

혼합수(물)의 역할

정 연 식

(쌍용기술연구소 콘크리트연구실)

1. 콘크리트에 있어서 물의 역할

콘크리트는 건축 구조재료로는 조금 색다르다고 할 수 있다. 강재와 목재와 달리 재료로서 본래의 성능과 구조 부재로 쓰여진 후의 성능이 일치하지 않는 데에 콘크리트의 색다른 맛이 있다. 즉, 후레쉬한 상태의 콘크리트에 대한 요구성능은 Workability이며, 그중에서도 유동 성능과 충전 성능이 특히 요구되어지는 성능이다. 그러나, 경화된 콘크리트에 대한 요구성능은 강도(주로 압축강도), 변형(주로 영계수), 내구성(건조 수축억제성/동결 용해 저항성/균열 저항성/철근 부식 억제성 - 중성화 억제성)등이 있고, 후레쉬한 상태에 요구되어지는 성능과는 전혀 다르다.

공사현장에서 콘크리트는 아직 굳지 않은 콘크리트(후레쉬콘크리트)의 상태로 사용되지만, 구조물에 요구되는 콘크리트의 성질은 경화된 콘크리트의 성질이다. 이렇게 공사현장에 있어서 정반대의 성질을 나타내는 재료를

이용해서 공사를 진행시키야만 한다는 점이 콘크리트공사의 가장 어려운 점이다.

이와 같이 건축재료로서의 콘크리트는 그 취급에 있어서 다른 재료와는 크게 다르다.

이런 콘크리트의 후레쉬한 상태와 경화후의 상태에 크게 영향을 미치는 것이 콘크리트에 관계하는 「물」이다. 예를 들어, 시멘트와의 화학반응과 후레쉬 콘크리트에 요구되는 적절한 유동성을 만족시키기 위해서는 그에 상당하는 수량이 필요하다. 그렇지만, 후레쉬한 상태의 유동 성능을 높이기위해서 「수량」을 증가시키면 거꾸로 물/시멘트비가 높게 되어 경화후의 강도 부족과 건조 수축의 증대에 의해 균열 저항성이 저하되기도 하고 동결 용해 저항성의 저하에 의한 동해와 중성화 속도의 증진에 의한 철근부식이 일어나게 되어, 경화 콘크리트의 성능을 현저하게 저하시키는 결과를 초래한다.

일반적으로 콘크리트의 요구성능과 그에 관련된 요인들과의 관계는 [표 1]과 같다. 이 표

(표 1) 배합 설계에서 목표로 하는 성능과 주요한 배합 요인과의 관계

		목표 성능에 영향을 미치는 주요한 성능														비고			
성능 구분	배합설계시의 목표 성능	물시멘트비	단위수량	시멘트종류·품질	단위시멘트량	혼화재의종류·양	화학혼화제의종류·량	연행공기량	골재의종류·조직·안정성	골재형상·입도·최대크기	세균·폐물	세골재내의미립부분	단위용적질량	총알량	총염화물량	타설·양생·다짐	온도·습도	함수량·건습상태	탄산가스농도
구조 안정성	구조체 콘크리트 압축강도	◎	○	○		○	○	○	○	○						○	○		
	변형(영계수)	○				○			○	◎								○	
	단위 용적 질량								○	○			◎						
내구성	내구성상의 강도	◎	○	○	△	○	○	○	○	○						○	○		
	중성화 저항성	◎		◎	△			△	△					△		○		○	○
	염화물 이온 침투 저항성	◎	○	○											○			△	
	표면노화 저항성	◎	○						△		△	△					△		
	철근 방청성	◎													◎				
	알칼리 골재 반응 억제성			○		○			○					◎				○	○
	균열 저항성		◎		◎				○		○						△		△
	동결 융해 저항성							◎	○								○	○	○
	마찰 저항성	○	○						○		△						○		
(내열성)			○					◎											
(내화성)	○							○										○	
사용성	수밀성	◎														△	△		
	방사선차폐성								△				◎						
	차음성								△				◎						
	단열성												◎						
시공성	크리프	◎								◎								△	△
	시공상 필요 강도	◎		○		○	○										△		
	응결 시간			○		○	◎										△	△	
	위커벌리터																		
	유동성		◎				△	◎			○								
	재료분리 저항성				◎	△	△			◎	△					△			
	충진성										○					△			
간극통과성		△		△	△	△	△		○	○	△								
경시변화		-	○			○											○		

