

특 집

고성능 콘크리트

超流動 콘크리트의 메카니즘 Mechanism of High Workable Concrete



강 석 화*



박 칠 림**

1. 서 론

1980년대 후반에 일본의 東京大學 岡村教授 연구팀에 의해 High Performance Concrete가 개발된 이래⁽¹⁾ 일본의 각 건설회사에서는 岡村教授의 指導를 받거나 또는 그 원리에 힌트를 얻어 다양한 명칭의 超流動 콘크리트를 개발하였고, 또한 실시공에 적용을 하여 거의 실용화 되고 상태이다⁽²⁾. 각 회사별 개발한 공법 명칭 및 특징은 표 1과 같다.

초유동 콘크리트는 일반 流動化 콘크리트와 달리 콘크리트 타설시 流動性과 더불어 材料分離없이 自重만에 의해 거푸집의 구석구석까지 充填이 되는 自己充填性이 요구된다. 그러나 요구되는 그 성질이 대단히 예민해서 投入材料의 比率이나 時期 그리고 結合材(시멘트와 같은 粉體 종류를 총칭)의 混入比率 등의 영향을 크게 받기 때문에, 投入材料간의 상호 영향에 대한 명확한 규명이 없이 단순히 여러번의 시행착오를 거쳐 얻은 配合比率의 제시만으로는 콘크리트의 제조상에 있어서 여러모로 어려움이 따르게 된다. 이를 해결하기 위

해서는 콘크리트 타설시 주로 발생하는 骨材閉鎖現象이나 材料分離現象등 타설시의 시공성에 절대적인 영향을 미치는 現象들에 대하여 보다 근본적으로 파악할 필요가 있다.

초유동 콘크리트의 流動特性을 流動學的인 관점에서 규명하려는 연구가 최근에 활발히 이루어져, 지금까지는 定性的으로 밖에 표현되지 않았던 굳지 않은 콘크리트의 流動特性을 定量的이고 통일적으로 평가하는 것이 점차로 가능해져 가고 있다. 굳지 않은 콘크리트가 自重이나 各種 外力을 받은 경우에 나타나는 복잡한 變形舉動을 어느 일정한 法則으로 수치모형화가 가능하다면 굳지 않은 콘크리트의 流動特性을 어떠한 物理量을 이용하여 定量的으로 평가하거나 작업성을 해석적으로 예측하는 것이 가능하게 된다.

著者は 超流動 콘크리트의 최근의 실용화동향에 대해서는 콘크리트학회지 제5권 2호에 소개한 바 있으며,⁽³⁾ 本稿에서는 超流動 콘크리트를 실용화시키기 위한 보다 근본적인 解決方法으로서 超流動 콘크리트의 要求性能인 流動性과 自己充填性を 流動學에 의거한 해석적인 방법으로 규명하는 방법을 고찰해 보고자 한다.

* 정희원, (주)대우 건설기술연구소 선임연구원, 공학박사

** 정희원, (주)대우 건설기술연구소 소장, 전무이사

표 1 일본의 초유동 콘크리트

工 法 名	개발회사	개발년도	특 징
SF 콘크리트 (Super Flow Concrete)	日本國土開發	1988	- 주로 증점제로 성상을 얻음 - 레이콘 공장과 공사 현장의 레이콘 차에서 모두 제조 가능
초유동콘크리트	間組	1990	- 주로 분체로 성상을 얻음 - 분체의 재료는 현장조건이나 대상 구조물에 맞추어 선택
NV 콘크리트 (New Value Concrete)	鹿島建設	1990	- 분리식항상을 높이기 위해 석분을 활용 - 1991년에는 유동성을 안정시킬 수 있는 특수增粘劑를 개발
뉴로크리트 (Neurocrete)	大林組	1991	- 분체로 성상을 얻음 - 구조물 종류나 조건에 의해 세가지 Type(표준, 고성능, 매스콘크리트)의 선택 가능
하이퍼포먼스 콘크리트 (High Performance Concrete)	前田建設工業	1991	- 增粘劑와 분체를 모두 사용하여 성상을 얻음
다짐불필요 콘크리트	奥村組	1991	- 주로 增粘劑로 성상을 얻음 - 강도를 낮출 수 있다는 특징을 가지고 있음 - 강도는 300~400kg/cm ² 에 대응가능
초유동성 콘크리트	鐵建建設	1991	- 분체와 증점제 모두로 성상을 얻음 - 고강도로 만들때에는 증점제는 미사용 - 600kg/cm ² 이상의 고강도로 제조가능
고유동 고강도 콘크리트	鹿島建設	1992	- 고유동·고강도용 시멘트를 사용하여 강도 1000kg/cm ² 정도를 세고 가능
秩父 High Flow Cement	秩父시멘트	1992	- 고성능 AE감수제와 병행 사용하여 낮은 물시멘트 비에서도 초유동 콘크리트를 제조할 수 있는 시멘트
Non Vibrator 고강도경량 콘크리트	清水建設	1992	- 주로 증점제로 성상을 얻음 - 타설후 3일에 300kg/cm ² 가 가능 - 중량이 1.8~1.9t/m ³ 으로 종래보다 2할정도 가벼움
시크리트 S (Seacrete S)	鴻池組	1985	- 셀룰로오스계 수중불리성 혼화제를 사용한 콘크리트 - 고강도 콘크리트를 개량시켜 초유동 콘크리트를 개발
초워커블 콘크리트 (High Workable Concrete)	竹中工務店	1992	- 증점제를 사용하지 않음 - 고로 슬래그, AE감수제 사용
비오크리트 21 (Biocrete 21)	大成建設	1990	- 분리적감제 Biopoly 사용 - 고로 슬래그, 플라이 애쉬 사용

2. 超流動 콘크리트의 流動特性 규명

2.1 개요

현재 초유동 콘크리트의 유동특성을 규명하기 위하여 여러가지 방법이 시도되고 있는데, 이는 다음과 같은 세가지 종류로 분류할 수가 있다.

1) 실제의 超流動 콘크리트를 所定の 實驗裝置內에 打設하여 콘크리트의 流動狀態를 觀測, 測定值를 定量的으로 평가하는 實驗的 研究^{(4),(5),(6)}

2) 굳지 않은 콘크리트의 구성성분(시멘트, 골재등)을 다른 재료로 代替하여 流動舉動을 육안으로 관찰하는 可視化 手法^{(7),(8)}.

3) 굳지 않은 콘크리트에 Bingham모델 등 流動

學的 모델을 도입하여 粘塑性體에 대한 有限要素解析을 통해 콘크리트의 유동특성을 규명하는 해석적 연구^{(9),(10)}.

