

콘크리트의 펌프 압송성

정 연 식

(동양중앙연구소 건설재료연구팀 선임 연구원)

1. 펌프 압송성

콘크리트의 펌프 압송능력이라고 하는 것은 후레쉬 콘크리트의 펌프 압송의 능력으로, 후레쉬 콘크리트와 압송 조건에 영향을 미치는 성질을 의미한다. 이와 같이 콘크리트의 펌프 압송은 후레쉬 콘크리트의 레올로지(유동 특성)의 인자라고 해도 과언이 아니다.

콘크리트의 펌프 압송 공법은 건축, 토목 분야에서 가장 넓게 보급되어 있고 일반적인 공법으로서 그 위치는 확실히 확립되어 있는 상태이다. 그러나 후레쉬 콘크리트의 콘시스턴스 척도인 레올로지 성질과 펌프 압송 상태를 이론적으로 관련지어, 실시공에 있어서 압송능율을 예측하는 기술은 아직 확립되어 있지 않은 실정이다.

예를 들어 펌프 압송성의 예측은 일반적으로 콘크리트의 성질로서 슬럼프값 만을 이용하지만, 최근 실용되기 시작한 고유동, 고강도 콘크리트, 수중콘크리트 등에서는, 보통 콘크리트보다 점성이 큰 쪽이 대부분이다. 이 때문에, 실험 결과를 기초로 종래 경험적인 측면에서는 통용되지 않은 경우가 적지 않다. 다시 말해서, 이론적인 예측 수단의 결여가, 펌프 공법의 보편적인 기술 축적에 커다란 장애가 된다고 판단된다.

또한 최근에는, 건축 분야에서도, 장대한 수직, 수평 압송 거리 및 압송량이 요구되는

현상이 증가하고 있고, 동시에 압송 부하의 증대에 의해 생기는 문제점이 일부 지적되고 있다. 고점성, 장거리, 고층 압송에 따른 고압력등, 콘크리트의 펌프 공법은, 점점 가혹한 조건을 극복해야 한다.

본문에서는 후레쉬 콘크리트의 관내 유동을, 레올로지적인 입장에서 콘크리트의 각종 물리적인 성질이 관내 압송성에 미치는 영향에 대해서 논하겠다. 관내 유동을 레올로지적인 입장에서 고찰하는 것은 전혀 새로운 것은 아니다. 물성을 레올로지 모델로 표현하면, 압송 기구를 물리적으로 설명할 수 있다. 콘크리트의 펌프 압송성에 관해서는, 후레쉬 콘크리트와 관내 벽면과의 마찰이 중요한 인자가 된다. 이 미끄러짐(마찰) 저항성을 정확히 파악하고, 펌프 압송성의 예측에 이용하는 것이 이 분야의 최중요 과제라고 판단된다.

2. 관내 유동의 기초 이론

액체가 좁은 관내를 유동하는 경우의 기초 이론은 아래와 같다. 이 경우, 액체와 벽면의 경계면에서는 상대적인 이동(미끄러짐)이 발생하지 않는다고 가정한다.

2.1 뉴턴유체의 유속분포

여기에서는, 원형 단면의 관내에 있어서 층

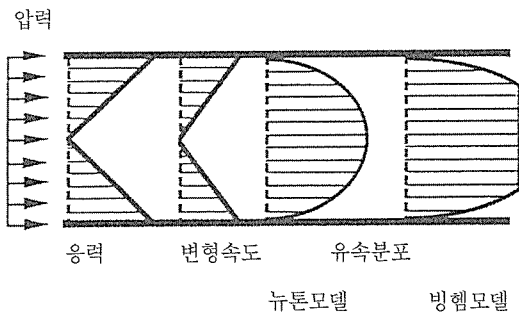
류의 기초적인 이론에 대해서 논하겠다. 이 이론에서는 경계 조건으로서, 관내 벽면과 유체 사이에 미끄러짐이 생기지 않는다고 가정함으로 후레쉬 콘크리트의 관내 유동과는 다르다.

층류라고 하는 것은, 원형 단면에 반경 방향으로 유속이 생기지 않은 상태를 의미하며 소용돌이가 생기지 않고 전체의 흐름이 관의 축 방향과 일치하는 것을 말한다. 일반적으로 이와 같은 조건하에서는 뉴턴모델로 아래와 같은 식으로 유도한다.

$$V_p(r) = \frac{P(R^2 - r^2)}{4\eta L} \dots\dots\dots(1)$$

여기서, $V_p(r)$: 유속 분포, P : 압력, R : 관의 반경, r : 중심에서부터의 거리($R \geq r \geq 0$)
 η : 점성, L : 관의 길이

이식은, 방사선성의 유속 분포를 표시하고, 중심에서 최대 유속이 되며 관내 벽면에서 유속이 0이 된다. 중심에서 r 만큼 멀어짐에 따라 압력을 받는 단면적(r 에서 내부 원의 면적)은 r^2 에 비례해서 증대하는 것에 반해 전단을 받는 면적(원통형의 측면적)은 r 의 1승에 비례해서 증대한다. 이 때문에 중심에서 선형으로 전단 응력 및 전단 변형 속도가 발생한다(그림 1 참조). 유속은 변형 속도를 적



(그림 1) 관내를 흐르는 점성체, 점소성체의 전단 응력, 전단 변형 속도, 유속 분포

분해서 얻어지기 때문에 2차 관수로 표현되는 유속 분포가 된다.

2.2 빙햄유체의 유속 분포

항복치를 갖는 빙햄모델의 경우도 (그림 1)에 표시한 전단 응력의 선형 분포는 같지만, 관 중심 부근의 전단 응력이 항복치보다 작은 부분에서는 항복이 일어나지 않는다(다시 말해 콘크리트가 변형하지 않는다).

이 항복이 일어나지 않은 부분을 전류라 하고, 그 반경을 전류 반경이라고 부른다. 전류 반경은, 관의 길이, 압력 및 항복치의 관수이고 빙햄 모델에서는 0이 안된다. 또한 전류 반경이 관경보다 큰 경우는, 단면전역에서 항복이 생기지 않는다는 것을 의미하고 콘크리트가 변형하지 않은 상태가 된다.

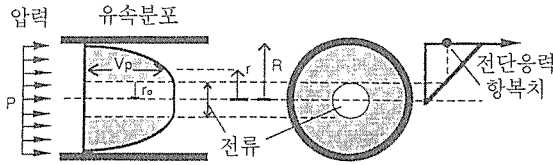
식 (1)과 마찬가지로, 빙햄 모델의 유속 분포는 다음식으로 표현할 수 있다.

$$V_p(r) = \frac{P(R^2 - r^2)}{4L} - \tau_y \frac{y(R-r)}{\eta} \dots\dots(2)$$

여기서, τ_y : 항복치

식 (2)가 성립하는 것은, $r > 2\tau_y L / P = r_0$ (r_0 : 전류 반경)의 경우이다. r_0 보다 내측(전단응력이 항복치보다 작은 부분)에서는 전류가 되고, 이 부분의 유속은 $V_p(r_0)$ 에서 일정하다.

