재량을 그 굽은골재의 단위 용적중량으로 나눈 값」이지만, 단위 굽은골재량은 표건상태의 중량, 단위 용적중량은 절건상태의 중량이기 때문에, 흡수율에 대한 보정을 실시하면,

$$\text{단위 굽은골재용적} = \frac{g}{g_0} \left(1 + \frac{Q}{100}\right) \dots\dots(2.56)$$

Q : 흡수율

이다. 따라서, 단위 굽은골재용적은 콘크리트 중에서 굽은골재상의 분산정도에 직접관계하

고 있는 배합요인이다.

식(2.55)의 e'_g 와 m/g 와 같기 때문에

$$\frac{g}{g_0} = \frac{1 + e_g}{1 + \left(\frac{m}{g}\right)} \dots\dots\dots(2.57)$$

가 된다. 바꾸어 말하면, 단위 굽은골재용적은 m/g 를 요소로서 포함한 배합요인이다.

〔例題〕

표건비중이 2.66, 흡수율이 2.5%인 굽은골재를 사용하고, 단위 굽은골재용적을 0.70으로 한 콘크리트에 대해서, 굽은골재상의 겉보기 간극비와 평균분산거리를 구하시오. 단, 굽은골재의 고유간극비는 0.75, 비표면적은 2.33cm²/g로 한다.

〔略解〕

$$\text{단위 굽은골재용적} = \frac{g}{g_0} \left(1 + \frac{Q}{100}\right)$$

에 있어서, $Q=2.5\%$, 단위 굽은골재용적=0.70으로 하면

$$0.70 = \frac{g}{g_0} \left(1 + \frac{2.5}{100}\right)$$

$$\therefore \frac{g}{g_0} = 0.683$$

식(2.55)로부터

$$\frac{g}{g_0} = \frac{1 + e_g}{1 + e'_g}$$

이므로, 겉보기 간극비는

$$e'_g = \frac{g_0}{g}(1_{e_g}) - 1 = \frac{1}{0.683}(1 + 0.75) - 1 = 1.56$$

이 굵은골재의 체적비표면적은

$$\sigma_g = \rho_g S_{Ag} = 2.66 \times 2.33 = 6.20 \text{ cm}^2 / \text{cm}^3$$

평균분산거리는 식(2.51)에 따라

$$\begin{aligned} t_g &= \frac{2}{\sigma_g} \left(\frac{m}{g} - e_g \right) \\ &= \frac{2}{6.20} (1.56 - 0.75) = 0.26 \text{ cm} \end{aligned}$$

참고문헌

- (1) S. Popovics : Relation Between the Change of Water Content and the Consistence of Fresh Concrete, Magazine of Concrete Research, Vol.14, No.41, pp.99~108, July 1962
- (2) 日本コンクリート工學協會, フレッシュコンクリートの舉動研究委員會報告書, 1990. 3
- (3) C. T. Kennedy : The Design of Concrete Mixtures, Proc. ACI, Vol.36, pp.373~400, Feb. 1940
- (4) 土木學會 콘크리트標準示方書(施工編), p.26, 1991. 9
- (5) 松下, 田中, 近田 : 碎砂콘크리트의細骨材率に關する一考察, セメント技術年報42, pp.88~91, 1988
- (6) T. C. Powers : The Properties of Fresh Concrete, John Wiley & Sons Inc., p.284, 1968
- (7) 巖崎訓明 : 콘크리트配合の原點, セメント콘크리트 No.564, pp.21~27, 1994. 2
- (8) 加賀谷, 徳田, 石川 : 超硬練り콘크리트의配合要因と締固めの容易さの關聯性についての基礎實驗, 土木學會論文集 No.472, V-20, pp.91~99, 1993.8.