

Fresh 콘크리트의 유동해석기술의 현황 The State of the Art on Flow Analysis of Fresh Conrete

森 博嗣* 谷川 恭雄*

1. 서 론

Fresh 콘크리트의 변형저항성을 레오르지적인 입장에서 수치로 평가하기 위해, 주로 실험적인 연구가 국내외를 불문하고 비교적 옛날부터 정력적으로 행해져 오고 있다. 이러한 실측결과에 의해서, Fresh 콘크리트의 재료특성의 물리적인 의미는 대체로 명확하게 되어가고 있다. 그러나 이렇게 해서 얻어진 재료 물성값을 실제의 콘크리트 공사에 있어서 시공성에 관련시켜서 생각하는 것, 특히 그 재료 물성값에서 콘크리트 공사의 작업능률을 예측하는 수단을 고안하는 것은, 이 분야 연구의 궁극적인 목적에 상관없이 좀처럼 손을 쓸 수가 없었다.

Fresh 콘크리트의 특성과 그 유동기동은 예상외로 복잡하고 Bingham모델 등의 단순한 역학 모델로 근사해서 정량화된 레오르지 정수만으로 나중 다양한 조건하의 콘크리트의 기동을 엄밀하게 표현할 수 있다는 것은 도저히 불가능하다는 것이 일반적인 인식이었다.

Fresh 콘크리트의 워커빌리티에 대해서 그 레오르지 성질은 영향 요인마다 일부에 지나지 않는다. 항복값과 소성점도 등은 재료특성을 표현하는 일부의 값에 지나지 않고, 이것을 콘크리트의 시공성과 직접 결부시키는 것과 같은 행위는 콘크리트의 압축강도만으로 건물의 내구성을 평가하는 것이다. 응고성, 충전성, 압송성 등을 실용 레

벨로 예측하기 위해서는, 아직 정확히 파악되어 있지 않는 요인이 있는 것으로 생각되었다. 또 Fresh 콘크리트가 형틀과 압송관의 내부를 흐르고 있는 모양을 실제로 관찰하는 기회는 없고 무엇이 어떻게 영향을 주는가를 직감적으로 이해하기 어렵다는 것도 문제였다.

재료 성질과 시공 조건이 충분히 파악되면, Fresh 콘크리트의 유동기동을 예측할 수 있는 것이다. Fresh 콘크리트의 레오르지적 연구가 지향하는 것은, 이와 같은 기술체계의 확립이다(그림 1 참조). 그러나, 실험에서 관찰할 수 있는 영향요인(원인)과, 실험에서 관찰할 수 있는 현상(결과)은 아무래도 상당히 한정되어 있기 때문에 원인과 결과의 인과 관계를 명료하게 하는 것은 적어도 실험적인 접근에서는 불가능하다고 생각되었다.

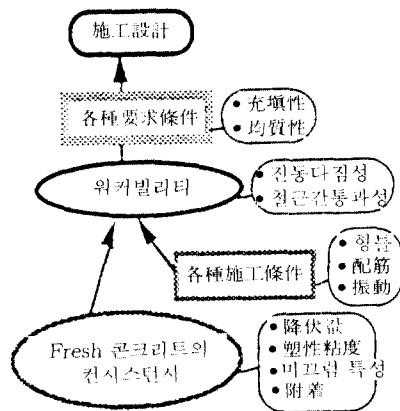


그림 1 시공설계의 개념

* 名古屋大學 교수

Fresh 콘크리트의 펌프 압송성에 관해서는, 이전 보다 이론적인 관점에서의 연구가 많이 행해지고 있지만, 각종 시공 조건하의 유동에 적용할 수 있는 범용해석기술에 관한 연구는, 10년 전에는 국내외를 불문하고 거의 없었다. 경화콘크리트와 같이 유동하는 Fresh 콘크리트의 내부에, 변형 계이지를 부착할 수는 없다. 유동현상을 역학적으로 취급하기 위해서는, 무모한 것이라 할 수 있는 대담한 가정이 필요했다. 이 관련한 환경은 근년에 이르러 수치해석 수법의 도입과 가시화 모델 실험 등에 의해서 완화되고 있는 것과 이 분야 연구의 근본적인 장애라고 할 수 있다.

최근에는 고유동 콘크리트, 고강도 콘크리트 등을 시작으로 하는 장래에 없는 타입의 Fresh 콘크리트가 출현하여 유동해석 기술에 대한 기대는 점점 커지고 있다. 그러나 현재에도 Fresh 콘크리트의 재료성질에서 그 유동거동과 시공성을 정확히 예측하는 것은 상당히 어려운 과제이다. 어떠한 점이 어려운가, 또한 어떠한 정보가 부족한가라고 하는 점을 정리해 가면서 본고에서는 Fresh 콘크리트의 유동 해석 기술개발의 최전선의 연구자가 직면하고 있는 문제를 열거하여 이 연구분야의 급후의 전망을 희망적으로 개설한다.

2. 목적과 그 달성도

먼저 Fresh 콘크리트의 유동 해석 기술 개발의 목적을 정리하고 현상에 있어서 연구의 달성도를 간단히 서술한다.