먼저 첫번째의 접근방식은 주로 기업연구소들이 초유동 콘크리트의 개발에 사용하는 방법으로, U字型充填試驗裝置나 過密配筋試驗裝置 등 각 회사별로 독특한 시험장치를 만들어 測定值를 정량화하여 특성을 평가하고 있다. 그러나, 현재로서는 통일된 시험법은 없는 상태이다. 그리고 두번째 방법은 콘크리트에 사용되는 모든 構成成分, 즉 굵은 골재 및 골재 그리고 시멘트 등을 동일한 특성을 가진 球狀形粒子로 모델화시킨 이른바 모델 콘크리트를 이용한 가시화 실험기법을 통해 骨材粒子間의 相互 運動狀態를 검토하는 방법이고, 세번째 방법은 최근에 가장 활발히 검토되고 있는 방법으로서, 流動定數를 입력데이터로 하여 有限要素解析을 통해 流動狀態를 컴퓨터 시뮬레이션하는 방법이다. 이 세번째의 해석적인 방법에 대해서는 4장에서 자세히 설명하도록 하겠다.

그러나 초유동 콘크리트의 流動特性은 이 중 한 가지 방법만에 의해서는 해명이 곤란한데, 예들 들어 첫번째 방법으로 측정된 流動定數를 세번째 방법에서 입력데이터로 사용하고, 이에 대한 증명을 두번째 방법으로 하는 등 상호 보완적인 연구가 필요하다.

2.2 降伏値와 塑性粘度

통상 콘크리트의 워커빌리티를 평가하는데에 가장 일반적으로 사용하는 시험은 슬럼프시험으로서, 슬럼프치 測定을 위해 슬럼프 콘을 들어 올리게 되면 콘 속의 콘크리트는 自重에 의해 아랫방향으로 변형하게 된다. 이 때에 위에서 작용하는 힘이 그 自體의 抵抗力보다 작을 경우에는 변형이 일어나지 않고, 저항력보다 클 경우, 즉 施工軟度가 좋은 콘크리트 경우에는 그 粘性에 맞는 速度로 變形을 하게 된다. 여기서 抵抗力, 즉 停止와 流動의 限界가 되는 힘을 流動學的인 側面에서 降伏値(yield value) 또는 降伏應力(yield stress)이라 한다. 이 때의 힘은 변형을 일으키려는 힘(콘크리트의 自重)에 대해서 저항하는 방향으로 작용

하기 때문에 剪斷應力으로 나타나지며, 또한 이 힘은 g/cm^2 라는 시간과는 관계없는 단순한 힘의 단위로 표현되며, 주로 靜的平衡狀態에 있는 콘크리트의 軟度를 나타내는 指標로서 사용되어, 슬럼프試驗은 流動學的으로 말하면 降伏値를 測定하는 시험이라 할 수 있다.

유동학에서는 流體의 특성을 평가하는 수단으로서 物體의 軟度를 나타내는 降伏値외에 粘性을 나타내는 物理量을 사용하고 있다. 통상 理想的인 粘性流體인 Newton流體에서는 단순히 粘度라는 物體의 變形速度에 따른 抵抗力을 나타내는 용어를 사용하고 있으나, 굳지 않은 콘크리트와 같이 어느 정도의 硬性을 가진 재료에 대해서는 塑性粘度라는 용어가 사용된다. 塑性粘度는 $dyne/cm^2 \cdot sec$ 또는 $g/cm \cdot sec$ 라는 단위로 표현되며, Poise라는 학자의 이름을 따서 보통 poise라고 부르기도 한다. 콘크리트의 콘시스턴시의 評價척도로서 사용되는 슬럼프치나 플로우치 등은 단순한 공학적인 값인데 반하여, 降伏値나 塑性粘度와 같은 物理量은 流動解析時 入力値로 사용할 수 있다는 점이 커다란 차이로 할 수 있다.

굳지 않은 콘크리트의 流動에 있어서 降伏値와 塑性粘度와의 相互關聯性을 보면, 동일한 剪斷應力이 作用하는 狀態에서, 塑性粘度가 크면 변형에 대한 저항력이 커서 재료분리등은 잘 일어나지 않지만, 오히려 剪斷變形速度는 작게 되어 物體의 變形速度가 느려진다. 그러나 塑性粘度가 작을 경우에는 변형속도는 빠르지만 재료분리가 잘 일어나는 등 시공연도와 粘性은 변형에 대하여 상반된 영향을 끼치게 된다.

보통 콘크리트에 있어서는 降伏値와 塑性粘度가 비례하는 범위에 분포하고 있어 기존에 슬럼프 시험을 통하여 콘크리트의 軟度만을 파악하면 개략적으로 콘크리트의 성질을 파악할 수 있었다. 그러나 고강도 콘크리트나 水中不分離 콘크리트 등과 같이 보통 콘크리트에 비해 월등히 粘性이 큰 콘크리트에 있어서는 연도만에 의한 기존의 1차원적인 평가만으로는 그 특성을 제대로 평가할 수 없다는 문제점이 있다. 따라서 이러한 특수 콘크리트의 특성을 定量的으로 평가하기 위해서는 施工軟度와 粘性을 포함한 2차원 또는 그 이상의

평가방법이 절대적으로 요구된다. 그림 1은 降伏値와 塑性粘度 등 두가지의 流動正數를 축으로 하는 좌표상에, 각종의 콘크리트의 분포 범위를 개략적으로 표시한 것이다.

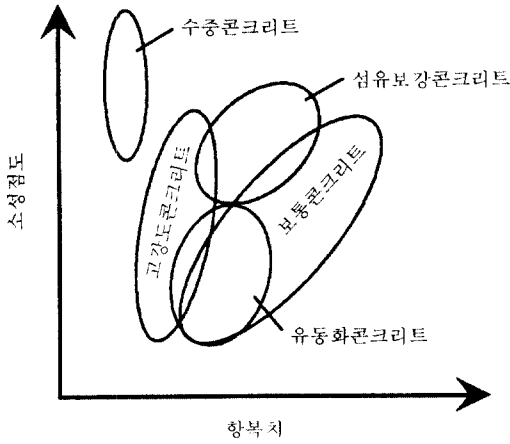


그림 1 굳지않은 콘크리트의 항복치와 소성점도

통상 콘크리트 타설시 유동성을 좋게 하기 위해서 단위수량을 증가시키거나 流動化劑등을 첨가시키는데, 이것은 콘크리트가 가지고 있는 固有의 降伏値를 작용외력보다 작게 하여 다짐작업을 용이하게 할 수 있도록 하는 것과 동일한 효과를 나타낼 수 있다. 또한 콘크리트 타설시 거푸집의 구석구석까지 콘크리트가 잘 채워지도록 진동기를 이용하여 다짐작업을 하게 되는데, 振動機를 이용하여 다짐을 한다는 것을 유동화적으로 풀이하면, 타설한 콘크리트가 가지고 있는 고유의 降伏値보다 더 큰 외력을 콘크리트에 가해 상대적으로 콘크리트의 降伏値를 낮추는 효과를 얻어 自己充填性이 좋도록 만드는 것을 의미한다. 그러나 振動機의 振動은 콘크리트속을 전파하면서 減鎖되기 때문에 流動化되는 범위는 한정되어 일정한 間隔으로 다짐작업을 실시하지 않으면 안된다