또한 유속 분포는, 전단 응력분포에서 항복치를 뺀 것을 적분해서 얻어지고, (그림 2)에 표시한 것과 같이 도함수는 연속적인 곡선이 된다. 당연하지만, 식(2)는 식(1)를 포함하고 있기 때문에 이하 빙햄 모델에 대해서 논한다.



(그림 2) 병행 모델의 유속 분포와 전류

2.3 유량과 압력 손실의 관계

유속 분포 곡선을 회전축으로 돌려 적분하면, 관내를 흐르는 유체의 총유량이 얻어지 때문에, 식(2)에 표시된 방사선과 전류 부분의 회전 체적을 계산하면 이하와 같이 된다.

$$Q_v = \frac{\pi P R^4}{8 L \eta} \left\{ 1 - \frac{4r_0}{3R} + \frac{1}{3} \left(\frac{r_0}{R} \right)^4 \right\} \dots\dots(3)$$

여기서 Q_v : 단위 시간당 유량

식(3)은 $r_0 < R$ 의 조건하에서 성립한다. 유량은 소성 점도 η 에 1차적으로 반비례하고, 압력 손실(P/L)에 비례한다. 또한 관경 R 은 유량에 4승으로 영향을 미친다.

3. 미끄러짐을 동반하는 관내유동 이론

후레쉬 콘크리트는 균질한 액체와 전혀 다르다. 펌프 압송에 사용되는 수송관은 장기간 사용하면 후레쉬 콘크리트가 관내 벽면을 깎아 내려 점점 얇고 거칠게 된다. 미끄러짐의 정의는 정확한 것은 아니지만, 콘크리트와 관내벽의 경계 부근 모르타르 또는 페이스트의 전단 변형도 포함한 현상이라고 말할 수 있다. 경계 부근에서는 조골재의 위치가 제약을 받기 때문에 이부분에서는 겉보기상 조골재 체적율이 저하하고 전단 저항성이 감소한다. 또한 압력에 의한 수분 또는 페이스트 분리에

기인하는 국소적인 다른 층이 형성될 가능성도 있다. 이상과 같은 각종 원인의 결과로서 후레쉬 콘크리트는 관내를 미끄러져 이동하지만, 이 때에 발생하는 미끄러짐 저항성에 관해서 정량적인 파악은 현단계에서는 아직 되어있지 않다.

3.1 미끄러짐 저항성

관내 압송시 후레쉬 콘크리트의 미끄러짐 저항성은, 그 메카니즘에 대해서 정확한 규명이 되어 있지도 않고, 각종 요인의 영향을 복잡하게 받는다. 미끄러짐 저항력은, 경계면 근방의 모르타르 또는 페이스트의 액상 매트릭스층의 점성 저항과 골재등의 고체 마찰 저항에 의한 것이다.

콘크리트 압송에 관한 기존 연구의 대부분은, 전항에서 논한 전단 변형에 의한 관내 유동은 아니고, 미끄러짐에 의한 것만 전체 전류라고 가정되어 있다. 다시말해서, 보통의 콘크리트에서는, 항복치보다 미끄러짐 저항 응력이 작고 관벽면의 전단 응력이 항복치 이하의 상태에서 콘크리트가 패의 상태로 이동하는 것을 가정하고 있다.

미끄러짐 저항 응력에 영향을 미치는 요인은 미끄러짐 속도와 미끄러짐면에 작용하는 수직 응력이다. 전자는 먼저 이야기한 액상 매트릭스층의 점성 저항에, 후자는 골재의 고체 마찰 저항에 깊이 관여한다고 생각된다.

우선, 미끄러짐 저항 응력을 미끄러짐 속도에 비례하는 모델로 표현하면 이하와 같다.

$$\tau_s = \eta_s \beta + \tau_r \dots\dots\dots(4)$$

여기서 τ_s : 미끄러짐 저항응력, η_s : 미끄러짐 점성 β : 미끄러짐 속도, τ_r : 미끄러짐 항복치

이식을 이용하는 경우, 유량과 압력 손실은 선형 비례하기 때문에 실제의 펌프 압송 실험 결과를 비교적 잘 표현해 준다.

한편으로 후레쉬 콘크리트와 타재료의 미끄러짐 거동은, 미끄러짐 속도에 관계 없이, 수직 응력과 선형 비례로 표현되는 것도 많고, 실험실 수준에서의 실험에서 그 타당성이 증명되고 있다. 이것은 이하와 같은 모델로 표현된다.

$$\tau_s = \mu \sigma_n + C \dots\dots\dots (5)$$

여기서 μ : 미끄러짐 마찰계수, σ_n : 미끄러짐면에 작용하는 수직 응력 C : 미끄러짐 부착력

식(5)에서 표현된 미끄러짐 저항력을 펌프 압송의 이론에 적용하면 압력 손실은 유량과는 무관계가 되고, 실험 결과를 설명 할 수 없게 된다. 그러나 역으로 관내 압력이 높은 곳에서 저항이 커지기도 하고 테퍼관과 같이 고체와 관내 벽면의 접촉압이 상승하는 부분에서 손실이 크게되는 현상을 설명할 수 있다. 실험에서도 배관의 처음과 끝부분에서 압력 손실이 크게 다르다는 보고도 있어서, 이현상은 먼저 식(4)의 미끄러짐 모델에 의한 전체 전류에서는 설명할 수 없다.

식(5)의 관내 압력에 비례하는 저항력을 가정하면, 관측 방향의 압력 분포는 선형이 아니고 하단에 오목한 부분의 e 관수 곡선(그림 3 참조)이 되고, 압력 손실은 일정하게 되지 않는다. 이 현상은 실험적으로 명확하게 밝혀져 있지는 않다.

다음으로, 미끄러짐 속도와 압력에 의존하는 미끄러짐 저항력의 모델로 식(4) 및 식(5)를 포함한 다음식을 생각할 수 있다.

$$\tau_s = S_1 \beta \sigma_n + S_2 \beta + S_3 \sigma_n + S_4 \dots\dots\dots (6)$$

여기에서 S_1, S_2, S_3, S_4 : 미끄러짐에 관한 파라메타

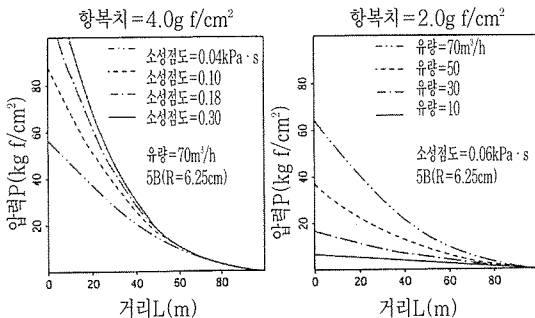
이 미끄러짐 저항 모델을 적용시킴으로서 거의 대부분의 실험 결과를 설명하는 것이 가능하다.