2.1 시공성의 예측

새로운 재료를 이용하는 경우와 특수한 공법을 실시하는 경우에는 실제 공사의 조건을 모의한 시공시험이 행해진다

유동해석 기술이 확립되면 이러한 종류의 장대한 노력이 절약되는 것으로 되지만(그림 2 참조) 현상의 기술은 아직 이 단계에는 이르지 못하고 있다.(표 1 참조)

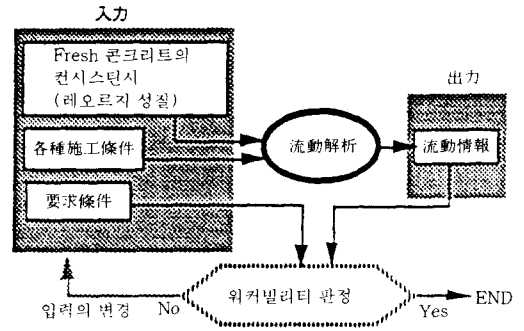


그림 2 위커빌리티 판정과 유동해석

표 1 이제까지 유동해석의 대상이 된 시공조건

해석의 대상	이론해석	수치해석
혼합믹싱	· 혼합의 확실적인 고찰	· 믹서의 혼합성능
압송 (관내유동)	· 변형과 미끄러짐에 의한 관내유동 · Taper관내의 압력손실 · Bent관내의 압력손실	· Taper관내의 閉塞 · Bent관내의 유동 · Pump脈動 · 수직방향 압송
타설 (충진성)	· 철근간 유통성 · 몰탈사전 타설	· 강관내의 콘크리트 압입 · 배근된 벽 거꾸집에 타설
진동다짐	· 진동의 전파 · 다짐에 의한 脫泡 · 진동에 의한 유동화 현상 · 진동하의 구인상 시험	· 진동의 전파 · 진동하의 유동거동 · 조골재의 침하
측압	· 정지상태의 측압	· 압입시의 측압

주요한 원인의 한가지는, 계산의 입력으로 되는 정보의 압도적인 부족이다. Fresh 콘크리트의 변형 특성을 표현하는 역학모델에는, 일반적으로 Bingham 모델이 이용되지만, 이의 단순화는 극히 대담하며 따라서 해석에서 얻어진 결과도 이것에 따른 대충적인 것에 지나지 않는다. 예를 들면 수치해석에 의해서 형틀의 어느 범위까지 콘크리트가 충전되는가는 대체로 예측할 수 있다. 그런데 요구되고 있는 것의 대부분은 형틀 우각부의 충전성, 철근간의 통과성, 굵은골재의 분리 저항성, 표면의 마감성 등의 확인이고, 어떠한 것도 아주 국부적인 문제이다.

유동해석의 최종목적인 '시공 설계'를 실현하기 위해서는 Bingham 모델보다도 특히 정밀한 역학 모델을 이용할 필요가 있는 것이 확인되지만 이 방면을 Back Up 하는 연구성과는 아직 적다.

2.2 컨시스턴시 시험방법의 분석

Fresh 콘크리트에 대해서 행해지는 각종의 컨시스턴시 시험을 대상으로 한 유동 시물레이션이 몇 가지 행해지고 있고 유동 해석 기술이 가장 성과를 올리고 있는 분야이다.

당연히 前項의 실시공 조건에서 경계조건이 단순하고, 비교적 간단한 계산으로 精度가 좋은 결과가 얻어지고 있기 때문이다.(표 2 참조)

이러한 시물레이션에 의해서 입력으로 되는 데이터와 계산수법의 타당성을 확인할 수 있기 때문에 실시공의 시물레이션 기술을 확립하기 위한 준비단계로 위치시키는 것도 가능하다. 또한 컨시스턴시 시험 자신의 물리적인 의미를 이해할 수 있는 점도 아주 중요하다.

가장 많은 해석의 대상으로 되고 있는 것은 슬럼프시험이고, 이론해석이나 수치해석에 의해서 수많은 유의한 지식이 이미 얻어지고 있다. 그러나, 이러한 슬럼프시험에 한해서도 완전히 실현상이 유동해석에 의해서 재현되고 있다고는 말할 수 없다. 예를 들면 콘의 상부가 주위로 붕괴되어 떨어지는 것과 같은 슬럼프 거동은 Bingham 모델을 이용한 유동해석에서는 재현될 수 없다. 본래 슬럼프 시험은 실시공을 단순화한 모델 시험으로서 고안된 것이고, 슬럼프 거동을 완전히 재현하는 것이 가능한 해석수법과 역학 모델이 고안되면, 실시공의 시물레이션도 보다 현실적인 것으로 될 것이다.

2.3 유동상황의 가시화

유동하는 Fresh 콘크리트의 상세한 거동을 관찰하는 것은 어렵다. 투명한 형틀을 사용해도 콘크리트 내부의 유동을 볼 수는 없다. 최근에 이르러 시멘트 대신에 흡수성 고분자를 이용한 가시화 모델 시험이 행해지며 유동의 세부를 관찰 분석하는 것이 가능하게 되었지만 그렇지만 내부의 응력 분포나 압력의 전파성상을 측정할 수는 없다. 이러한 것은 장래 수치계산에 의한 virtual reality 실현에 의해서 최초로 가능하게 될 것이다.