塑性粘度가 큰 콘크리트란 材料分離가 잘 일어나지 않는 콘크리트를 의미하는데, 이러한 塑性粘度를 크게 하는 방법으로서 시멘트량을 늘리거나 增粘劑등을 첨가시키는 방법 등이 있으며 이 점이 현재 일본에서 초유동 콘크리트의 개발에 있어서 주안점이 되고 있다. 이러한 부류에 속하는 것이

고강도 콘크리트와 水中不分離 콘크리트 등이다. 그러나 초유동 콘크리트와 같이 고유동성과 고분리저항성이 요구되는 콘크리트는 여기에 낮은 降伏値를 요구하고 있으므로 적절한 配合를 통해 두가지 특성을 효율적으로 증진시키는 방안을 모색하는 것이 중요하다 (그림 2 참조).

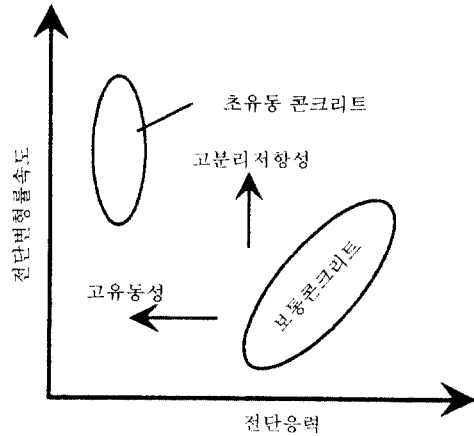


그림 2 보통 콘크리트의 초유동화

2.3 超流動 콘크리트의 다짐불필요 實現

鐵筋이 치밀하게 配筋되어 있는 곳이나 거푸집 형상이 복잡한 곳에 슬럼프치가 작은 된비빔의 콘크리트를 타설할 경우에는 골재가 凝集現象을 일으켜 打設部가 막히는 이른바 骨材閉鎖現象이 일어나게 된다. 이러한 骨材閉鎖現象은 시공성에 절대적인 影響을 미치므로 自己充填性이 요구되는 超流動 콘크리트의 실현을 위해서는 반드시 이러한 현상에 대해서 규명할 필요가 있다.

골재의 閉鎖現象에 가장 큰 영향을 미치는 요인은 骨材相互間의 運動으로서, 콘크리트의 自己充填性은 골재와 골재間, 그리고 골재와 鐵筋間의 接觸에 의한 接觸摩擦에 의해 저해된다고 할 수 있다. 콘크리트 打設時 振動機를 이용해 다짐作業을 하는 것도 振動을 통해 콘크리트의 構成材料를 移動시켜 이러한 接觸摩擦, 즉 粒子相互間의 剪斷抵抗을 감소시키는 것을 의미한다.

骨材相互間의 接觸摩擦을 줄이는 方法으로서 우선적으로 생각할 수 있는 것이 콘크리트속의 골

재 간격을 크게 하는 방법이다. 골재 간격을 크게 하기 위해서는 골재의 크기나 양을 줄여 대응하는 방법과 微粉末結合材의 量을 늘리는 방법이 있다. 그러나 이러한 方法들은 다짐불필요를 실현하기 위해서 기본 개념으로서 고려할 필요는 있지만, 이에 대한 명확한 해명이 없는 狀態에서 단순히 骨材量을 低減시키거나 골재치수를 줄이는 방법들은 콘크리트의 強度面이나 耐久性面에서도 바람직하지 못하므로 注意를 해야 한다. 현재 보고된 試驗結果에 의하면 콘크리트가 통과하는 領域의 直徑과 골재의 平均粒徑과의 比가 대략 10배정도일 경우에 充填이 잘 이루어지는 것으로 알려져 있다.

골재가 많이 포함된 비교적 된비빔의 콘크리트를 모델링하는데는(그림 3 참조), 粘土와 같은 粒相體에 대하여 주로 사용하는 식(1)과 같은 Mohr Coulomb식이 많이 이용된다. 이 식을 이용하면 骨材相互間 또는 骨材·管壁間의 接觸摩擦等에 의한 傳達抵抗을 骨材相互間의 接觸이나 結合材粒子間의 接觸·衝突로 전달되는 摩擦成分($\sigma \cdot \tan\phi$)과 시멘트풀이 전달변형에 저항하는 粘着成分(C)의 합으로 표현할 수 있다.

$$\tau = C + \sigma \tan\phi \quad (1)$$

여기서 c : 粘着力
 ϕ : 内部摩擦角
 σ : 垂直應力

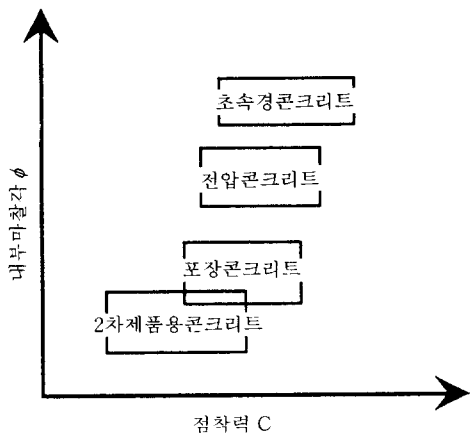


그림 3 된 비빔 콘크리트에서의 점착력과 내부마찰각의 분포

골재의 閉鎖現象을 규명하기 위해서 실험적으로는 1面直接剪斷試驗을 많이 실시하고 있는데, 이 시험을 통하여 剪斷應力과 垂直應力을 측정하게 되면 파괴포락선의 기울기, 즉 재료의 内部摩擦角을 決定할 수가 있으므로 배합상태를 변화시키면서 内部摩擦角을 결정하면 内部摩擦角이 최소가 되는 배합상태를 찾을 수가 있다(그림 4 참조). 다시 말해서 内部摩擦角이 작을 수록 垂直應力이 증가하여도 剪斷抵抗은 크게 증가하지 않으므로, 골재간의 剪斷抵抗이 최소가 되는 配合狀態를 찾게 되면 결국에는 骨材粒子間의 凝集 및 閉鎖現象을 피할 수 있게 된다.