◎:특히 대응 관계가 강한 것, ○:직접 대응 관계가 있는 것, △:간접 대응 관계가 있는 것

[표 2] 콘크리트내에서 물의 역할

혼합수	비증발성 수분	결정 (+결정수) 수산화칼슘 등의 대형 결정
		미수화 시멘트 계면 천이대부의 과포화 용액
		시멘트 겔(겔 내부에 독립한 물공극)
	증발성 수분	겔수(겔간 작은 공간에 있는 물)
부착수(물리적 흡착력과 모세관력에 의해 유지되는 물)		
모세관수(겔간에 있는 큰 공극내의 물) (기건 상태의 골재 공급수)		
골재 흡수수	(골재 내부에 포함되어 있는 수분으로 통상 포화 상태로 사용한다)	

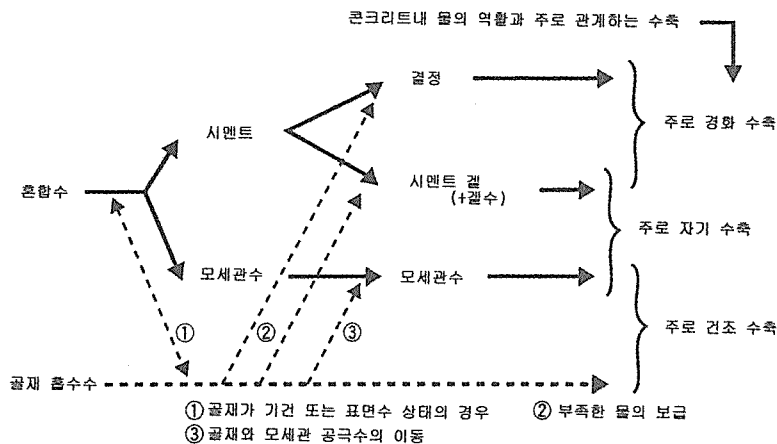
에 나타낸 것처럼 콘크리트의 성능 항목에 많은 부분이 「수량」(물/시멘트비와 단위수량)과 관계되어 있다는 것을 알 수 있다.

콘크리트를 제조할 때 필요한 전체 수량은 한 번에 투입되지만, 혼련이 시작되면 물은 콘크리트 중에서 [표 2]와 같이 목적에 따라 다른 역할을 한다.

2. 콘크리트에 필요한 물

2.1 콘크리트중의 물

콘크리트는 시멘트가 물과 반응(수화반응)



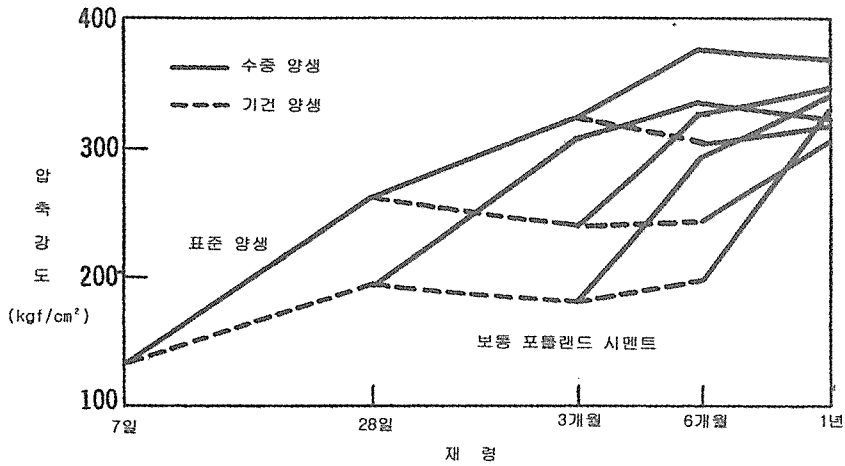
[그림 1] 콘크리트내 물의 역할

해서 강도를 발현하지만, 그림1과 같이 반응한 시멘트 페스트중의 물은 수산화 칼슘 등의 결정(결정수), 시멘트 겔(겔수), 모세관수등의 자유수의 형태로 존재한다. 콘크리트의 유동성과 건조 수축 등은 주로 자유수의 많고 적음 정도에 따라 변화한다.

한편, 골재 중에 흡수된 물은 시멘트와의 반응에서 부족한 수분의 보충원이 되는 경우도 있지만, 일반적으로는 「불활성」으로 콘크리트의 성질에 직접 관계하지 않는다. 그러나, 이것이 적으면 펌프 등에 의한 압송시에, 압력 흡수(콘크리트가 압축됨으로인해 강제적으로 골재 공극 중에 물이 흡입되어, 일시적으로 된 비빔 콘크리트가 된다.)로 인해 극도의 슬럼프 저하를 초래하는 요인이 되고, 너무 많아서 외부에 표면수로 존재하는 상태로 사용하면 콘크리트 혼합시에 단위수량이 불안정하게되어 콘크리트의 품질에 나쁜 영향을 미친다.