이와 같은 각종 조건하에 있어서 응력상태와 유동속도분포를 가시화하는 것은 유동현상을 정확히 모델화하고 보다 단순한 계산에 의한 예측 기술을 확립하기 위해 불가피한 정보원으로 된다.

이 분야에서 수치해석기술이 급후 부담할 역할은 상당히 크다.(그림 3 참조)

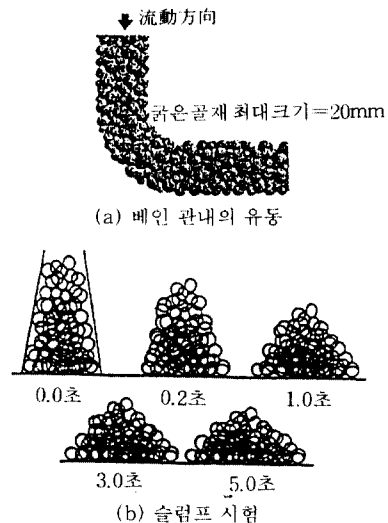


그림 3 수치해석에 의한 유동의 가시화의 일례

2.4 레오르지 정수의 간이추정법

컨시스턴시 시험시의 Fresh 콘크리트의 유동성을 해석하는 것에 의한 부산물로서 레오르지정수의 간이추정수법이 몇가지 제안되고 있다. 이론해석과 수치해석에 의한 결과를 기초로, 시험값에서 역으로 시료의 레오르지 정수를 구하는 것이다.

표 2 이제까지 유동해석의 대상이 된 Fresh 콘크리트의 각종 시험방법

해석의 대상	이론해석	수치해석
일반적인 컨시스턴시 시험	<ul style="list-style-type: none"> Slump시험 Flow시험 Rod시험 	<ul style="list-style-type: none"> Slump시험 Flow시험 L Flow시험 로트시험 VB시험
기타의 컨시스턴시 시험	<ul style="list-style-type: none"> 경사관 시험 	<ul style="list-style-type: none"> 배관 Box시험 진동 Box시험 전단 Box시험
레오르지 시험	<ul style="list-style-type: none"> 회전 점도계 구인상시험 평행판 플라스트 메타 	<ul style="list-style-type: none"> 회전점도계 구인상 시험 평행판 플라스트 메타

Fresh 콘크리트의 레오르지 정수를 구하는 시험(레오르지 시험)으로서는, 회전접도계와 구인상시험이 일반적이지만 어떤 것도 사용할 수 있는 시료가 아주 제한되어 있으며 특히 낮은값을 포함한 콘크리트에 적용하는 것은 곤란하다. 따라서 슬럼프 시험과 L Flow 시험 등의 콘크리트용의 시험에서 레오르지 정수를 구하는 것(Semi-레오르지 시험)의 의미는 크다. 또한 한편에서는 유동 해석에 의해서 계산된 이상적인 Semi-레오르지 시험이 급후 출현할 가능성도 있다.

콘크리트에 관해서 말하면 순수한 레오르지 시험에 비교해서 이러한 Semi-레오르지 시험의 간편성, 재현성, 精度 등의 모든 점에서 유리하며 Fresh 콘크리트의 평가시험 수법으로서 상래에도 유망하다.(표 3 참조)

를 어렵게 한다. 이것은 경화 콘크리트 해석의 경우와 동일하다.

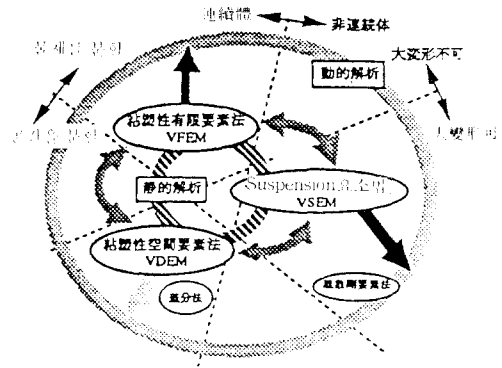


그림 4 Fresh 콘크리트의 수치유동 해석수법

표 3 이제까지 제안된 세미-레오르지 시험 (레오르지 정수의 추정 가능한 컨시스턴시 시험)

	시험방법	추정에 필요한 측정값
단독으로 추정가능	Slump시험	○Slump값과 Slump Flow속도 ◎슬럼프곡선
	L Flow시험	○L Flow값과 L Flow속도
조합하여 추정가능	Flow시험	△Flow값 - 낙하회수곡선
	Slump시험	◎Slump값과 Flow값
	L Flow시험	◎Slump값과 L Flow속도
	Flow시험	

3. 해석 수법

현재까지에 제안되고 있는 Fresh 콘크리트의 유동 해석 수법의 종류는 많지 않다.(그림 4 참조)

이러한 것은 이용하는 해석 모델에 의해서 크게 2가지로 분류할 수 있다. 즉, 연속체 모델과 비연속체 모델이다.