3.2 전단 층류와 미끄러짐을 포함한 유동

관내 벽면 근방에 생기는 최대 전단 응력 τ_{max} 는

$$\tau_{max} = \frac{P \pi R^2}{2 \pi R L} = \frac{PR}{2L} \dots\dots\dots (7)$$

여기에서 P : 압력이고, 이 값은 미끄러짐 응력과 균형이 맞는 속도에서 미끄러짐이 발생한다. 보통 단위 길이당 압력 손실(P/L)은 0.05~0.30 kg f/cm²/m이지만, 관경을 5cm라 하고 이 값을 식(7)에 대입하면 1.25~7.5 kg f/cm² 범위의 전단 응력이 된다. 압송에 이용되고 있는 콘크리트의 항복치는 4.0 kg f/cm² 이하이고, 슬럼프가 20cm를 넘는 고유동 콘크리트에서 항복치는 1.0 kg f/cm² 이하가 되는 것도 있다. 일반적으로 이와 같은 콘크리트에서도 펌프 압송할 때의 압력 손실은 작아지지



(그림 3) 압력 분포의 계산 결과

않는다. 다시 말해서 전단 응력은 명백하게 항복치 보다 커지는 가능성이 있고 완전 전류에서 콘크리트가 압송되고 있다고 하는 가정에서는 적용한계가 있다. 미끄러짐이 생겨도 콘크리트에 가한 압력이 감소하는 것은 아니기 때문에, 콘크리트가 변형 유동하고 전단 층류도 생긴다고 하는 생각이 자연스러울 것이다.

다시 한번 관내 유동의 메카니즘을 정리하면 다음과 같다. 압력 손실(어느구간의 입구와 출구의 압력차)은 관벽면에 작용하는 미끄러짐 저항력이 반력이되어서 생긴다. 그 구간의 압력은 이미 알고 있기 때문에 그것과 균형이 되는 미끄러짐 속도가 생긴다(미끄러짐 속도가 0이 되는 경우도 있다). 또한, 마찬가지로 압력 손실에 의해서 콘크리트는 전단 변형한다. 미끄러짐과 전단 변형의 양자에 의한 유량을 더한 것이 전체의 유량이다.

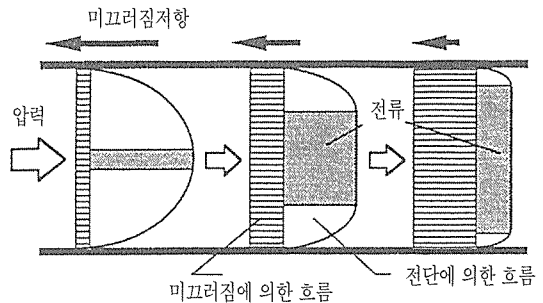
$$Q = Q_s + Q_r \dots \dots \dots (8)$$

여기에서, Q_s : 미끄러짐에 의한 유량, Q_r : 전단 층류에 의한 유량

전항에 이야기한바와 같이 빙행모델에서, Q_v 은 압력의 절대량은 아니고 압력 손실에 단순히 비례하지만, Q_s 는 압력이 큰 부분에서는 작아진다. Q 는 일정하게 되지 않기 때문에, Q_s 가 변화하면 Q_v 도 변화한다. 다시 말해서 압력 손실이 변화하게 된다.

상기의 현상을 정리하면 (그림 4)와 같이 배관중을 통과함에 따라 전단 층류에 의한 유량은 점차 작아지고, 역으로 미끄러짐에 의한 유량은 점차로 커진다는 것을 의미함으로, 유동 모드가 관내에서 일정하지 않게 된다. 이 현상은 수치 해석에 의해 구하는 것이 가능하고 각 요인이 압력 분포에 미치는 영향을 정량적으로 파악할 수 있다. 그러나 해석의 입

력이 되는 미끄러짐 저항력의 결과가 부족하여 실용적인 사용에는 되어 있지 않다. 또한 상기 현상이 문제가 되는 것은 비교적 점성이 높은 콘크리트를 장거리 압송하는 경우이고, 보통 규모의 공사이면 압력 손실은 일정하다고 보는 종래의 예측 방법에서는 문제가 없다고 생각한다.



(그림 4) 유속 분포의 변화 상태

4. 후레쉬 콘크리트의 압송

후레쉬 콘크리트의 펌프 압송은, 지금까지 논한 액체의 관내 유동 이론에 의해 완전히 설명할 수 있는 것은 아니다. 콘크리트 압송에 상기 이론적인 예측을 적용시키려고 하면 다음과 같은 문제에 직면하게 된다.

- 1) 배관은 수평한 직선만을 가지고 하는 것이 아니다. 또한 관경도 일정하지 않다.
- 2) 펌프 압력은 일정하지 않고, 통상 맥동하고 있다.
- 3) 후레쉬 콘크리트는, 균질한 액체는 아니다. 더군다나 압송 과정에서 상태가 변화하는 가능성이 있다.

1)의 문제에 대해서는 테퍼관, 밴드관, 수직 배관 등의 조건을 말한다. 또한 2)의 문제는 등속도 운동에 따른 역학에 의해 실제 맥동 거동을 표현하는 경우에 정도를 확인할 필요가 있는 것을 표시한다. 가장 중요한 문제

인 3)은, 펌프 압송 예측에 필요한 입력 결과의 측정 방법에도 관련이 있다.

이하에 이들 각각의 문제에 대해서 자세히 설명하겠다.

4.1 수직 압송

수직 방향으로 압송하는 작업은, 매년 증가하는 추세이고 특히 종래에는 없었던 수 100m의 수직 압송도 하고 있는 실정이다. 그러나, 수직 압송은 사전에 충분히 압송 실험하는 것이 대단히 곤란하다. 또한 실제 한 실례에 대해서도 상세한 결과는 상당히 부족하다.

전술에 이야기 한 것과 같이 이상적인 유체의 압송이면 배관이 수평에서 수직으로 변화해도, 유동에 의한 압력 손실은 전혀 변화하지 않는다. 따라서 수직 배관부의 단위 길이 당 압송 압력 손실은, 그안에 흐르는 유체의 비중분이 가산되는 것뿐이다.

후레쉬 콘크리트의 수직 압송 실험에서도 수평 압송과 비교해서, 콘크리트의 비중분만 증가한 압력 손실이 관찰되는 것이 거의 대부분이다. 소수의 실험 보고에서는 이것보다 큰 압력 손실이 관찰된 예도 있고, 또한 거꾸로 비중분을 더한 값보다 작다는 예도 있다.

비중분의 증가에 의해 압력 손실이 크게되는 경우는, 압력의 증가에 의한 것이라고 생각할 수 있다. 다시말해서 관내 압력 자체가 크게 되기 때문에 압력 손실의 주요한 원인인 관내 벽면에 있어서 미끄러짐 마찰 저항이 증대하기 때문이다. 따라서 이 경우는 수직 배관 고유의 것은 아니고, 수평 배관에서도 장거리 압송이 되면 같은 현상이 발생할 것이다.