2.2 양생을 위한 물

콘크리트 타설후에는 많은 물로 양생을 하는 것이 좋다. 이 경우 양생에 쓰이는 물은 콘크리트의 급격한 건조를 막고 정상적인 강도 발현에 기여한다. [그림 2]는 수중양생으로부터 기건 양생으로 바꾸면 강도 증진이 정체되고 다시 수중 양생으로 되돌리면 강도가 증진한다는 것을 보여준다. 이것은 강도발현에 있어서 수중



(그림 2) 압축 강도에 미치는 수중 양생의 효과

양생의 중요성을 나타내는 것이다.

2.3 콘크리트 제조시 필요한 수량은 어떻게 결정되는가

일반적으로 콘크리트의 배합설계(계획배합)는 이상적인 재료를 사용해서 콘크리트의 요구 성능에 맞는 각종 재료의 비율을 결정하는 것이다. 실제 콘크리트는 이 배합 설계를 기준으로 실제로 사용하는 재료의 품질 보정(현장 배합)을 행하여 제조된다.

제조시에 필요한 물(혼합수)도 먼저 계획 배합시에 단위수량[콘크리트 1m³을 제조할 때에 필요한 수량으로 후레쉬 콘크리트 중에서는 골재 내부에 흡수되어있는 물(흡수량 제외)을 제외한 전체 수량]을 결정하고 그 후에 현장배합에 의해 최종적으로 결정한다.

단위 수량은 콘크리트의 요구성능과 배합비율, 사용 재료의 성능, 강도, 건조 수축 등에 크게 영향을 받지만 요구 성능을 만족시키는 콘크리트를 제조하기 위해서 필요한 단위 수량은 [표 3]에 나타낸 것과 같은 인자들에 의해

결정한다. [그림 3]에 나타낸 예와 같이, 이런 인자들에 의해서 필요한 단위수량은 크게 달라진다. 최근, 사용골재의 품질저하가 현저하기 때문에 소정의 슬럼프를 얻기 위해서 단위수량이 증대되는 경향이 있다.