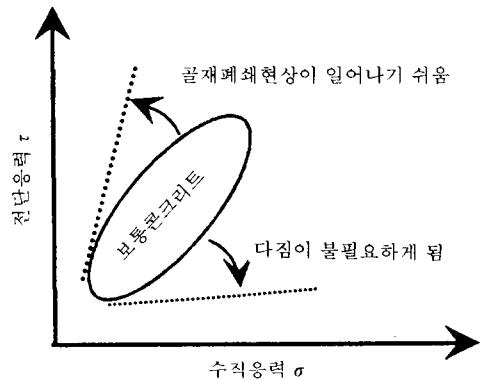


그림 4 다짐불필요 실험

3. 초유동 콘크리트의 유동학적 메카니즘

3.1 개요

초유동콘크리트에 대한 유동학적 메카니즘을 규명하기 위해서는 콘크리트의 유동학적 특성에 관한 시험데이터의 축적과 이를 기초로 한 유동학적해석법에 대한 연구가 필요하다. 당초 굳지 않은 콘크리트에 대한 流動學的 연구는 前者가 대부분을 차지하여 粘性를 측정할 수 있는 각종 시험법의 개발이 주를 이루었다. 물론 流動特性을 定量화시킨다면 後者에 관한 연구도 RC유한요소해석법과 같이 精確된 콘크리트를 대상으로 한 해석범위라면 많은 학문의 발전이 있었겠지만, 굳지 않은 콘크리트의 流動性을 定量화시킨다는 것은, 굳지 않은 콘크리트가 매우 불균질하고 불안정한

복합재료이며, 管内 壓送이 가능한 流體에 가까운 재료에서 RCC(Roller Compacted Concrete)와 같이 매우 硬性이 있는 材料까지 그 배합에 따라 그 성질의 변화가 현저하다는 특징을 가지고 있기 때문에 굳지 않은 콘크리트의 유동성을 일정한 모델로 표현하는데 있어서 커다란 장애 요인이 되어 왔다.

그러나 최근에는 水中不分離 콘크리트나 超流動 콘크리트 등과 같이 특수성이 요구되는 콘크리트의 개발이 요망되고 있어 굳지 않은 콘크리트의 流動特性을 定量化시키려는 데에 많은 노력이 경주되고 있다. 그 일환으로서 굳지 않은 콘크리트를 連續體로서 취급하여 Bingham 모델이나 Mohr Coulomb 모델 또는 조금더 개량된 수치 모델을 적용하는 것이 적극적으로 검토되고 있고, 각종 시공 조건에 대응할 수 있는 유동현상의 범용 해석 기법에 관한 연구가 보고되고 있다.

3.2 施工軟度가 좋은 콘크리트에 대한 Bingham 모델의 적용

流動學(rheology)이란 물리학의 한 분야로서, 물질의 변형이나 유동문제 등을 다루는 역학에는 가장 가까운 학문이라 하겠다. 流動學에서는 통상 물체에 외력을 가했을 때에 그 물체가 理想粘性流體(Newton 流體)일 경우에는 식(2)와 같이 물체에 작용하는 剪斷應力이 剪斷變形率速度에 비례한다고 가정하고 있다⁽¹¹⁾.

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (2)$$

여기서 η : 粘性係數
 $\dot{\gamma}$: 剪斷變形率速度

한편, 굳지 않은 콘크리트를 流動學的인 見地에서 취급하는 연구에 의하면, 콘크리트의 流動特性은 Newton 粘性을 나타내지 않고 어느 크기의 偏差應力이 작용할 때까지는 유동하지 않는 Bingham 流體에 가까운 舉動을 나타내고 있다⁽¹¹⁾. 즉, 굳지 않은 콘크리트는 응력이 아주 작은 범위에서는 彈性舉動을 나타내지만, 剪斷應力이 降伏值 τ_y 를 넘게 되면 塑性體로서 舉動하여 流動이 시작한다. 굳지 않은 콘크리트의 경우 剪斷變形率速

도와 剪斷應力과의 관계는 直線의 比例關係는 아닌 것으로 알려져 있지만, 이 관계를 근사적으로 直線으로 가정한다면 식(3)과 같이 표현할 수 있다. 이 때의 비례정수가 앞의 2장에서 설명한 粘性을 나타내는 지표인 塑性粘度이다.

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{\eta_p}(\tau - \tau_y) \quad (3)$$

여기서 τ_y : 降伏值,
 η_p : 塑性粘度

식(3)을 剪斷應力에 관해서 정리하면 식(4)와 같이 되며, 이 식은 Bingham이 純剪斷狀態에 있는 粘塑性材料를 대상으로 제안하였기 때문에 Bingham의 기초방정식이라고도 한다.

$$\tau = \tau_y + \eta_p \dot{\gamma} \quad (4)$$

이러한 Bingham의 기초방정식을 그림으로 나타내면 그림 5와 같다.

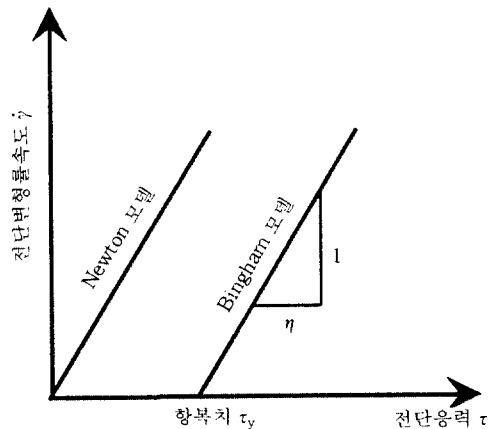


그림 5 Bingham 모델

당초 Bingham 모델은 시멘트풀과 같이 高濃度의 粘性流體에 우선적으로 적용되었으나, 回轉粘度計나 振動式粘度計 등 각종 粘度計를 이용해 降伏值과 塑性粘度를 측정하면 굳지 않은 콘크리트의 流動特性도 定量化시킬 수 있다는 착상에서 연구가 시작되었다. 따라서, 슬럼프치가 15cm 정도

이상인 반죽질기가 상당히 좋은 콘크리트의 경우는 주로 매트릭스부분의 영향을 많이 받기 때문에 Bingham모델로 표현이 잘 되는 것으로 알려져 있다.⁽¹²⁾(슬럼프치가 10cm정도이하인 된비빔의 콘크리트는 매트릭스 부분보다는 오히려 골재의 영향을 많이 받기 때문에, 다음에 기술하는 Mohr-Coulomb모델과 같이 骨材間의 摩擦을 고려할 수 있는 모델이 필요하다).