3.1 연속체 모델에 의한 해석 수법

연속체 모델을 이용하는 것은 Fresh 콘크리트에 대해서는 상당히 대담한 가정이라고 할 수 있다. 이 가정이 계산의 순서를 용이하게 하는 반면 재료 특성의 평가와 모델화를 복잡하게 하여(그림 5 참조) 특히 대변형시에 있어서 경계조건의 처리

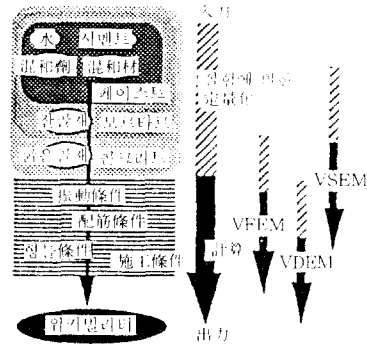


그림 5 수치유동 해석수법의 위치

(1) 점소성 유한 요소법

Fresh 콘크리트의 범용적인 유동 해석 수법의 확립을 목적으로 항복값과 소성점도를 이용한 점소성 유한 요소법이 최초로 제안되었다. 본 해석의 당초의 계산 수법에서는 정적인 정도에 의한 기본 방정식을 이용해서 관성력의 영향을 무시적으로 고려해왔다. 그러나 복수의 재료를 동시에 취급하기도 한다면 속도 변화의 급격한 문제에 대한 대응에 따라 최근에 있어서 운동 방정식을 기본으로 하는 동적인 계산 수법이 주류로 되었다. 또한 이 동적 점소성 유한 요소법에서는 액체의 체적 탄성이 고려되고 진동의 전파 현상의 수치해석적인 재현이 최초로 가능하게 되었다.

표 4 각 수치해석 수법의 특징 비교

	점소성유한요소법 (VFEM)	점소성공간요소법 (UDEM)	점소성시스토크션 요소법(VSEM)
제안년	1985년	1989년	1987년
精度	균질체에 가까운 재료이면 정도가 높다	상당히 낮기 때문에 국부적인 표현이 좋지 않다.	조금재 레벨의 정밀한 문제를 취급할 수 있지만 요소구성의 가정으로 정도는 비교적 낮다.
경계처리	대단히 복잡한 처리가 필요하다.(특히 3차원)	아주 간단, 장애물 등도 고려 가능함	비교적 간단, 이동하는 장애물도 취급 가능
대변형	요소의 변형에 한계가 있고, 재료의 분리 집합을 취급 어려움	자유도가 아주 높고, 대변형에 추종 가능함	자유도가 아주 높고, 대변형에 추종 가능함
계산량	적다.	비교적 적다.	비교적 많다.
입력 DATA	보통은 콘크리트의 레오로지정수	진동현상등, 콘크리트의 기본치 성질	보통은 물탕의 레오로지 정수
동적계산	이미 실현되고 있다. 제적탄성을 고려한 계산도 가능	아직 실현되어 있지 않음	이미 실현되고 있다.
3차원 해석	가능하지만 경계조건이 복잡하다.	이론적으로 가능하지만, 실현되어 있지 않음	문제없음
적용범위	Consistency시험의 시물레이션 등의 변형량이 적은 소규모 문제에 적합	실대규모의 시공시물레이션 등의 대규모 문제에 적합	조각재의 운동이 문제가 되는 것과 같은 미세한 문제에 적합

점소성 유한 요소법은 적용한 해석 예도 많고 몇 가지의 간단한 유동현상에 있어서 그 타당성이 확인되고 있다. 전술의 SEMI-레오로지 시험의 기본으로 되는 해석의 대부분은 이 계산 수법에 의한 것이다.

해석에 이용하는 역학 모델로서는 bingham 모델보다 정밀한 것이 제안되면 해석의 정도를 향상시킬 수 있는 것이 가능하다고 지적되고 있다.

본 해석수법은 3차원 문제로의 적용이 가능하지만 연속체 모델을 이용하는 것에 의한 자유도의 제한과 경계조건의 복잡함이 한계로 되어 철근이 교차한 형틀 내로의 타설을 시물레이션한다는 실용적인 문제로는 적용이 곤란하다.(표 4 참조)

(2) 펌프압송의 脈動해석

동적 점소성 유한요소법의 계산을 1차원으로 행하는 수법이 콘크리트의 펌프압송 해석에 적용되

고 있다. 계산에 이용되는 재료성질에 관한 입력 변수는 점성, 항복값(소성) 및 체적탄성의 3가지이다.(그림 6 참조) 이 계산수법이 제안되기 이전에 펌프압송시의 관내 압력의 맥동변화를 계산으로 구한 것은 없었다.

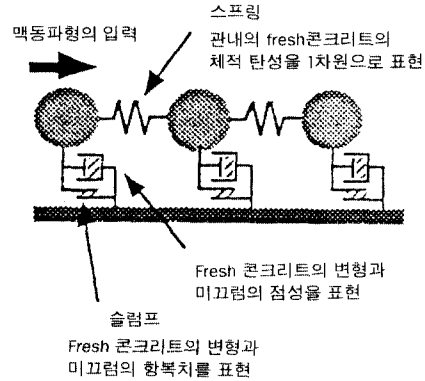


그림 6 펌프압송 해석의 1차원 해석 모델

펌프압송성은 Fresh 콘크리트의 조합설계시에 아주 중요한 요인이고 콘크리트 시공 중에서도 점성의 영향이 매우 큰 고속유동장의 성질이다.