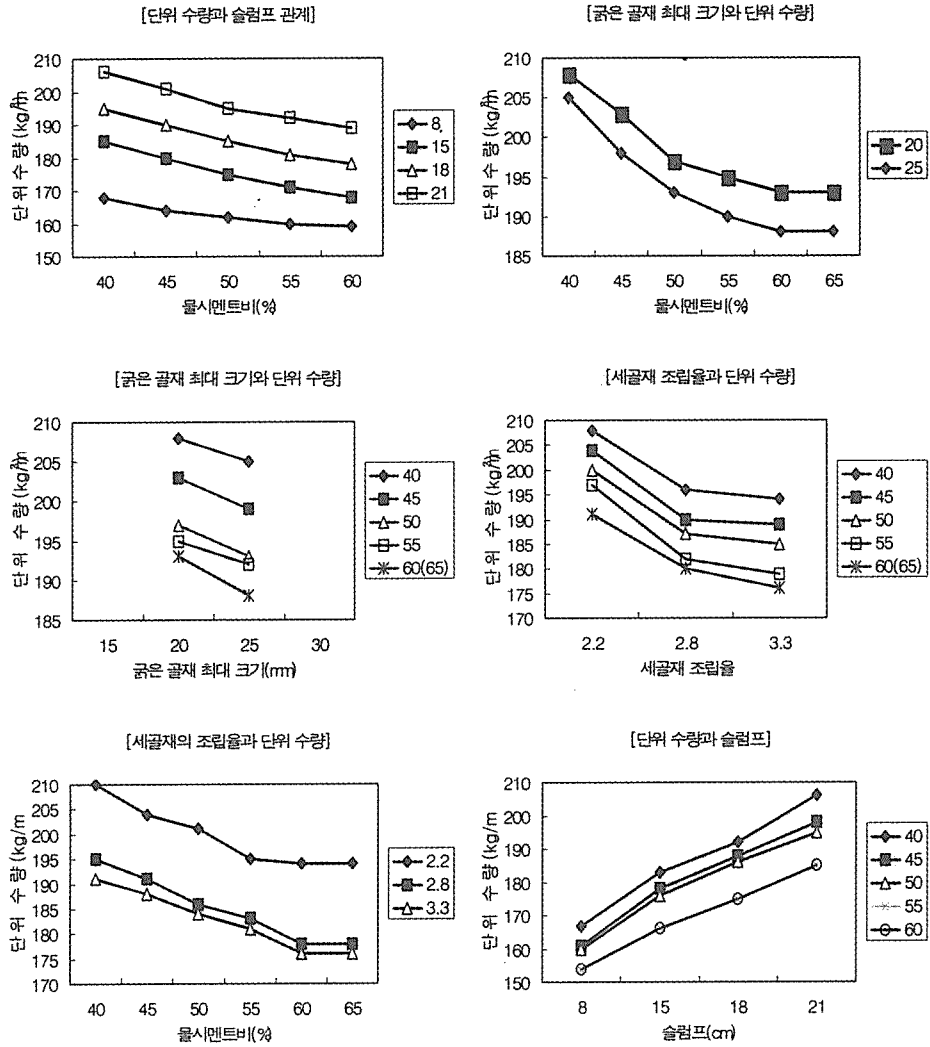
[표 3] 단위 결정을 위한 필요 항목

항목	일반적인 범위 및 종류 등
시멘트의 종류	보통 포틀랜드 시멘트
굵은 골재 최대 크기 실적	자갈(25mm 65.4%), 쇄석(20mm, 59.4%)
혼화제의 종류	AE제, AE감수제, 고성능AE감수제
세골재의 종류 및 조립율	모래(조립율 2.8)
공기량	3~6%
물시멘트비의 범위	40~65%
슬럼프 범위	8~21cm

3. 콘크리트에 좋은 물, 나쁜 물

3.1 후레쉬콘크리트에 대한 물의 영향

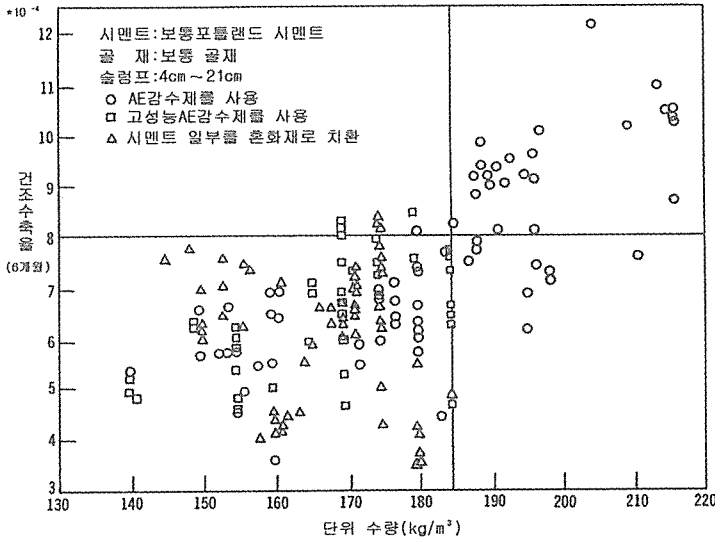
콘크리트의 유동성은 일반적으로 슬럼프 혹



(그림 3) 단위 수량에 영향을 주는 각종 배합 요인

은 슬럼프 flow로 표시되는 「부드러운 정도」에 의해 평가되는데, 후레쉬 콘크리트의 「부드러움」은 일정한 재료를 사용하는 경우 혼합수량의 대소에 의해 영향을 받는다. 특수한 화학혼화제를 사용하지 않을 경우, 이 「부드러움」은 주로 수량의 대소에 의해 결정된다. 즉, 후레쉬 콘크리트의 슬럼프값이 크면 단위수량이 많은 콘크리트이고 슬럼프 값이 작은 콘크리트는 단위수량이 적은 콘크리트가 된다고

판단을 내릴 수 있다. 통상, 콘크리트의 수량은 후레쉬 콘크리트의 분리 저항성의 저하뿐만이 아니라, 경화후의 콘크리트의 강도(W/C가 일정해도 단위수량이 많아지면 강도가 저하하는 예가 있다), 내구성(건조수축, 균열, 중성화, 동결 용해 저항성 저하 등)에 크게 영향을 미치기 때문에 시공성을 확보할 수 있는 범위내에서 가능한 적게 하는 것이 좋다.



(그림 4) 단위 수량과 건조 수축율(6개월)의 관계

3.2 경화콘크리트에 대한 물의 영향(경화 콘크리트의 품질과 물)

콘크리트가 후레쉬한 상태로부터 응결/경화하는 과정에서 물은 수화와 건조에 의해 시멘트 페스트내부에 고정되거나 자유수로 되어 증발하기도 한다.

결정(결정수)과 시멘트 겔 등에 포함되어있는 물은 콘크리트의 강도발현에 관여하기 때문에 시멘트의 양에 대한 비(W/C)로 계산된다. 따라서, 요구 성능이 고강도일 경우에는 물시멘트비는 작게하고 단위수량도 일반적으로 적게한다.