Bingham모델에 있어서 콘크리트의 變形舉動은 内部應力狀態에는 의존하지 않고 단지 콘크리트가 가지고 있는 고유의 降伏値와 内部應力과의 大小관계에만 의존하는 일정한 값으로 표현되는데, Bingham모델을 텐서를 사용한 항복조건식으로 바꾸면 식(5)와 같은 형태로 된다. 이 경우 항복함수는 von Mises의 항복함수와 동일한 형태가 되는데, 식(5)에 있어서 항복함수 f 가 負의 값을 나타내는 경우는 降伏値가 外力보다 커서 停止해 있는 狀態가 되고 f 가 正의 값이 될 경우에는 f 에 따른 變形速度를 가지고 流動하는 狀態를 나타낸다.

$$f = \sqrt{J_2} - \tau_y \quad (5)$$

여기서 J_2 : 偏差應力텐서의 2차不變量
 τ_y : 항복치

이러한 일정한 降伏値는 3次元 主應力空間에 표시하면 그림 6과 같이 항복곡면으로 표현되어 원

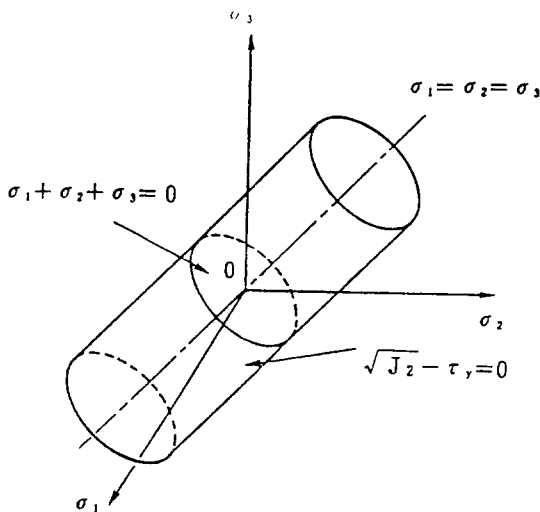


그림 6 von Mises의 항복곡면

통의 내부점으로 표시될 경우에는 停止된 狀態를 의미하고, 원통밖일 경우에는 流動하는 狀態를 의미한다.

3.3 Mohr-Coulomb 모델

일반적으로 모래와 같은 固體 粒子的 集합체는 垂直應力과 剪斷抵抗이 거의 比例關係를 나타내고 있지만, 石灰質 微粉末이 포함되어 있는 경우에는 그 結合力에 의해 垂直應力이 0인 경우에도 剪斷抵抗을 가진다. 콘크리트의 경우에도 시멘트에 의한 粘着力이 있기 때문에 식(1)과 같은 Mohr-Coulomb식을 적용한다면 粘着力 C 와 内部摩擦角 ϕ 를 이용하여 剪斷強度의 特性을 평가할 수가 있다.

Mohr-Coulomb모델은 보통 흙의 파괴거동을 표현하는데 가장 많이 사용되는 모델로서, 골재의 영향에 의해 粉粒體의 성질이 크게 좌우되는 굳지 않은 콘크리트의 모델링에는 앞에서 언급한 Bingham모델보다는 훨씬 그 성상을 잘 표현하는 것으로 알려져 있다. 특히 2장에서 전술한 바와 같이 Mohr-Coulomb의 모델은 主要因子로서 粘着力과 内部摩擦角등 두개의 流動定數를 사용해 應力狀態에 의존하는 降伏値를 표현하고 있는데, 1面剪斷實驗등을 통하여 剪斷應力값과 垂直應力값을 실험적으로 측정하면 골재의 폐쇄현상을 잘 표현할 수가 있다.

Mohr-Coulomb의 降伏條件을 그림으로 나타내

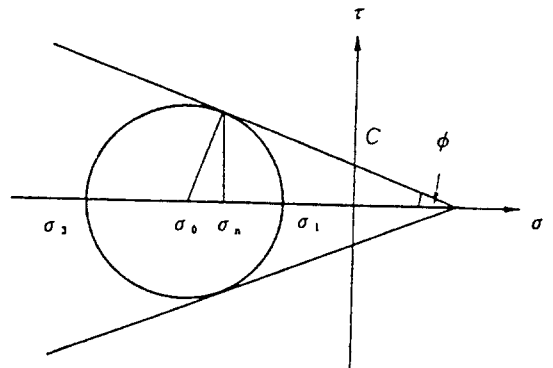


그림 7 Mohr-Coulomb의 항복조건

면 그림 7과 같다. 그림 6에 있어서 축과 만나는 점이 粘着力C 이고 파괴포락선의 경사가 内部摩擦角 ϕ 이다. 破壞面에서의 剪斷應力이 降伏値에 도달하게 되면, 다시 말해서 Mohr의 응력원이 파괴포락선과 접하게 되면 재료는 降伏을 일으켜 유동하기 시작하게 된다.

그러나 Mohr Coulomb의 모델은 降伏條件만을 표현하는 것으로 항복후의 流動에 대해서는 언급을 하고 있지 않다. 따라서 Mohr-Coulomb의 降伏條件을 von Mises의 降伏曲面과 마찬가지로 임의의 應力狀態로 확장한 것이 Drucker Prager의 降伏曲面이다. 이것은 그림 8에 표시한 바와 같이 垂直應力에 따라 달라 圓錐形의 降伏曲面을 가진다.

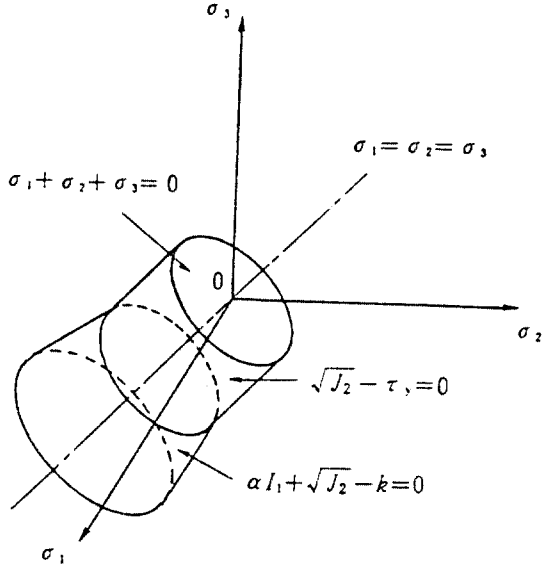


그림 9 복합모델의 항복곡면

이러한 복합모델의 降伏曲面은 그림 9에 표시한 바와 같이 圓柱形과 圓錐形을 組合시킨 형태로 되며, 여기서 圓柱形의 부분은 流動하는 매트릭스의 降伏面을 나타내고, 圓錐形의 부분은 골재의 interlocking에 의한 抵抗力을 나타낸다. 즉, 이 모델에서는 垂直應力이 작은 범위에서는 Bingham모델로 표현되는 매트릭스부의 降伏値가 지배적이고, 垂直應力이 큰 범위에서는 골재의 interlocking에 의한 抵抗値가 지배적이 된다.