근년에 있어서 고유동 콘크리트, 고강도 콘크리트 등의 고점성 타입의 콘크리트가 이용되며 또, 상방 혹은 하방을 포함해서 장거리 압송의 수요가 증가하고 있다.

종래의 새관 유동이론에 의한 정상류의 해석에서는 설명되지 않는 현상이 실험적으로도 확인되고있고 본 해석과 같은 동적 계산이 급후 주류로 될 가능성이 아주 높다.

본 해석은 상당히 단순한 프로그램으로 실행하는 것이 가능하다. 복잡하고 대규모인 압송실험을 대신해서 단순히 소규모인 측정예 의한 결과를 입력으로 한 수치실험이 장내적으로는 가능하게 될 것이다. 문제는 입력으로 되는 재료 성질을 정량화 하기 위한 측정수법의 확립에 있다.

(3) 점소성 공간요소법

점소성 공간요소법의 계산과정은 점소성유한요소법의 계산을 요소재분할을 행하면서 반복한 것과 같다. 또한 공간을 요소 분할하여 계산상의 짐자를 이용한 수법(MAC : 법)은 후술의 차분법에

의한 유동해석법과 동일하다. 점소성 공간요소법에서는 연속체 모델을 이용하면서 재료의 대변형 이산, 집합, 충돌 등의 현상을 재현할 수 있으며 실용 규모의 타설 시뮬레이션이 가능하다. 또한 전절에서 서술한 유동현상의 가시화에 가장 적합하기 때문에 이 분야에 있어서 응용이 급후 기대된다.(표 4 참조) 그러나, 점소성공간요소법은 현재의 경우 3차원해석에 적용되지 않는다. 동적인 계산수법의 도입도 지연되고 있다. 또 본 해석수법은 형틀내에 타설되는 콘크리트의 개략적인 충전 상황을 비교적 간단히 구할 수 있는 한편 우각부의 충전성과 표면의 마감성 등의 국부성상을 구하는 것이 곤란하다. 특히 실험규모의 해석에는 큰 계산 용량이 필요하게 된다. 철근간을 통과하는 경우와 진동을 받고 있는 경우의 겹보기 레오르지 특성을 입력에 이용함으로써 계산 용량을 절약하는 수법도 제안되고 있지만 입력 정보를 얻기 위한 측정이 복잡하게 되어 출력의 精度도 저하하는 등의 문제가 남아있다.(그림 5 참조)

(4) 차분법

차분법을 이용해서 최적보정과 점성의 운동 방정식에서 Fresh 콘크리트의 유동시뮬레이션을 행하는 수법이 제안되고 있다. 본 해석은 2차원문제에 한정되어 있고 항복값을 가지지 않는 점성체의 유동해석수법을 의사(擬似)적으로 이용하기 위한 엄밀한 의미에서 항복값을 취급할 수 있는 것은 불가능하다.

(5) 이론해석수법

수치계산에 의하지 않는 이론해석으로서 가장 일반적인 것은 관내 유동해석이고 변형과 미끄럼양쪽을 고려한 해석결과와 변형관내의 유동을 취급한 연구가 보고되고 있다. 그러나 일본건축학회의 펌프공법시공지침에서는 압력손실과 슬럼프값이 실험적으로 관련됨에 지나지 않고 관내유동의 이론이 실제의 펌프압송공법에 직접 적용되는 단계에는 이르지 않고 있다. 또한 관내 유동이론은 경사관 시험과 로트실험의 해석에 이용되고 있다. 전단응력의 분포를 가정하면 역학모델(예를 들면 : bingham 모델)에서 전단변형 속도 분포가 얻어

지며 특히 유동의 총량이 구해진다. 이 방법은 철근간을 통과하는 콘크리트등 다양한 유동 현상의 해석에도 적용된다.(그림 7 참조) 또 하나의 이론 해석은 슬럼프 시험시의 콘크리트의 변형거동의 해석에 성과를 올리고 있다. 이것은 일축 방향만 압축된 변형을 취급한 것으로 확실히 응력 분포를 가정해서 변형속도 분포를 구하고 전체의 변형속도를 적분에 의해서 계산하고 있다. 항복값과 슬럼프값의 관계를 구한 종래의 이론결과와 실험결과에서는 구해지지 못했던, 유동 도중의 운동을 구할 수 있는 가능성이 있으며, 고유동 콘크리트의 점성을 슬럼프, 플로우 속도 등에서 추정하는 수법에 응용되고 있다. 수치 계산에 비교해서 이러한 이론해석의 성과는 실용면에 대한 적용점에서 아주 유리하다. 급후 관내 유동 이론과 슬럼프이론의 두 종류의 유동 해석 이론을 조합시키는 것에 의해서 보다 광범위한 현상을 단순한 이론 전개로 해명될 가능성이 있고 그것을 위해서는 수치해석과 모델실험 등에 의한 유동현상의 관찰이 중요하게 된다.