콘크리트의 수축은 온도의 영향을 제외하더라도 자기 수축과 경화 수축, 건조 수축 등을 들 수 있다. 이중에 특히 건조 수축은 단위수량에 의해 크게 영향을 받기 때문에, 물/시멘트비가 크고 단위수량이 많은 것은 건조수축도 크므로 균열발생의 원인이 된다. 이 때문에 「일본 건축학회 표준시방서 JASS 5 철근 콘크리트공사 및 콘크리트의 배합설계지침·동

해설」에서는 과거에 발표된 단위수량과 건조 수축율의 관계를 [그림 4]와 같이 종합해서 콘크리트에 균열을 발생시킬 우려가 있는 건조 수축율을 약 800×10^{-6} 이하로 하는 단위수량의 최대치를 185kg/m^3 으로 정하고 있다.

그리고, 동결응해저항성에 관해서도 수량이 많고 물/시멘트비가 크면 콘크리트내부의 물에 의한 동결 팽창량이 크게되어 동결응해의 반복에 의한 동해가 생기기 쉽다.

철근 콘크리트의 내구성을 나타내는 지표의 하나로 콘크리트의 중성화가 있지만, 일반적으로 중성화는 물/시멘트비가 클수록, 주변 환경의 탄산 가스 농도가 높을수록, 그리고 내부와 표면이 연결되어있는 기공과 균열이 많을수록 빠르게 진행된다. 단위 수량이 많은 경우에는 같은 물/시멘트비 이더라도 건조에 의해 증발하는 수분이 많고, 물이 증발한 후의 기공과 증발에 의해 생기는 틈이 많아지기 때문에 중성화 속도가 빠르게 진행된다.

특히 건조수축과 동결응해에 관해서는 단위수량 뿐 만아니라 골재내부의 흡수량도 영향을 끼치므로 주의를 기울여야한다.

4. 콘크리트중의 물이 많아지는 이유 (물이 과다하게 되는 이유)

물은 콘크리트에 있어서 중요하지만, 한편으로는 과다하면 거대한 악영향을 미친다. 최근 수량 과다로 인해 너무 쉽게 분리되고, 경화 후의 품질 저하가 우려되는 콘크리트가 사용

[표 4] 단위 수량이 증대한 구조체 콘크리트 품질에의 영향

수량 과다	현상 · 영향	발생하는 주요한 장애
굵은 골재 분리	시공성의 저하 품질의 불균일성	타설 결함부 발생
건조 수축 증가	체적 변화의 증대	균열 발생
블리딩 증가 (물의 분리)	철근 · 골재하부 공극 증가, 타설후 침강, 이방성 증가, 물 이동	부착력 저하, 침강 균열의 발생, 구조체 강도의 불균일성, 표면 상태의 악화
시멘트 양의 증가	수화열 증대	열응력에 의한 균열 발생
자유수 절대 용적 증가	염분 · 수분 · 가스의 침투 저항성	내구성 저하

되어 건축물의 상태를 놓고 벌어지는 분쟁이 있다.

일반적으로 콘크리트중의 물이 과다할 경우에 있어서 건축 재료로서의 주요 악영향은 표 4와 같은 것들을 들 수 있고, 경화한 상태에서도 증대한 결함이 될 수 있는 원인이 수량 과다에 있다하는 것을 알 수 있다.

그럼 왜 수량이 과다하게 되는 것일까?

최근, 철근 콘크리트 건축물에 있어서 대규모, 고층화가 진행되어 보다 고강도, 고내구성이 요구됨과 동시에 고시공성을 지니는 콘크리트가 요구되고 있다. 그러나, 한편에서는 양질의 골재가 고갈되어 콘크리트 용적의 70%를 차지하는 골재의 흡수율이 커지고, 밀도가 낮아지고, 부착 분말이 많아지는 등 품질이 저하되고 있다. 이러한 골재의 사용으로 인해 콘

크리트에 대한 일정의 유동성(슬럼프)을 확보하기 위해서는 수량을 증대시키지 않으면 안 되는 상황이 벌어지는 것이 수량이 과다해지는 주요 원인중의 하나이다. 그러나 최근에는 골재의 품질 저하뿐만이 아니고 콘크리트 제조 · 시공 기술자들의 지식부족과 윤리성 결여 등이 원인이 되는 경우도 적지 않다.

수량이 과다해지는 원인으로서는 단순한 계량 착오와 설비 고장 등의 원인은 별개로 하고, [표 5]에 그 주요 원인을 나타내었다.