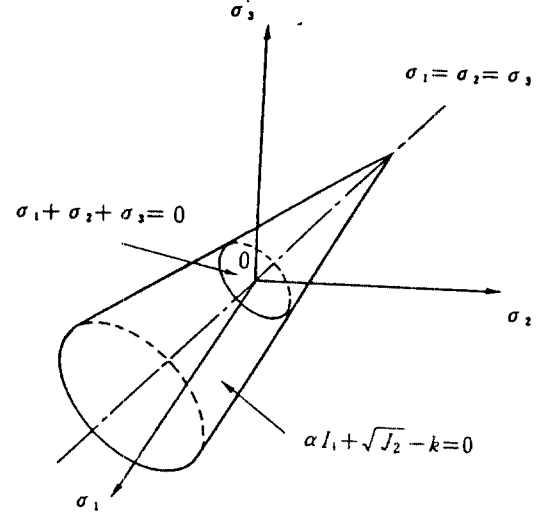


그림 8 Drucker Prager의 항복곡면

4. 유동해석방법

4.1 개요

현재 초유동 콘크리트에 대한 유동해석법이 활발히 연구되고 있는데, 이러한 流動解析法을 이용하면 自重이나 振動力에 의해 굳지 않은 콘크리트가 變形하는 狀況을 시간경과에 따라 해석할 수가 있고, 또한 거푸집내에서의 充填性외에 굳지 않은 콘크리트내부의 應力分布, 그리고 거푸집에 作用하는 側壓의 分布도 계산할 수 있다. 解析의 대상 으로서는 거푸집내에 打設되는 콘크리트의 充填性 확인, 鐵筋 주변이나 거푸집의 구석등에의 充

3.4 複合모델

앞에서 기술한 바와 같이 슬럼프치가 큰 콘크리트의 모델링에는 Bingham모델이 적합하고 슬럼프치가 작은 된 비빔의 콘크리트 모델링에는 Mohr-Coulomb모델이 적합한 것으로 알려져 있다. 그러나 굳지 않은 콘크리트를 타설상황에 따라 연속적으로 취급하기 위해서는 Bingham모델과 Mohr-Coulomb모델을 동시에 고려할 수 있는 복합모델의 개발이 요구된다.

填性, 펌프나 管内에서의 流動, 閉鎖의 狀況, 각종 流動定數試驗이나 반죽질기 시험방법, 골재의 沈下나 材料分離性狀등 미시적인 것부터 거시적인 것까지 모든 것을 평가할 수가 있다.

그러나 이러한 流動解析에 있어서 가장 중요한 것은 굳지않은 콘크리트의 性質을 표현하는 流動定數이다. 複合材料로서 많은 不確定要素를 포함하는 굳지않은 콘크리트의 性狀을 數值的으로 표현하는 것은 매우 어렵다. 따라서 최근에는 굳지않은 콘크리트의 變形舉動을 시뮬레이션하는 數值解析法과 더불어 이러한 數值解析의 입력자료로서 사용되는 流動定數를 測定하는 試驗方法에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다.

최근에 제안되어 있는 流動解析法은 다음과 같이 크게 두가지로 나눌 수 있다.

첫째는 굳지않은 콘크리트를 굽은 골재도 포함한 均질한 連續體 材料로 간주하는 방법이다^{(13),(14),(15)}. 이 방법은 간단하여 실용적이기는 하지만, 材料分離現象등을 시뮬레이션하는 데는 특별한 처리를 필요로 하고, 콘크리트의 流動定數 測定에 관한 자료가 적다는 문제점을 가지고 있다. 流動定數의 測定에 관한 기존의 연구들은 대부분이 시멘트풀 또는 모르터를 대상으로 한 것이기 때문에, 굽은 골재를 포함하는 콘크리트에 대해서는 測定方法 자체의 신뢰성이 아직 충분히 확보되어 있지 않다.

두번째 방법은 굳지 않은 콘크리트를 골재와 매트릭스로 구성된 混合材料로 취급하는 해석방법이다⁽¹⁶⁾. 굳지 않은 콘크리트의 流動·變形은 굽은 골재사이의 모르터의 변형에 의한 것으로, 有限要素解析에 있어서도 변형하지 않는 굽은 골재부의 要素와 變形이 일어나는 모르터부의 요소등 두가지를 이용하여 계산을 행하는 방법이다. 이 방법은 비교적 流動試驗을 행하기 쉬운 모르터의 特性을 이용할 수 있다는 것, 굽은 골재의 영향이나 材料分離現象등을 시뮬레이션할 수 있는등의 장점은 있지만, 각 굽은 골재를 요소로서 취급하기 때문에 계산량이 막대하여 굳지 않은 콘크리트의 시공성을 평가하는 데는 현실적이지 못하다는 단점이 있다.

이들 방법중에 가장 대표적이고 간단한 방법은

첫번째의 粘塑性 有限要素法에 의한 流動解析法으로, 이에 대한 해석에는 많지 않지만 谷川^{(13),(14)}에 의해 제안된 방법을 중심으로 설명하고자 한다.

4.2 降伏條件 및 構成方程式

粘塑性 有限要素法에서는 굳지않은 콘크리트의 流動特性을 Bingham모델로 가정하고, 流動定數인 降伏値와 塑性粘度를 入力値로서 이용하며, 降伏條件으로서는 von Mises식을 사용한다. 또한 비교적 施工軟度가 좋은 콘크리트는 Bingham모델에 Coulomb식으로 표현되는 부착력과 내부마찰각을 降伏條件에 포함시킨 복합모델을 이용하여 모델링한다.