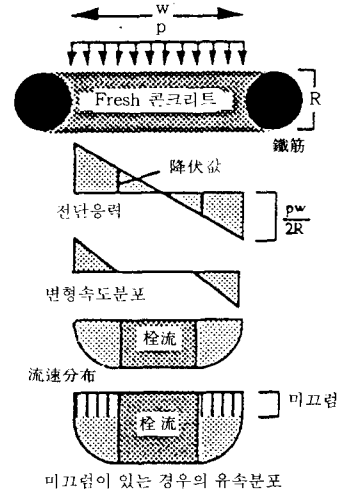


그림 7 철근 사이를 통과하는 콘크리트의 해석 모델

3.2 비연속체 모델에 의한 해석수법

Fresh 콘크리트의 유동거동 중 철근간통과, 재료분리, 폐쇄 등 시공의 가부를 결정하는 것과 같

은 현상의 대부분은 콘크리트의 비균질성에 기인한다고 할 수 있다. 따라서 연속체 모델에 의해서 이러한 현상을 시뮬레이트 하기 위해서는 이 비균질성을 표현하는 복잡한 구성측과 대담한 가정이 필요하게 된다. 固液혼합재료 특유의 거동을 재현하기 위해서는 엄밀히는 시멘트와 잔골재에도 미치는 復相모델(그림 8 참조)이 필요하지만 현실적으로는 굽은골재와 모르타르의 2相 모델을 이용한 수법이 몇 가지 제안되고 있다. 이러한 해석의 주목적은 건질의 연속체 모델을 이용한 해석 수법에서는 재현되지 않는 현상을 설명하는 것에 있고 장래적으로는 보다 정밀한 역학 모델을 구축하는 것에 있다고 할 수 있다. 그러나 현 단계에서는 정량적인 결과는 거의 얻어지지 않는다.

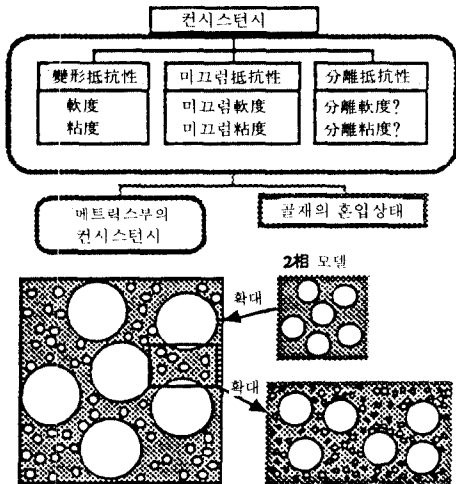


그림 8 복잡 재료의 컨시스턴시와 해석 모델

(1) 점소성 Suspension 요소법

점소성 Suspension 요소법은 Fresh콘크리트의 유동 해석을 위한 비 연속적 모델을 도입한 최초의 범용 수치해석 수법이다. 본 해석 수법은 굽은골재와 매트릭스 모르타르의 2相을 모델화하여 球體의 조골재를 점점으로 한 입체 트러스 구조를 구축한다는 아주 대담한 단순화를 전제로 하고 있다.(그림 9 참조) 급후 다소 복잡한 요소 모델을 취급하는 것에 의해서 해석이 정밀화 될 가능성은 남아 있지만 현재의 트러스 모델에서도 해석 결과

는 실현상을 비교적 잘 재현하고 있고 Fresh 콘크리트의 유동해석으로서 요구되는 정도에 대해서는 급후 충분히 의논해야 할 것이다.

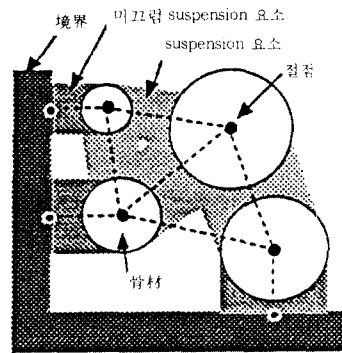


그림 9 Suspension 요소법의 해석 모델

Suspension 요소법에서는 최근 점소성 유한 요소법과 동일하게 동적인 계산 수법을 도입하기 위해 후술의 離散剛 요소법과 유사한 계산과정으로 되었다.(그림 5 참조) 단, 離散剛 요소법과 비교하면 점점과 요소의 개념이 반대이며 점성 변형하는 요소가 크기의 차이를 가지는 점이 다르다. 離散剛 요소법은 주로 붕괴한계(항복값)를 접촉에 의한 마찰을 이용해서 재현하는 것에 적당하지만 이것에 대해서 Suspension 요소법은 항복후의 유동현상에 주안점을 두고 있고 점성을 구체적인 값을 이용해서 표현할 수 있는 점에 특징이 있다.

본 해석 수법은 3차원 해석이 가능하고 경계조건 단순함에서 광범위한 현상의 시뮬레이션에 적용되고 있지만 한편으로는 장대한 계산 용량이 필요하기 때문에 비교적 소규모인 문제밖에 적용되지 않는 것이 현상이다.(표 4 참조)

(2) 離散剛 요소법

離散剛 요소법은 球狀體의 요소를 이용한 단순화를 도입하여 근년에 이르러 비연속체의 수치해석 수법으로서 지반과 구조의 붕괴과정의 해석에 넓게 보급하고 있다. 또한 최근에는 Fresh 콘크리트의 유동 해석에 대한 적용도 시도되고 있다.