한편 실험에서는 수평 배관의 경우에 비해 비중분을 가산한 값보다도 낮은 압력 손실이 수직 배관에서 관측되어진 것이 있지만, 이 현

상을 설명할 유력한 이론은 없다. 수평 압송시 중력과 맥동에 의한 유동성의 차이등이 생각할 수 있지만, 상세한 보고는 되어 있지 않다.

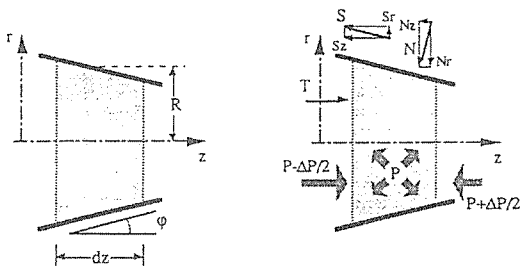
압력 손실의 측정 결과는, 맥동하는 압력 파형에서 읽은 것이다. 측정 방법의 신뢰성과 실험 결과의 정리 방법도 문제가 되고, 수직 배관에 있어서 상기 문제를 해결하기 위해서 더욱 상세한 정보를 축적할 필요가 있다.

4.2 테퍼관

테퍼관의 압력 손실에 관해서는 대단히 많은 연구가 보고되고 있고, 이 부분의 막힘 사고는 펌프 시공에 있어서 극복해야만 하는 중대한 과제이다. 또한 콘크리트 압송 기술의 자동화를 생각하는 경우에, 분지 배관과 테퍼의 수요가 감소하는 것은 생각할 수 없는 부분이다.

테퍼관내의 막힘은, 콘크리트중의 조골재 인터블럭킹에 기인하는 현상이라는 것은, 다수의 실험적 검토에서 증명되었고 조골재와 매트릭스 모르타르의 분리가 관련이 있다고 한다. 조골재가 국소적으로 블록을 일으킬 때, 모르타르 부분만 먼저 흐르는 것이 된다. 이 때 조골재 사이에 모르타르가 흐르는 저항이 크면, 즉 모르타르의 점성이 높으면 조골재의 블록을 파괴할 가능성이 높다. 거꾸로 모르타르의 점성이 낮아 조골재 사이를 모르타르가 적은 저항으로 흐를 때에는, 조골재의 블록에 가해지는 힘이 부족해서 파괴되지 않고 조골재의 블록은 점점 성장하게 된다. 조골재의 블록이 작을 때에 파괴되는 경우에 테퍼부에 있어서 유동 저항은 그다지 크게되지 않는다. 테퍼관의 막힘은 극히 우발적인 현상이라고 말할 수 있다.

이하에 테퍼관을 흐르는 소성 유체의 저항에 관한 이론을 설명한다.



(그림 5) 테퍼관내 힘의 균형

[그림 5]에 표시한 것과 같이 테퍼관의 일부를 떼어 미소한 구간에 움직이는 힘을 생각한다. 콘크리트의 내부에는 압력이 걸려 있고 또한 테퍼관에는 반력이 작용한다. 콘크리트가 등속도 운동을 하고 있다고 가정하면, 이것을 전진시키려는 힘 T는 미소 구간의 입구와 출구의 압력차 ΔP 에 의해 생긴다. 이것에 대해 반력으로서의 추진력 T에 의해 생기는 측면면 추진력 N과, 콘크리트 이동에 저항하는 미끄러짐 마찰 저항인 측면면 평행력 S로 분해된다.

축 방향력의 균형은,

$$T = Nz + Sz \dots\dots\dots (9)$$

가 되고 N과 S의 관계는 미끄러짐 저항의 구성측에 의해 표시된다. 예를 들어 클롱의 마찰 저항 모델을 이용하면, 아래와 같이 된다.

$$S = \mu(N + Pat) + Cat \dots\dots\dots (10)$$

여기서 μ : 마찰계수, C: 부착응력,
At: 테퍼관측벽의 면적

더욱이 콘크리트를 주변에서 압축하고 미세한 변형을 일으키는 응력 σ_r' (평균압력 P를 뺀 편차 응력)는 다음 식으로 표시된다.

$$\sigma_r'Az = Nr - Sr \dots\dots\dots (11)$$

이상의 3식이 테퍼관내의 유동 기본식이 고, 이것을 정리하면 테퍼관의 압력 손실에 관한 일반식으로서 다음과 같은 식이 유도된다.

$$\frac{\Delta p}{dz} = \frac{2}{R}(\kappa\sigma' + \lambda\tau_h) \dots\dots\dots (12)$$

$$\kappa = \frac{\sin\phi + \mu\cos\phi}{\cos\phi - \mu\sin\phi} \quad \lambda = \frac{1}{(\cos\phi - \mu\sin\phi)\cos\phi}$$

여기서 $\tau_h = \mu P + C$ (직선관의 미끄러짐 저항력, 단 μ 및 C는 일반적으로 미끄러짐 속도의 관수로 표시된다)

ϕ : 테퍼관의 각도

다시 말해 테퍼관의 압력 손실은, 관벽에 있어서 미끄러짐 저항력과 콘크리트를 반경 방향에 압축 변형시키는 점성 저항을 더한 값이다. 이 중 전자는 벽면이 축에 대해 약간의 각도를 가지고 있기 때문에 극히 적은 것이 크게 되지만, 직선관에 있어서 미끄러짐 저항력과 거의 변하지 않는다고 생각해도 좋다. 후자의 콘크리트 점성 변형에 의한 저항력은, 콘크리트의 레올로지 모델에 관련된다.

만약, 콘크리트를 균질한 빙햄유체로 가정하면 상기 이론에서 테퍼관의 압력 손실은 대단히 작게 된다. 예를 들어 슬럼프 18cm의 보통 콘크리트를 $30m^3/h$ 정도로 압송하는 경우, 5B-4B를 길이 1m로 해도 압력 손실은 직관의 경우와 비교해 3%정도 크게되는 것에 지나지 않는다. 실제 압송 실험 결과에 있어서도 순조롭게 흐르는 경우에는 테퍼부의 압력 손실은 거의 직선관과 같다는 보고가 있다.

그러나 이 결과는 테퍼의 환산 길이인 수평 직선관의 수 배라고하는 값과 전혀 일치하지 않는다. 일본 지침에 표시되어 있는 테퍼관의 환산 길이는 먼저 설명한 것과 같이 우발적으

로 발생하는 막힘의 위험을 회피하기 위해서 의 안전 계수라고 생각할 수 있다. 이 계수 등의 정도까지 저감하고 합리화가 될 수 있는가에 대해 현상은 불투명하다.

