



고성능 콘크리트의 설계와 시공

한냉지에 있어서의 고유동콘크리트 High Flow Concrete in Cold Region

鎌田英治*

1. 서 론

고유동콘크리트는 높은 유동성과 함께 재료분리에 대한 저항성이 필요하다. 콘크리트의 유동성을 얻기 위해서는 고성능AE감수제의 사용이 필수적이며, 한편으로는 분리저항성을 얻기 위해서는 많은 양의 미세분말 또는 증점제(분리저감제)의 사용이 필요하다. 이와 같이 고유동콘크리트는 보통콘크리트와 비교하여 다양한 재료를 사용하게 되는데, 이 재료의 구성성분도 매우 다양하다. 또한 최근에는 특수한 시멘트가 개발되게 되어, 이에 대한 대응방법이 고려되는 등, 고유동콘크리트의 종류와 그 성능 및 품질의 범위는 매우 다양하므로 고유동콘크리트의 성능은 보통콘크리트와는 달리 많은 요인의 영향을 받는다. 이때문에 일본 건축학회 재료시공위원회에서는 동경대학 友澤史紀 교수를 위원장으로 하는「고유동콘크리트 연구소위원회」를 설치하고, 다각적인 그 성능평가를 통하여 실용화를 향한 검토를 향해왔다. 필자는 이 위원회에서 한중시공, 동해 등 고유동콘크리트의 한냉지에서의 성능평가와 실용화의 검토를 담당하고 있으며, 여기에서는 이 위원회 활동의 과정에서 얻어진 실용적 연구의 성과를 중심으로 한

냉지에서의 고유동콘크리트의 과제에 대하여 논의하고자 한다.

2. 한냉지의 기상조건과 콘크리트의 성질

일본의 국토는 북위 24도부터 45도까지 남북으로 긴 지형을 이루고 있다. 이 때문에 가장 따뜻한 지역의 한 겨울 기온이 가장 추운 지역의 한여름과 비슷할 정도로 기상조건에 지역차가 심한데, 이로 인해 건설공사를 행하는데 있어서의 조건도 현저한 차이를 보이고 있다. 그림 1은 겨울철 기상조건이 비교적 혹독한 일본의 4개 도시의 겨울 기온(고지기온, 최저기온, 평균기온)과 항설량을 표시한 것으로 기온에 따라 차이를 보이고 있다. 이 4개 도시중에서 가장 북쪽에 위치한 札幌은 기온이 낮고 降雪량이 많다. 이에 비해 태평양측에 근접한 宇都宮은 降雪량이 작으며, 한편 동해(東海)측에 면한 金澤은 위도가 낮지만 겨울철에 주로 降雪에 대한 것이 문제시 되고 있다.

건설공사에 영향을 주는 한냉지의 기상조건에는 기온, 동결, 降雪 및 일조시간이 있다. 降雪은 건설공사의 작업진행을 방해하며, 除雪은 동기공사의 비용을 증가시키는 요인이 되고 있다. 또한 겨울동안은 일출부터 일몰까지의 시간이 짧아서 작업시간이 제한된다. 이러한 조건들이 동절기의

*북해도 대학 건축공학과 교수

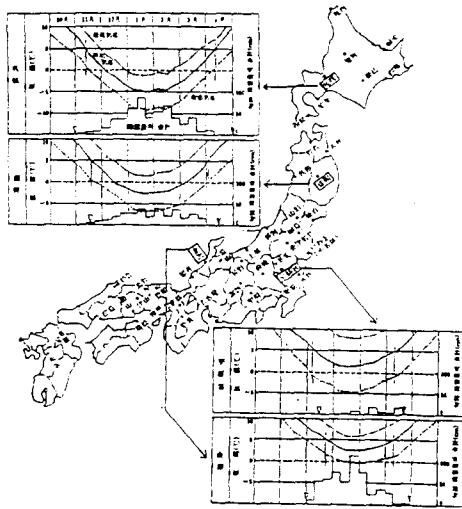


그림 1 札幌, 盛岡, 宇都宮, 金澤의 동절기의 氣溫과 降雪 狀況

건설공사시 고려하여야 할 요인이지만, 콘크리트에 직접적으로 영향을 미치는 것은 온도, 동결과 같은 低溫의 작용이다.