일반적으로 점탄성체모델의 전변형률속도는 식(6)과 같이 표현되며, 이 식을 단순화시키면 식(7)과 같이 나타내진다.

$$\{\dot{\epsilon}\} = \{\dot{\epsilon}^e\} + \{\dot{\epsilon}^v\} = \{\dot{\epsilon}^e\} + \frac{1}{2\eta_G}\{\sigma'\} + \frac{1}{3\eta_K}\{\sigma_m\} \quad (6)$$

여기서 $\{\dot{\epsilon}^e\}$: 탄성변형률 성분

$\{\dot{\epsilon}^v\}$: 점성변형률 성분

$\{\sigma'\}$: 편차응력

$\{\sigma_m\}$: 평균수직응력

η_G, η_K : 전단변형 및 체적변형의 점성계수

$$\{\dot{\epsilon}^e\} = \frac{1}{\eta_G}\{\sigma'\} \quad (7)$$

복합모델에서 사용하는 구성방정식 및 降伏條件은 각각 식(8), 식(9)와 같다.

$$2\eta V_{ij} = \begin{cases} 0 & (F < 0) \\ F\sigma'_{ij} & (F \geq 0) \end{cases} \quad (8)$$

여기서 V_{ij} : 변형속도 텐서

σ'_{ij} : 편차응력 텐서

식(8)에 있어서 F는 항복함수로서 식(7)과 같이 표현된다.

$$F = 1 - \tau_y' / \sqrt{J_2} \quad (9)$$

$$\tau_y' = 0 \quad (I_1 > 0)$$

$$(\tau_y, k - \alpha I_1)_{\max} \quad (I_1 \leq 0)$$

$$\alpha = \tan\phi / \sqrt{9 + 12\tan^2\phi}$$

$$k = 3C / \sqrt{9 + 12 \tan^2 \phi}$$

여기서 τ_y : 매트릭스의 降伏値

τ_y' : 굳지않은 콘크리트의 降伏値

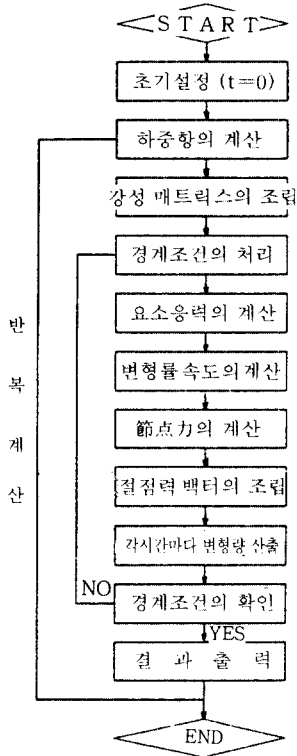


그림 10 점소성 유한요소법에 의한 해석 순서

4.3 해석 순서

통상의 粘彈性解析에 있어서는 각 시간마다 반복되는 變形率 및 응력의 산정시에 粘性變形率 성분은 앞에서 계산한 彈性應力 성분의 함수로서 얻어지지만, 본 해석에서는 彈性變形을 0으로 가정하기 때문에, 대단히 커다란 탄성계수를 이용하는 경우의 계산과 유사하여, 임의의 위치에서의 응력은 전체를 순간적인 彈性體로서 가정하여 계산된다.

粘塑性 유한요소법 의한 해석 순서를 간단히 정리해 보면 다음과 같다.

① 彈性解析을 통해 얻어진 각 요소의 응력을 식(7)의 구성방정식에 대입하여 변형속도를 계산

한다.

② 얻어진 요소의 변형속도에 彈性剛性매트릭스 [D] 를 곱해 탄성응력 {σ}를 구한다.

③ {σ}를 생기게 하는데 필요한 節点力 {F} 를 積分하여 逆算하고 이것을 이용하여 전체의 變形을 彈性計算하여 구한다.

④ 시간을 증분시켜 가면서 ①~③의 과정을 반복계산하여 單位時間當의 變形量을 산정한다.

이러한 과정을 Flow Chart로 나타내면 그림 10과 같다.

4.4 解析 例題

그림 11은 슬럼프시험시 슬럼프 콘을 들어 올렸을 때 콘크리트에 작용하는 응력의 분석을 粘塑性 유한요소해석법을 이용하여 계산한 결과를 컴퓨터 시뮬레이션한 그림이다.

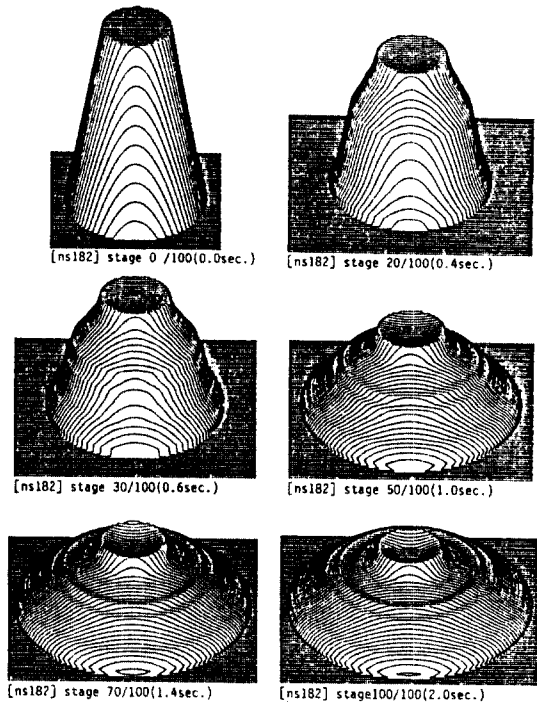


그림 11 점소성 유한요소법을 이용한 슬럼프시험의 컴퓨터 시뮬레이션

컴퓨터 시뮬레이션에서는 콘 형태의 굳지 않은 콘크리트를 수평으로 자른 層狀要素로 分割하여

自重에 의해 각 요소에 작용하는 平均 垂直應力으로부터 最大 剪斷應力을 산출하고, 각 요소의 最大 剪斷應力이 降伏値보다 클 경우 그 요소는 變形하여 면적이 증대한다. 그리고 變形은 면적의 증대에 따라 最大 剪斷應力이 감소하여 降伏値와 같아질 때까지 계속된다. 따라서 最終變形量인 슬럼프치는 각 層狀要素의 變形量의 積分値로서 나타내진다. 단 실제의 슬럼프시험에서는 아랫면에 있는 試料와 고무판 사이에 摩擦力이 발생하여 변형이 상당히 구속되기 때문에 아랫면에서는 降伏値와 같고 윗면에서는 直線 또는 2차식으로 감소하는 水平抵抗力을 가정하여 변형량을 보정하고 있다.