콘크리트를 빙햄 모델로 표시하는 것은 테퍼부에서 발생하는 우발적으로 큰 압력을 설명할수 없다. 그것은 이 현상이 조골재의 운동에 의해 인터블럭킹에 기인하는 것이기 때문이다. 일반적으로 고체 입자가 다량으로 혼합된 유체에서는 내부 응력의 상승과 함께 항복치가 커지는 현상이 관측된다. 이 상태는 레올로지 모델에서 몰·쿨롱모델을 넣은 복합 모델에서 표시할 수 있다. 그러나, 실험에서 얻어지는 레올로지 파라메타는 내부 응력이 수 $100\text{gf}/\text{cm}^2$ 정도까지의 압력으로 측정된 것도 있고, 10배에서 1000배에 가까이 달하는 상황하의 펌프 압송시 콘크리트의 상태를 측정할 예는 없다. 저응력에서 얻어진 측정값이 그 상태로 고응력에서도 이용할수 있다고 가정하면 이들 실험 결과를 이용해서 테퍼부의 압력 손실이 직선관의 수 10배가 되는 계산 결과가 얻어진다. 그러나 실제에서 항상 막힘이 일어나지 않는다. 고압력하에 있어서 콘크리트의 변형 저항성을 측정하고, 이들 정보를 확률적으로 취급하는 것이 테퍼부의 막힘을 예측하는 기술에 필수 불가결하다.

4.3 밴드관

밴드관을 실험적 혹은 이론적으로 취급한 연구는 비교적 적다. 이것은 이 부분의 압송이 비교적 트러블이 없다는 것을 의미한다. 테퍼관과 비교해서 밴드관에서는 내부 콘크리트가 반경 방향으로의 압축 변형이 필요가 없기 때문이다. 이것이 조골재에 의한 막힘이 발생하기 어려운 이유이다.

콘크리트의 전단 변형(층류)가 없다고 하

고 콘크리트가 미끄러짐에 의해 관내를 이동한다면 밴드관의 입구에서 콘크리트는, 축방향에 관한 횡변형을 강제적으로 받는다. 이것은, 밴드관의 내측에 있어서 축방향 압축 및 외측에 있어서 축방향 인장을 의미한다. 일단 변형하면, 밴드관내를 이동하는 사이에 콘크리트가 변형할 필요는 없다. 이 때의 미끄러짐 저항은 흐름 방향으로 변화하는 힘(원심력)을 빼면 직선관과 같다.

또한 밴드관의 출구에 있어서 다시 한번 상기 역방향의 횡변형을 받는다.

한편 콘크리트를 완전한 유체라고 가정하면 미끄러짐이 아니고 전단 층류에 의해 직관을 흐르는 콘크리트가 밴드관내에서는, 휘어가는 강의 흐름과 같이 밴드관 중심층보다 외측에서 최대 유속과 같이 되는 흐름이 발생한다. 이 때의 전단 변형은 직선관에 있어서 크지 않기 때문에 후레쉬 콘크리트의 전단 변형 성질에 의해 밴드관의 압력 손실을 논하는 것이 타당하다.

상기 2가지의 현상이 겹쳐 밴드관내의 콘크리트 실제 거동이 설명된다고 생각되지만, 비교적 슬럼프가 낮은 것이 전자, 높은 것이 후자의 유동 거동이 지배적이 된다.

특히 건축에 이용되는 높은 슬럼프의 콘크리트에서 밴드관내의 유동은, 후자의 큰 전단 변형을 취하는 것이 되고, 콘크리트의 점성과 항복치에 지배된다. 이 점에서는 먼저 표시한 테퍼관과 대조적이다. 예를 들어 조골재가 없는 모르타르에서는 밴드관내의 막힘이 테퍼관보다 먼저 발생할 가능성이 있다. 고유동 콘크리트와 같이 조골재가 적은 배합에서는 테퍼관의 막힘 발생 확률이 낮지만, 매트릭스 모르타르의 경시변화 등에서 유동성 저하(슬럼프 로스 등)가 발생한 경우에서는, 오히려 밴드관에 있어서 막힘의 발생 확률이 높아진다는 것에 주의할 필요가 있다.

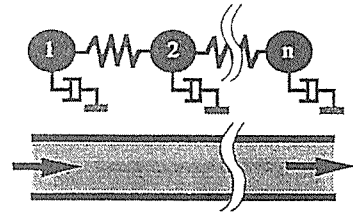
4.4 펌프 맥동

여기에서 대부분 논한 이론은, 관내를 콘크리트가 등속도로 유동하는 상태를 전제로 한 것이다. 그러나 실제 펌프 압송에서는 펌프의 형식에 따라 변형 상태가 틀러지고 수 초를 주기로 맥동하고 있다. 펌프의 압력을 일정으로 한 정적인 해석 결과 또는 관측한 관내 압력을 평균화한 측정 결과를 이용해서, 실제의 정적인 거동을 표시·예측하는 것의 타당성은 충분히 확인되어져 있지 않다.

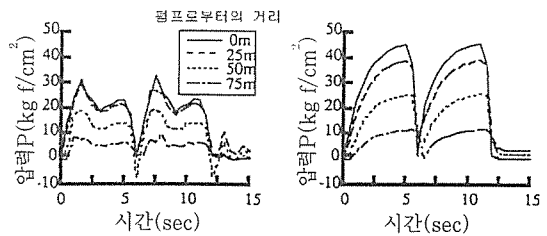
맥동을 고려한 동적인 해석을 한 연구 결과는 대단히 적다. 그러나 이러한 종류의 해석에 의해 장거리 압송과 수직 압송시 발생하는 압력 파형의 피크성상 등의 특이한 현상을 설명할 수 있다.

펌프 압송의 비정상 동적 해석에는 수치계산을 이용할 필요가 있다. [그림 6]에 표시한 것과 같이 1차 모델을 이용한 질점계의 진동 해석을 하면 [그림 7]과 같이 실제 관측되어진 것에 가까운 형상의 압력 파형이 얻어진다. 또한 배관의 각위치에 있어서 압력의 변화는, 거리가 멀어질수록 진폭이 작게될 뿐만 아니라, 시간적으로 늦어지는 것과 그 변형 자체가 틀러지므로 변화하는 것을 알수 있다.

실제에서는 압송 실험 등에서 얻어진 각위치의 압력 파형에서, 최대 압력을 정산해서 전영역의 압력 분포를 구한다. 이 압력 분포 곡선은 같은 시각에 있어서의 압력이 아니라서 실제 존재하는 분포는 아니다. 또한 맥동 파동의 최대 압력이 압력 손실을 정산하는데에 적절한 값이라고 말할 수는 없다. 고강도 콘크리트 등의 고점성 콘크리트에서는 피스톤이 등속도 운동을 하고 있는 시각에서도 평균적인 압력을 얻기 힘들고, 곡선상의 파형을 나타내는 것이 예측된다. 이와 같은 점이 고강도 콘크리트의 압송 실험에서 얻어지는 압



(그림 6) 펌프 압송의 역학 모델



(a) 점성이 작은 경우

(b) 점성이 큰 경우

(그림 7) 해석에 의한 압력의 맥동상태

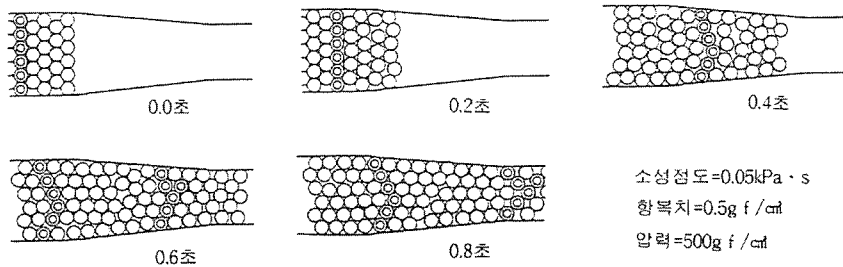
력 손실의 값이 편차가 심한 원인이라고 생각된다.