본 해석 수법은 剛要素의 접촉에 의한 힘의 전

달과 운동 방정식을 기본으로 한 것이고 Fresh 콘크리트에 적용하는 경우에는 요소간에 감쇠와 스프링의 선재를 조합한다. 전향에서 서술한 바와 같이 이러한 것에는 크기의 차원이 없고 지금의 경우 실험에서 측정되는 페이스트와 모르타르의 레오르지 정수와 직접 연관시킬 수 없는 점이 과제라고 할 수 있다.

粉體系와 지반을 대상으로 한 離散剛 요소법 해석에 관한 연구 성과는 비교적 많고 금후 Fresh 콘크리트의 유동 해석에 이용 가능한 해석상의 노하우를 기타 분야에서 도입할 필요가 있을 것이다.

(3) 이론 해석 수법

비연속체 모델을 이용한 이론 해석의 예로서 테퍼관과 분기관에 있어서 굽은골재의 운동에 착안한 연구가 보고되고 있다. 또한 철근간을 통과할 때 굽은골재와 모르타르가 분리하는 현상을 취급한 연구도 보고되고 있다. 모두 실험상의 정성(定性)적인 표현에 그치고 있지만 굽은골재의 운동에 관한 이러한 종류의 고찰이 전개되는 것에 의해서 분리와 폐쇄 현상이 역학적으로 정의되고 의논될 것을 기대하고 싶다.

4. 역학 모델

역학 모델은 정량화를 위한 측정 방법과 이것이 이용되는 해석 수법과 깊게 관련되어 있다.(표 5 참조) 예를 들면 비연속체 모델을 이용하는 Suspension 요소법에 Bingham 모델을 적용하더라도 굽은골재의 접촉에 의한 저항은 고려된다. 그러나 연속체 모델을 이용하는 점소성 유한 요소법에 의해서 같은 정도의 계산을 행하기 위해서는 굽은골재의 접촉에 의한 효과를 포함한 역학 모델이 필요하고 명료하게 Bingham 모델보다도 복잡한 모델이 요구된다. 역학 모델이 복잡하다고 하는 것은 재료 특성의 측정 방법이 복잡하게 되는 것을 의미하지만 한편으로는 그 성질을 수치화하는 것에 의해서 보다 단순한 계산에 적용될 가능성도 생긴다.

표 5 Fresh 콘크리트의 변형성상에 관한 역학모델과 레오르지 정수의 측정방법

역학모델	레오르지정수 (개수)	측정방법
Mohr-Coulomb 모델(항복조건)	내부마찰각 접착력 (2)	3축압축시험 1면 전단시험
Bingham모델	항복값 소성점도 (2)	회전점도계 구인상시험 링행관 플라스틱 메타 경사관 시험 각종 세미-레오르지지시험
복합모델	변동하는 항복값 변동하는 소성점도 (동상4)	1면전단 점성시험 전단 Box 점성시험

여기서는 주로 콘크리트를 균질한 연속체 모델을 이용해서 표현할 때 필요로 되는(Bingham 모델보다 복잡한) 역학 모델에 관해서 서술한다.

4.1 변형 특성에 관한 모델

Fresh 콘크리트의 붕괴(유동) 임계의 예측에 Mohr-Cong의 항복 조건이 이용되고 있고 이 모델만으로는 변형거동은 표현할 수 없다. 따라서 Fresh 콘크리트의 전단변형(유동)시의 저항성을 표현하는 역학 모델(레오르지 모델)은 지금 상황에서 Bingham 모델 이외에는 없다. Bingham 모델의 레오르지 정수는 항복값과 소성 점도의 2가지이고 적지만 Bingham 모델에서는 이러한 굽은골재 고유의 불변의 수치이다.

(1) 변동하는 레오르지 정수

Mohr-Cong의 항복 조건은 고체의 접촉에 의한 마찰력을 표현하는 것이고 접촉면에 작용하는 수직응력에 비례한 수평 저항력을 준다. 고농도의 고체입자(골재)를 포함한 Fresh 콘크리트의 항복치는 일정값으로는 되지 않고 압력에 의해서 변동하는 것이 실험적으로 확인되고 있다. 또한 소성점도도 압력의 영향을 받는다고 하는 보고도 보여진다. 이 현상을 재현하기 위해서는 내부 응력에 의존한 항복값과 소성 점도를 가진 역학 모델이 필요하게 된다.

그러나 Fresh 콘크리트의 압력이라고 하는 경우에는 어느 정도의 변형을 가지게 된 후에 굽은골

재가 접촉하는 것과 같은 상황에 있어서 전달되는 힘과 펌프 압송시에 관찰되는 것과 같은 液壓을 엄밀히 구별하는 것은 어렵다. 또한 이러한 응력에 의존하는 Fresh 콘크리트의 성질을 측정할 때 이타가 적기 때문에 일반적인 역학 모델로서 정량화된 단계에는 이르지 않고 있다.

상기의 응력 의존성 외에도 변형 속도, 변형량, 응력의 履歷, 영역의 크기 등에 의존하는 역학 모델이 급후 제안될 것이 예상된다. 이러한 해명에는 실험적인 검토 외에 해석적인 접근이 불가피하고 비연속체 모델을 이용한 유동해석 기술에 의해서 그 매카니즘이 해명되는 것이 기대된다.