5. 물을 나쁜 것으로 만드는 주범(수량 과다의 주요 원인)

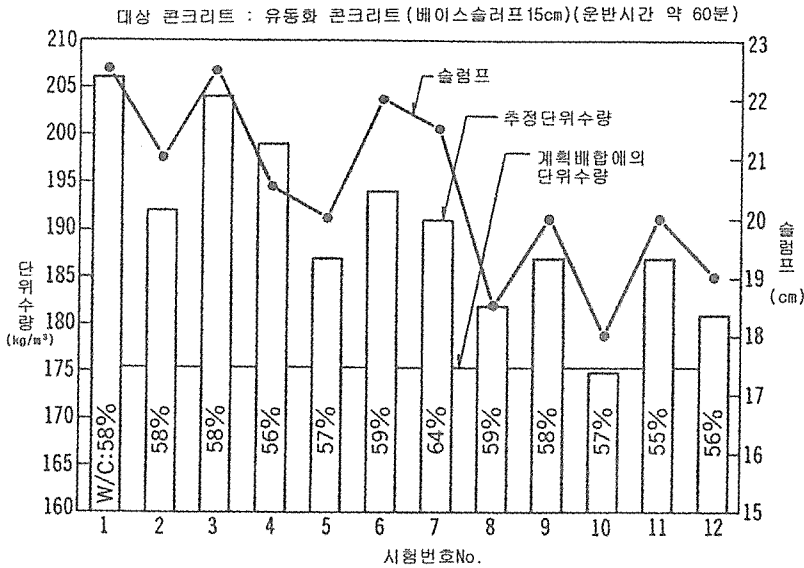
콘크리트 품질의 악화를 조장하는 주원인은 수량 과다에 있다고 서술하였다. 사실 최근 5년 동안에 많은 단위 수량 측정방법이 개발(그림 5, 사진 1)되어 시공자와 콘크리트 제조자가 콘크리트의 품질을 이들 방법으로 검사하고, 후래쉬 콘크리트 중의 단위수량 과다(그림 6)를 조사해서 콘크리트의 품질평가를 하였다.

그러나, 이와 같은 단위수량 규제와 검사만으로 과연 콘크리트의 품질 악화가 억제되고 요구 성능에 만족하는 콘크리트가 부활될 수 있는가.

4장에서 말했듯이 최근 콘크리트용 천연 골

[표 5] 수량 과다가 되는 주요 원인

천연 골재의 채취 제한에 따른 콘크리트용 양질 골재의 부족 저품질 골재를 사용해서 유동성을 확보하려고 증수 콘크리트 제조자와 운반자의 지식 부족과 윤리성 결여 화학 혼화제를 사용하지 않고 유동성을 확보하려고 증수 오퍼레이터의 감각에 의한 유동성 조정으로 증수 운반차의 콘크리트 청소수 등에 의한 증수 시공자와 펌프 기술자의 지식 부족과 윤리성 결여 조기 타설만을 우선으로해서 콘크리트에 발생하는 증수 콘크리트의 압송 시간 단축과 막힘 방지를 위한 증수
--