여기에 소개한 동적 해석은 가장 단순한 모델을 이용해서 행한 것이고, 금후 더욱 정도가 높은 복잡한 모델을 이용한 수치 해석을 할 필요가 있다. 맥동 해석의 목적은 실제 압력의 측정 결과를 어떻게 취급할 것인가가 근본적인 문제를 명백히 하는 것이다.

4.5 펌프 압송 예측과 레올로지적인 해결 및 과제

이상과 같이 펌프 압송에 관한 각종 이론적 고찰은 전부 레올로지라고 하는 역학에 기본을 둔 것이다. 따라서 이와 같은 이론을 현실의 현상 예측에 이용하기 위해서는, 계산의 입력이 되는 각종 레올로지 정수가 필수 불가결한 요소가 된다.

후레쉬 콘크리트의 레올로지 정수에 관해



(그림 8) 서스펜션 요소법에 의한 테퍼관내 유동 시뮬레이션의 예

서는 측정 및 측정 방법에 대해서 조차 아직 도달해 있지 않다. 특히 펌프 압송에 깊이 관련되는 미끄러짐 저항 특성에 관해서는 실험적인 정보가 거의 축적되어 있지 못하다. 또한 고압력하에 있어서 콘크리트의 변형 성질의 파악에 대해서도 마찬가지이다.

더욱이 후레쉬 콘크리트의 레올로지 성질은 극히 불안정한 것이다. 관내의 고압·고속이라고 하는 가혹한 환경하에서 정적인 측정에 의해 얻어진 레올로지 정수가 그 상태로 이용되어 질수가 있는가를 확인할 필요가 있다.

그러나 후레쉬 콘크리트의 레올로지 성질이 파악되고, 각종의 레올로지 정수가 높은 정도까지 추정·측정된다면 이것을 이용한 압송성 예측은 전혀 문제없이 실현될 수 있을 것이고, 수치해석에 의해 더욱 간단한 계산 방법이 산출될 가능성이 높다. [그림 8]은 조골재의 운동을 고려한 서스펜션 요소법에 따라 테퍼관내의 유동 상황을 시뮬레이션한 결과의 한예를 표시한 것이다. 이와 같은 대응량의 계산도 가까운 장래에는 실험적인 검토로도 기대할수 있을 것이다.

마지막으로 펌프 압송에 관련한 각종 레올로지 정수의 주요 부분을 열거한다. 이들 값이 포함된 실험 정보가 축적되기를 기대한다.

후레쉬 콘크리트의 레올로지 성질

· 항복치 : 슬러프값과 선형 관계가 있다. 일정하지 않고 고응력하에서는 크게된다고 생각할 수 있고, 이 경우의 상태는 테퍼관의 막힘에 관련된다. 그외의 경우 항복치는 펌프 압송성에는 큰 영향이 없는 것이 대부분이다.

· 소성점도 : 고강도 콘크리트 등에서 커지는 콘크리트의 점성, 고점성의 콘크리트의 경우 고속압송하기도 하고, 장거리 압송이 되면 급격히 압력 손실이 크게되는 것이 있다. 일반적으로 고점성 콘크리트는 나중에 논한 미끄러짐 점성도 높지만, 동일한 성질은 아니다.

매트릭스 모르타르 또는 시멘트 페이스트의 레올로지 성질

· 항복치 및 소성점도 : 조골재 또는 잔골재의 분리에 관련한다. 예를 들어 테퍼부에 있어서 막힘은, 모르타르가 먼저 흐르는 현상이 앞서 나타나지만, 이 때의 유동 저항이 막힘 발생의 확율을 좌우한다. 같은 현상이 진동 등에 대한 분리 저항에서도 일어난다고 말할 수 있다.

후레쉬 콘크리트의 미끄러짐 저항성상

미끄러짐 저항성상은 상기 매트릭스 모르타르 및 시멘트 페이스트의 레올로지 정수와, 조골재 등의 고체 마찰 거동으로 설명될

수 있는 가능성은 있지만, 현상에서는 측정이 곤란하기 때문에 결보기 성질로서 여기에 설명한다.

· 미끄러짐 점성 및 미끄러짐 항복치 : 미끄러짐 속도에 의해 선형으로 증가하는 계수 및 속도에 관련되지 않은 일정한 양. 양자는 미끄러짐 면에 작용하는 수직 응력의 선형 계수이고, 결국 4가지 재료 파라메타로 표시된다.

5. 후레쉬 콘크리트의 압송성 시험 방법

압송한 콘크리트에서 수분의 분리는 막힘을 일으키는 주요한 원인이 된다. 따라서 이것을 사전에 파악하는 것이 압송 공사의 합리화와 공기의 단축에 불가결한 요소이다. 콘크리트의 탈수 성상을 평가하는 가장 간단한 시험 방법으로서 가압브리딩 시험이 제안되고 있다. 이 실험 방법은 콘크리트 시험 혼련단계에서도 소량의 시료에 의해 탈수 성상의 개략적인 판정이 가능하고 압송에 적합한 콘크리트의 배합 선정과 현장에 있어서 압송성을 간단하게 판정할 수 있다.

앞서 말한 바와 같이 콘크리트의 관내 유동을 레올로지적으로 해석하고, 콘크리트의 압송성을 평가하는 데에는 미끄러짐 저항 시험의 활용이 생각된다. 이 시험은 관로를 이용해서 극히 소규모의 압송 실험을 행해, 관벽면에 있어서 미끄러짐 현상에 관한 레올로지 정수를 구하는 것이고, 측정 결과를 이용하면, 압송에 관한 결과 적은 콘크리트의 압송 부하의 개략치를 산정할 수 있다.

5.1 가압 브리딩 시험방법(안)

(1) 적용범위

본실험은 펌프 압송한 보통 골재 콘크리트의 압력에 의한 탈수 성상을 파악하기 위해

가압 브리딩의 측정에 적용한다.