또한 실시공의 시뮬레이션에는 경시변화와 재료분리를 고려한 변수를 준비할 필요도 있다. 현행의 역학모델(Bingham 모델)에서는 이러한 영향 요인이 완전히 무시되고 있다.

(2) 진동의 영향

진동에 의한 유동촉진(변형 저항성 저감) 효과를 측정하여 前項에 열거한 각종 요인과 동일하게 진동력에 의해서 변동하는 항복값과 소성 점도를 실험적으로 구한 정보도 있다. 그러나 진동의 가속도는 시료의 내부와 같이 생기는 것은 아니므로 이러한 측정 결과의 적용범위가 문제시될 것이다.

Bingham 모델에 반부해서 응력이 작용한 경우의 평균적인 변형 저항성을 이론적으로 구한 연구에 의하면 어느 정도 이상의 진동 가속도를 받으면 Bingham 모델은 저변형 속도 영역에서 항복값이 없는 곡선으로 변화한다. 이 진동에 관한 역학 모델은 재료분리에 의한 성상 변화를 무시한 것이지만 정적인 조건하에 있어서 재료성상을 측정하는 것만으로 진동하의 유동 시뮬레이션이 가능하게 되는 점에 큰 매력이 있다.

4.2 경계 특성에 관한 모델

Fresh 콘크리트 자신의 변형저항성 이외에 Fresh 콘크리트가 접하는 경계면에서 구속력의 모델이 유동해석을 하는데 있어서 불가피하게 된다. 그러나, 미끄럼과 부착이라고 부르는 이러한 성상에 대해서는, 그 정의를 포함해서, 일반적인

전해는 얻을 수 없다. 또, 그 중요성에 반해서, 보고되어 있는 데이터는 아주 작다.

(1) 미끄럼

통상의 콘크리트의 펌프 압송시의 압력 손실은 콘크리트의 변형 저항성보다도 관내 벽면에 있어서 미끄럼 저항성이 지배적으로 되는 것이 알려지고 있다. 미끄럼 저항응력은 미끄럼 면에 작용하는 수직 응력과 미끄럼 속도의 양쪽에 의존하는 것이 실험적으로 확인되고 있기 때문에 양자에 선형에 비례해서 증가한다고 가정한, 아주 단순한 미끄럼 저항응력의 모델이 제안되고 있다. 이것이 점소성 유한 요소법 등에서 경계조건에 이용되고 있는 미끄럼 저항에 관한 유일한 역학 모델이고 이것 이상으로 복잡한 모델은 아직 개발되고 있지 않다.

또한 표면의 마감성 등에 영향을 미치는 것으로 생각되는 진동하의 미끄럼 특성에 관해서는 해석적으로도 실험적으로도 검토는 완전히 행해지지 않은 것이 현상이다.

펌프 압송시와 같은 정도의 고속 조건하에 있어서 미끄럼 저항력의 측정에는 거의 없고 또한 상기의 선형성도 광범위하게 확인되고 있지는 않다. 미끄럼 저항 특성의 일반적인 측정 방법도 확립되어 있지 않다. 이상과 같이 Fresh 콘크리트의 미끄럼 기동에 관한 연구는 상당히 늦고 유동 해석 기술을 확립하는데 있어서 장애로 되고 있다.

(2) 부착

Fresh 콘크리트의 부착 특성에 관해서는, 2, 3의 실험적인 연구가 행해지고 있지만은 이러한 것은 굵은골재와 모르타르의 결합력을 평가함으로써, 분리저항성을 예측하려고 의도한 것이다. 따라서 부착강도의 측정이 중심이 되며, 변형특성을 레오로지적으로 분석한 다음에, 역학모델을 구축한다고 하는 단계에는 이르지 못한다. 그러므로 수치 계산시의 경계조건에는, 일반적으로 인장력에 대해서는 무저항 모델이 채용되고 있다.

진행의 미끄럼 기동에 비하면 부착기동에는 액체의 표면장력이 영향을 미치기 때문에 실험상의 모델화가 어렵다고 생각된다. 그러나 부착면에 인

장력이 작용하므로 미끄럼 현상이 광범위하게 생기지 않는 것과 부착이 떨어지기까지의 변형량이 미소하므로 전체의 유동거동에 미치는 부착의 영향은 비교적 작다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 고에서는 Fresh 콘크리트의 유동해석기술의 목적, 계산수법, 입력모델 등의 관점에서 재정리하고, 특히 이 분야의 연구의 최전성에 있어서 과제를 중심으로 서술했다. 未知이기 때문에 연구하

는 것이며, 연구상의 과제와 문제점을 정확하게 지적하는 것은 그 자체가 모순되는 곤란한 행위이다. 따라서, 본 고의 내용이 대체로 예측적, 추상적, 직감적으로 되는 것은 피할 수 없었다.

또, JCI에서는 1994년부터 Fresh 콘크리트의 역학모델 연구위원회가 발족하고, 연구활동을 개시하고 있다. 지금까지 각 분야에서 독자로 추진되어 온 레오르지적인 연구의 성과가 유동해석 기술의 보급과 역학모델의 구축이라는 관점에서 結集될 것을 기대한다. 