5. 맺음말

이제는 우리에게도 “고성능 콘크리트”라는 단어가 많은 사람들의 입에 오르내려 ‘고강도’, ‘고내구성’, ‘고유동성’으로 대변되는 高性能이라는 말이 낯설지 않게 받아들여지고 있다. 그러나 고성능콘크리트에 있어서 고강도, 고내구성, 고성능이라는 성질은 결코 분리될 수 있는 성질이 아님을 확실히 할 필요가 있다. 콘크리트를 하나의 대상으로 생각할 때 콘크리트의 타설시에 촛점을 맞추게 되면 그것이 고유동 콘크리트가 되는 것이고, 타설후의 사용성에 촛점을 맞추면 그것이 고내구성 콘크리트가 되며, 강도개념에서 이야기하게 되면 고강도 콘크리트가 되는 것이다.

예를 들어 초유동 콘크리트를 製造하기 위해서는 고성능감수제와 증점제를 첨가하고, 여기에 결합재량을 늘리기 위하여 고로 슬래그나 플라이 애쉬등을 투입한다. 그러나 고성능감수제의 양을 늘리게 되면 건조수축의 영향이 줄게 되어 유동성뿐만 아니라 耐久性도 증진시킬 수가 있고, 고로 슬래그나 플라이 애쉬등은 내구성 뿐만 아니라 강도면에도 크게 효과가 있다. 따라서 다짐이 필요 없도록 만든 초유동 콘크리트는 단지 유동성만을 좋게 한 콘크리트가 아니라 콘크리트의 모든 성능을 증진시킨 고성능 콘크리트라는 것을 알 수 있다.

기존의 문헌을 통하여 초유동 콘크리트 제조에 있어서 가장 기본이 되는 내용을 요약하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

(1) 流動性と 分離抵抗性이 요구되는 초유동 콘크리트를 제조한다는 것은 유동학적으로 말하면 降伏値는 작고 塑性粘度는 큰 콘크리트를 제조하는 것과 같은 의미이다.

(2) 降伏値를 작게 하기 위해서는 골재의 크기를 약간 줄이고 고성능감수제를 일부 투입시킨다.

(3) 塑性粘度를 높이기 위해서는 콘크리트의 粘性을 증가시키는 増粘劑를 사용하던가 또는 시멘트등과 같은 결합재의 양을 증가시킨다.

(4) 고내구성 및 고강도화를 달성하기 위하여 시멘트 대신 고로 슬래그나 플라이 애쉬등 결합재의 투입량을 적절히 조절한다.

이상과 같이 초유동 콘크리트의 제조비결은 비교적 간단히 요약할 수가 있으나, 유동성과 분리 저항성을 동시에 증진시킨다는 것은 콘크리트를 배합해본 사람이라면 결코 쉬운 일이 아니라는 것을 느낄 것이다.

현재 일본에서는 초유동 콘크리트의 개발이 거의 완료되어 이미 실용화 단계에 와 있는 상태이다. 그러나 우리의 실정을 돌아보면, 초유동 콘크리트의 개발을 위한 실험적 연구는 일부 진행되고 있지만, 解析的 研究는 거의 전무한 단계라 할 수 있다. 그러나 초유동 콘크리트의 개발을 위해서는 실험적인 연구도 물론 필요하지만 초유동 콘크리트의 메카니즘 규명 또한 필수적인 것으로 생각된다.

本稿는 초유동 콘크리트에 관한 최근의 연구결과를 요약 정리한 것으로서, 향후 초유동 콘크리트의 메카니즘 규명에 조금이나마 참고자료로서 활용될 수 있기를 기대한다.

6. 참고문헌

1. 小澤 一雅, 前川 宏一, 岡村 甫, “ハイパフォーマンスコンクリートの開発”, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol. 11, No. 1, 1989, pp. 69-74.

2. 超流動コンクリート研究委員會報告書(Ⅰ), 日本コンクリート工學協會, 1993.5.
3. 강석화, 박칠림, “일본에서의 超流動 콘크리트의 실용화동향”, 콘크리트학회지, Vol. 5, No. 2, 1993.6, pp.54-65.
4. 三浦 律彦, 近松 龍一, 青木 茂, 十河 茂幸, “高速流動コンクリートの充填性に関する基礎的研究”, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.13, No.1, 1992.6, pp. 185-190.
5. 佐野 充輝, 万木 正弘, 坂田 昇, “締固め不要コンクリート中のペーストの性状に関する實驗的研究”, 土木學會第46回年次學術講演會講演概要集, 1991.9, pp. 596 -597.
6. 和美 廣喜, 笠井 浩, 柳田 克己, 龜田 泰弘, “回轉翼型粘度計による高強度コンクリートの流動特性測定に関する實驗的研究”, 콘크리트工學論文集, Vol.1, No.1, 1990.6, pp.133-141.
7. 橋本 親典, 丸山 久一, 清水 敬二, “フレッシュコンクリートの管内流動における閉鎖過程の可視化に関する實驗手法”, 콘크리트工學, Vol.26, No.2, 1988.2, pp.119-127.
8. 橋本 親典, 安本 札持, 丸山 久一, “アジテータ内でのフレッシュコンクリートの管内流動における攪拌過程の可視化”, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.13, No.1, 1991.6, pp.89-94.
9. 谷川 恭雄, 森 博嗣, 黒川 善幸, 野田 豊, “テーパー管を通過するフレッシュコンクリートの舉動に関する研究”, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.14, No.1, 1992, pp.427-432.
10. 谷川 恭雄, 森 博嗣, 野田 豊, 渡部 哲己 “フレッシュコンクリートのポンプ壓送に関する解析的研究”, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.14, No.1, 1992, pp.421-426.
11. 村田 二郎, 岡田 清, “フレッシュコンクリートのレオロジー・弾性とクリープ” 山海堂, 1981, pp.41-51.
- 12.フレッシュコンクリートの舉動研究委員會報告書, 日本コンクリート工學協會, 1990.3.
13. 谷川 恭雄, 森 博嗣, 黒川 善幸, 小高 茂央, “動的粘塑性解析手法によるフレッシュコンクリートの流動シミュレーション”, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.14, No.1, 1992, pp. 409-414.
14. 森 博嗣, 谷川 恭雄, “粘塑性有限要素法によるフレッシュコンクリートの流動解析”, 日本建築學會構造系論文報告集, 第374號, 1987.4, pp. 1-9.
15. 淺野 文男, 角 田忍, 兒島 孝之, “有限要素法による水中不分離性コンクリートの流動舉動に関する基礎的研究”, 土木學會第45回年次學術講演會講演概要集第5部, 1990. 9, pp.274-275.
16. 谷川 恭雄, 森 博嗣, 渡邊健治, 三輪正保, “フレッシュコンクリートのテーパー管内流動に関するサスペンション要素法解析”, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol.11, No.1, 1989.6, pp. 727-732. □