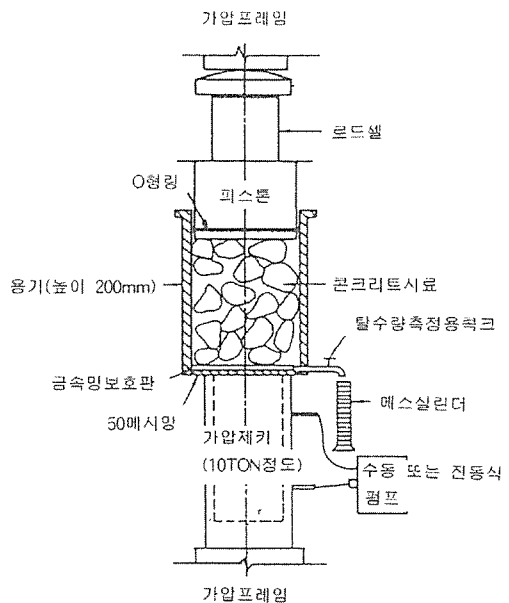
(2) 시험기기

- ① 용기는 철제 원통형의 것으로 내경 125mm, 내고 200mm로 한다(그림 9 참조).
- ② 가압잭키는 수동 또는 전동식의 펌프로 작동하는 능력 10tf 정도의 것을 이용한다.
- ③ 로드셀은 능력 10tf 정도의 것을 이용한다.
- ④ 가압프레임은 10tf이상의 하중이 작용해도 충분한 내력을 갖춘 것을 이용한다.
- ⑤ 사용하는 메스실린더는 100ml, 200ml로 한다.

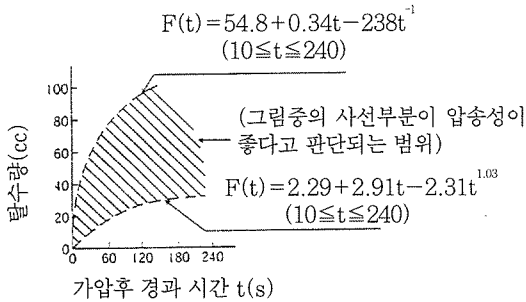
[주] (1) 가압브리딩의 다소에 따라 적당한 것을 선택해서 사용한다.

(3) 시료

시료는 대상으로 하는 콘크리트에서 JIS A 1115(아직 굳지 않은 콘크리트의 시료 채취 방법)에 따라 채취한 후레쉬 콘크리트로



(그림 9) 가압 브리딩의 시험 장치 예



(그림 10) 가압 블리딩 시험에 의한 압송성의 평가

한다. 채취량은 약 3l로 한다.

(4) 측정

① 시료를 용기에 2층으로 나누어 넣는다. 이 때에 각 층을 다짐봉으로 15회씩 다지고, 밀대로 평평하게 마무리한다.

② 콘크리트 시료를 넣은 용기를 가압프레임에 설치하고, 가압 잭기로 용기내 시료 상면의 압력이 35kg f/cm²가 될 때까지 연속적으로 가압한다.

③ 압력을 유지한 상태에서 탈수량 측정용 코크를 열어 10, 20, 30, 40, 50, 60초, 1분 30초, 2분, 2분 30초, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10분 마다 메스실린더에서, 탈수 속도가 2cc/min이상일 될 때까지 탈수량을 측정한다 (통상의 경우, 탈수량 측정용 코크를 열어 4분 이내에 탈수 속도는 2cc/min이 된다).

④ 탈수 속도가 2cc/min이하가 되면 압력은 50kg f/cm²까지 걸어 탈수의 완료를 확인한후, 압력을 개방한다.

[주] (2) 탈수 속도가 2cc/min이하가 된 단계에서 시험을 연속해도 현저한 탈수량은 얻어지지 않지만, 시험기의 경로내에 막힘이 생기는 경우는 연속해서 탈수가 나타나기 때문에 막힘의 유무를 확인할 목적으로 시료에 50kg f/cm²의 압력을 건다. 50kg f/cm²의 압력

에 의해 막힘이 해방된 경우 별도의 시료를 이용해서 재차 시험을 필요로하게 된다.

(5) 결과의 정리

탈수량의 측정 결과를 [그림 10]에 타점해서 탈수 성상 및 압송성의 난이도를 개략적으로 평가한다.

5.2 미끄러짐 저항 시험기에 따른 미끄러짐 점성 및 미끄러짐 항복치의 시험 방법(안)

(1) 적용 범위

본시험은 슬럼프 15cm이상의 콘크리트 미끄러짐 점성 및 미끄러짐 항복치의 측정에 적용한다.

(2) 시험기기

① 수송관은 임의 길이도 내경의 철관을 롤라상에 수평으로 설치한 것을 이용한다.

② 펌프는 충분한 용량의 시료 호퍼를 준비하는 것과 함께 콘크리트가 압송중 맥동하지 않고 정성 상태에서 수송관내를 이동할수 있도록, 압송압력을 임의로 설정할수 있는 것을 이용한다.

③ 호퍼와 수송관과의 접합부는, 수송관 외경보다 조금 크게한 소켓상의 슬리브 조인트를 이용하고,관이 축방향에 자유스럽게 이동할 수 있는 것을 이용한다.

④ 콘크리트의 압송과 함께 미끄러짐 저항력의 측정에는 용량 20kgf정도의 로드셀 등에서 정도를 확인한 것을 이용한다.

⑤ 압력계는 디지털 또는 아날로그 출력이 될 수 있는 것을 이용해서 정도를 확인한 것을 이용한다.

⑥ 유량 측정에 이용하는 저울은 평량 150kg정도의 것으로 정도를 확인한 것을 이

용한다.

[주] (1) 관의 내경 50~100mm, 관길이는 2m정도의 것을 이용한 실험예가 있다.

(3) 시료

시료는 대상이 되는 콘크리트에서 소정량을 채취한 후레쉬 콘크리트로 한다. 채취량은 시료 호퍼의 용량, 수송관의 내경, 도는 압송 압력에 따라 틀려지지만 100 l 정도를 목표치로 하면 좋다.

(4) 측정

① 채취한 시료를 호퍼의 시료 호퍼에 넣고 입의의 압력으로 압송한다.

② 수송관 입구 부근에 설치한 압력계의 지시치가 안정한가를 확인하고 유량을 측정한다. 유량의 측정은 압력 균배가 0.1~0.3kg f/cm²/m의 범위에 수 점이 얻어질때까지 반복한다.

(5) 결과의 계산

① 각 압력 균배마다 측정한 유량과 미끄러짐 저항력에서 미끄러짐 속도와 미끄러짐 저항 응력을 계산한다.

$$\beta = \frac{Q_A}{\pi R^2} \dots\dots\dots(1)$$

여기서 $\beta^{(2)}$: 콘크리트 관벽에 있어서 미끄러짐 속도(cm/sec)

QA : 실측 유량(cm³/sec)

R : 수송관내 반경(cm)

$$\sigma_h = \frac{F}{2\pi Rl} \dots\dots\dots(2)$$

여기서 σ_h : 미끄러짐 저항 응력(gf/cm²)

F : 미끄러짐 저항력(gf)

l : 수송관의 길이(cm)

[주] (2) β 를 구하는 경우 본래 실측 유량과 빙행 유량과의 차이를 관의 단면적에서 빼서 구하는 것이 좋다고 생각하지만, 일부 연구에 있어서 콘크리트의 빙행 유량은 극히 작고, β 의 산출에 대해서 실용상 무시할 수 있는 것이 확인되었다.