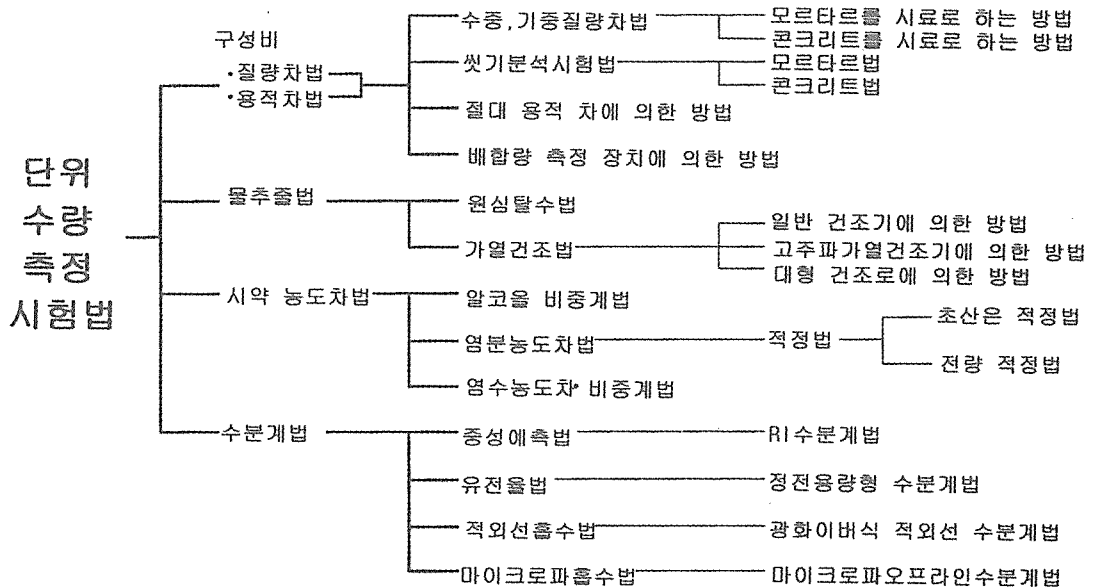
(그림 6) 매스 콘크리트 단위수량 측정 예

기물로부터 생산되는 골재(표6, 그림7, 사진2)가 사용되고 있다. 폐기물을 이용한 골재 중에는 그 품질이 천연 골재에 필적하는 훌륭한 골재(사진 3)도 있지만, 현재로서는 대부분이 품질이 떨어지는 것이고 이와 같은 저품질의 골재는 곧바로 단위수량 증대의 주원인이 된다. 즉, 단위수량이 증대되는 본래의 원인은 골재의 품질에 있고 수

재의 품질은 악화되어가기만하고, 더욱이 환경 대책으로 인한 폐기물 유효이용에 대한 측면에서 재생 골재를 시작으로 여러 종류의 폐

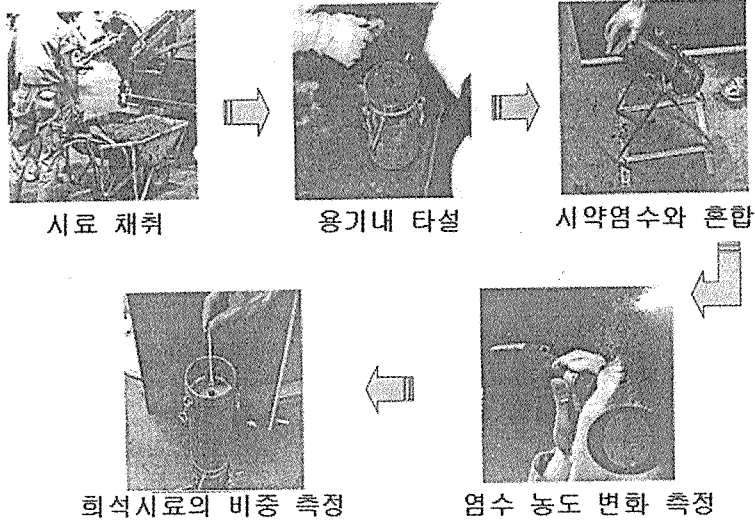
량 과다 문제는 골재 저품질화를 숨기는 것에 지나지 않는다고 해도 과언이 아니다.

수량 과다의 원인이 되는 사항들은 서로 강



(그림 5) 각종 후레쉬 콘크리트의 단위수량 측정 방법

[염수농도차, 비중계법에 의한 단위 수량 검사 상황]



(사진 1) 현장에서 있어서 단위 수량 검사 예

[표 6] 각종 폐기물 자원으로 제조된 골재

골재 중별	골재 원료
모래, 자갈	하천골재, 산골재, 육지 골재, 바다 골재
쇄사, 쇄석	(암종은 주로 사암, 안산암, 석회암)
슬래그 골재	고로 슬래그 골재, 페로니켈 슬래그 세골재, 동 슬래그 세골재(전로 슬래그 골재)
경량 골재	팽창철암계 골재, 퍼라이트원 골재, 천연 경량 골재(화산암), 플라이 에쉬 골재
재생골재	콘크리트에서 재생한 골재
그 외 특수 골재	콘크리트외 기와, 도자기, 타일 등 건설 폐자재 이용 골재, 일반 폐기물 소각회 세골재(용융 고화물(슬래그)재생 이용 세골재, 하수오니 소각회 골재, 유리절원 골재

하게 관계하고 있기 때문에 수량 검사와 규제만으로는 결코 콘크리트의 품질 악화를 제어하기 위한 근본적인 해결 방안이 될 수 없다.

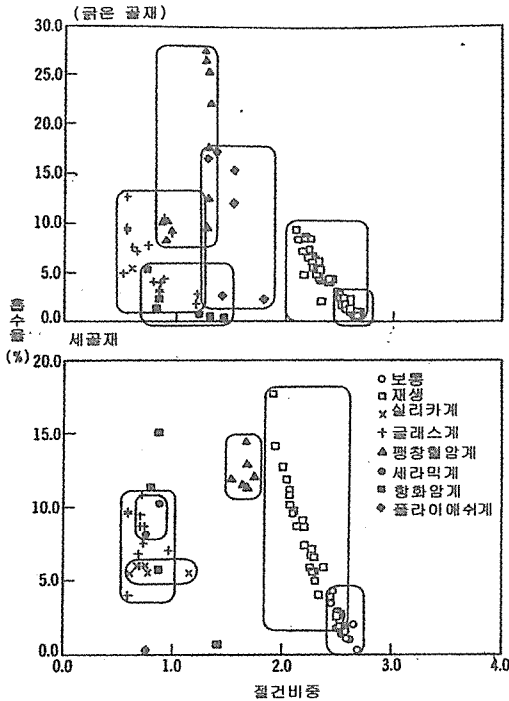
6. 21세기의 콘크리트에 있어서 물의 역할

21세기에 접어들어 여러 분야에 있어서 기술의 진전이 두드러지고 있는 가운데, 콘크리트 분야에서는 단위 수량조차도 제어할 수 없는 상황이라는 것을 관계 기술자는 새롭게 인식할 필요가 있다.