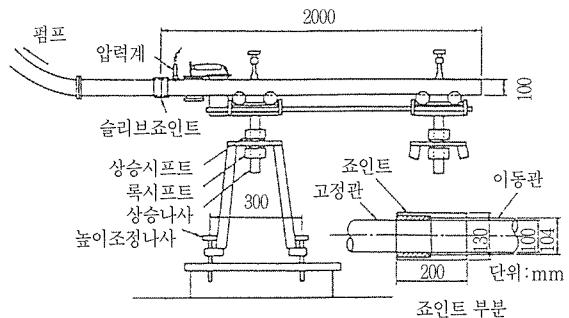
② 콘크리트의 미끄러짐 속도와 미끄러짐 저항 응력의 계산치외를 이용해서 최소 자승법에 의해 직선식 (3)을 구하고, 미끄러짐 점성 및 미끄러짐 항복치를 구한다.

$$\sigma_h = \eta_s \beta + \tau_s \dots\dots\dots(3)$$

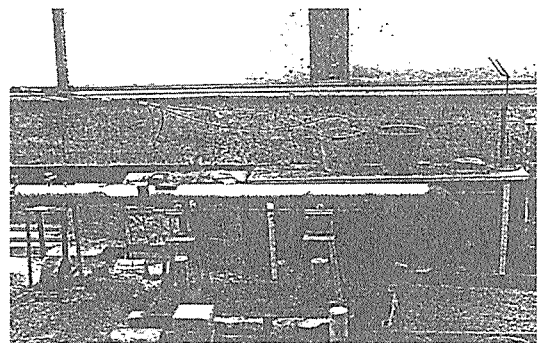
여기서 η_s : 미끄러짐 점성(gf/cm²/sec),

τ_s : 미끄러짐 항복치(gf/cm²)

(6) 참고 자료



(그림 11) 미끄러짐 저항 시험기(예)



(사진 1) 미끄러짐 저항 시험기 실험 사진

[표 1] 미끄러짐 저항 시험기에 의한 레올로지 정수의 측정에

측 정 자	시료의 종류	골재의 종류	혼 화 제	슬럼프의 범위 (cm)	미끄러짐 점성 (gf/cm ² · sec)	미끄러짐 항복 치(gf/cm ²)	비 고
R.D.Browne	콘크리트	-	-	7.5~18	0.03~0.06	0.1~0.6	
村田, 鈴木	콘크리트	육사, 쇄석	-	14~21	0.09	2.04~2.51	
		육사, 쇄석	유동화제	13~22	0.09	1.99~2.72	
村田, 鈴木	콘크리트	강사, 경량, 자갈	유동화제	15~19.5	0.034~0.067	1.78~3.29	
	콘크리트	경량모래, 경량골재	유동화제	21.5	0.074	1.33	
	콘크리트	경량모래, 경량골재	유동화제	14~20	0.04~0.06	1.23~2.91	

6. 원인과 대책

[표 2]에 펌프 압송시 발생하는 사고의 원 인과 그 대책에 대해 정리했다.

[표 2] 막힘 현상의 원인과 대책

분 류	원 인	대 대책
재료 · 배합	1. 단위 시멘트량의 부족	콘크리트 배합을 재검토한다.
	2. 단위수량의 부족	
	3. 잔골재(s/a)의 부족	
	4. 골재 입도 분포의 부적합	
	5. 골재의 압력흡수	골재의 프리쇼킹율을 높인다.
혼련 · 운반	6. 혼련 시간 부족	믹서의 혼련 시간을 규정대로 행한다.
	7. 운반차에서 호퍼투입시의 골재분리	① 콘크리트를 호퍼 투입전에 고속교반한다. ② 운반차를 2대 불힐 수 있도록하고 분리되지 않도록 투입한다.
수 송 관	8. 밴드판 · 테퍼관의 다용	밴드판 · 테퍼관은 될 수 있는 한 적게한다. 사용하는 경우에 테퍼관은 될 수 있는한 길게, 밴드판은 휨 반경이 큰 것을 사용한다.
	9. 수송관경의 부적합	골재의 종류 · 최대크기에 적합한 수송관경을 선택한다.
	10. 호스의 굽힘이 많음	호스는 될 수 있는 한 휘어짐을 적게한다.
	11. 배관의 습윤 부족	압송하기 전에 관내면의 충분 수분이 있게 한다.
	12. 선송모르타르의 부적합	선송 모르타르의 조합 및 소요량을 확인한다.
	13. 페이스트의 누출	고무 패킹을 갈고, 조인트를 확인한다.
	14. 배관내의 부착콘크리트	부착 콘크리트와 이물질을 제거한다.
15. 이물질의 혼입		
압 송 거 리	16. 배관중에 콘크리트의 장 시간 체류	① 30분 이상 압송이 중단된 경우는 4~5분마다 압송과 역운전을 2~3스트록 반복해서, 콘크리트의 브리딩과 응결을 방지한다. ② 하기 · 동절기 등의 콘크리트의 응결과 동결이 빠른 시기는 30 분 이내에 상기와 같은 조작을 행한다. ③ 더욱 조건이 나쁜 경우는, 배관내의 콘크리트를 배출한다.
	17. 공기의 흡입	압송중은, 호퍼내에 항상 적량의 콘크리트를 넣어 둔다.
기 계	18. 판 · 플레이트의 마모	규정량 이상으로 마모한 부품은 교환한다.

7. 결 론

펌프 압송성의 이론부터 현상 및 대책, 실험 방법까지 조사하여 보았다. 최근 콘크리트의 재료·공법면에서 연구 개발 및 실용화가 활발히 이루어지고 있다. 새로운 혼화 재료의 개발로 고강도 콘크리트, 고유동 콘크리트 등 과거에 없었던 콘크리트가 나타나기 시작했다. 이들 콘크리트는 경화후 성질 뿐만 아니라, 후레쉬 콘크리트의 성질도 전혀 다른 특성을 가지고 있다. 그 시공성은 단순히 슬럼프만으로는 판단할 수 없고 레올로지 측면에서 검토할 필요가 있고 또한 펌프 공법에 있

어서 압송성과는 불가결한 상관 관계가 있다.

콘크리트 펌프 압송성을 레올로지 관점에서 취급하는 자세는 현시점에서는 일반적인 것은 아니다. 그러나 가까운 장래에 이 분야에서 발생하는 다수의 문제점에 대해서 유력한 해결 수단이 될 것으로 판단된다.

또한 콘크리트 펌프공법은 현재 일반적인 공법으로 되어 있지만, 여전히 많은 문제점을 안고 있다. 그러나 그 원인은 콘크리트 펌프 자체의 문제만이 아니고 오히려 콘크리트 및 콘크리트 시공에 관한 일반적인 이해가 있으면 해결될 것으로 생각된다.