수량 과다의 원인은 여러 가지가 있고 가장 큰 원인의 하나는 골재 품질의 악화에 있다는 것을 이미 말했지만, 간접적인 원인도 있다는 것을 인지하고 있지 않으면 안된다. 그것은 최근 단면이 작고 복잡한 형상으로 많은 양의 철근이 사용된 설계의 건축물이 많아진 것도 하나의 원인이라고 생각되기 때문이다. 구조적으로는 성립되는 것이라도 시공이 아주 곤란한 설계로는 좋은 결과가 얻어지지 않는다는 것은 자명한 일이다.

그리고, 가수의 문제가 현장 타설 콘크리트에 있다면 시공이 어려운 부위·부재는 precast 콘크리트 등 공장 생산 제품으로 대처하는 등, 설계자도 「용이한 시공」에 대한 연구를 할 필요가 있다.

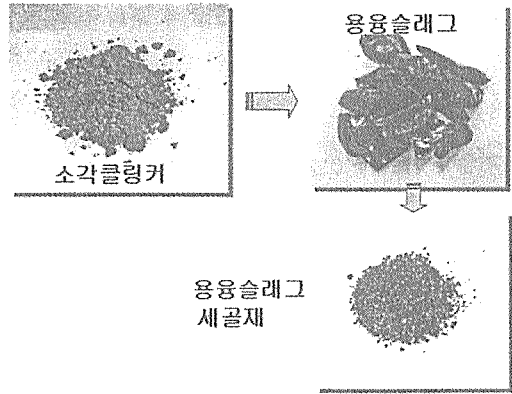
이와 같이 문제의 해결에는 건축물의 설계



(그림 7) 절건 비중 과 흡수율 관계

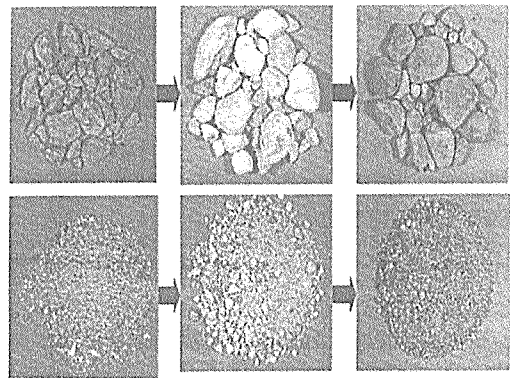
자를 포함해서 콘크리트제조·사용에 관여하는 시스템 전체의 개혁이 필요하다.

어찌되었든, 콘크리트가 포틀랜드 시멘트와 같이 물과 반응해서 경화하는 결합재를 이용하는 한 물은 콘크리트에 있어서 지극히 귀중한 「생명수」이다. 그러나, 이 물이 과다하면 콘크리트에 있어서 아주 치명적이다. 「과한 것은 적은 것만 못하다」라는 것을 충분히 인식하고



(사진 2) 생활 폐기물 소각회의 용융슬래그 골재

[골재 원석] [통상 제조된 재생 골재] 고품질 재생골재



(사진 3) 가열 방식에 의한 고품질 재생골재 상태

콘크리트를 제조하는 기술자도 시공자도 그리고 설계자도 적절한 양의 물을 사용해서 콘크리트가 제조될 수 있도록 관련사항에 세심한 주의를 기울일 필요가 있다.

(표 7) 가열방식에 의한 고품질 재생골재 품질에

항목	절건밀도 (g/cm ³)	흡수율(%)	입형 판정 실적율 (%)	미립분량(%)	알칼리 골재반응	1.95부유불순물량(%)
굵은 골재 인정 기준	2.5이상	3.0이하	55이상	1.0이하	무해	1.0이하
D재생 굵은 골재	2.52~2.63	1.20~2.93	60.8~64.7	0.00~0.16	무해	0.00~0.45
세골재 인정 기준	2.5이하	3.5이하	53이상	7.0이하	무해	1.0이하
D재생 세 골재	2.51~2.54	2.31~2.81	60.7~62.3	0.40~1.10	무해	0.05~0.33