콘크리트는 물과 시멘트의 화학반응(수화반응)에 의해서 경화한다. 따뜻한 지역에서는 이 화학반응이 과도하게 촉진되거나, 또는 수분증발등의 물리작용이 촉진됨으로써 콘크리트의 물성 또는 공사에 영향을 미치지만, 한냉지에서는 이들 작용의 지연이 문제시 되며 특히 수분의 동결은 콘크리트에 방해를 초래하게 된다.

보통콘크리트에서는 이에 대한 대응책이 어느 정도 확립되어 있다. 그림 2는 저온에 의해 콘크리트에 발생하는 문제를 그 대응책과 함께 나타낸 것이다. 그림중에서 점선내는 혹한기의 콘크리트 공사(한중콘크리트)에 관한 것이고 실선내는 동해로서 알려진 재료의 早期劣化(내구성)에 관한 것이다.

초기재령에서 콘크리트가 동결하면 경화후에 소정의 성능을 발휘하지 못할 뿐만 아니라 극심한 열화를 받게된다. 이것이 초기동해인데 한중콘크리트 공사에 있어서 초기동해의 방지는 매우 중요하다. 방동제등을 사용한 특수한 콘크리트를 제외

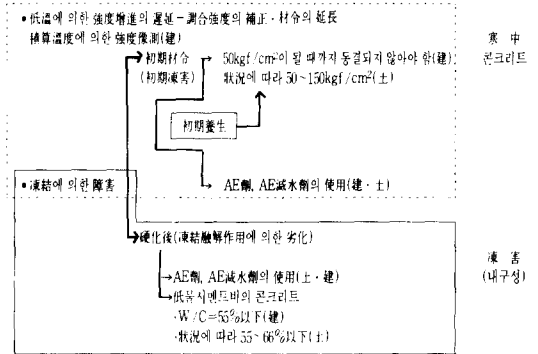


그림 2 低溫에 의한 콘크리트의 問題와 그 對應

하고 보통콘크리트 0℃를 조금 밑도는 -1℃~2℃의 온도에서 동결한다. 이제까지의 연구에서 AE 콘크리트는 압축강도가 50kgf/cm²에 달하게 되면, 공사기간내에 발생하는 수회의 동결융해작용에 대하여 충분히 견디는 것으로 밝혀졌다. 이때문에 한냉시기의 공사에서는 이 강도에 도달할 때까지 콘크리트가 동결하지 않도록 양생을 하여야 한다.

저온은 수화반응의 지연을 가져오고, 응결 경화 지연의 원인이 된다. 보통콘크리트에서는 응결의 지연은 약간의 초기공정의 지연을 초래하는 정도이고 큰 문제가 되는 일은 없으나 저온에 의해 초래되는 강도증진의 지연은 후속 공정에 영향을 주기 때문에 공사를 예정대로 진행하기 위해서는 매우 중요하므로, 한냉기의 공사에서는 저온에 따른 강도증진의 지연을 먼저 예측해 둘 필요가 있다. 콘크리트 강도의 온도의존성을 기술한 적산온도식은 이 목적으로 사용되고 있다. 실제의 공사에서는 시공설계의 단계에서 타설 후에 얻어지는 적산온도를 기존의 기상데이터를 기준으로 구해서, 그 결과를 근거로 콘크리트의 강도를 예측하고, 필요에 맞도록 강도의 활증이나 관리재령의 연장등을 행하고 있다. 또한 이 수법은 실제의 공사 단계에서 공정관리를 목적으로 한 구체콘크리트의 강도예측에도 사용되고 있다. 결국 한냉시기의 공사에서는 시공관리의 시점으로부터, 저온에 의한 강도의 지연을 파악하는 일이 필요하고, 이를 위

해서는 콘크리트의 강도증진을 온도에 관한 수식으로 기술하는 일이 요구된다.

한냉지의 외부구조물은 동기의 기상작용에 따라 동결융해의 반복작용을 받는다. 이 때문에 한냉시기의 시공단계에서 문제가 생기지 않는 것도 있으며 어떤 경우에는 온난한 시기에 콘크리트가 타설되어도 이러한 장해를 받을 가능성이 있다. 일례로서 전술한 札幌에서는 기상데이터에 의하면 1년간에 70회정도의 동결융해가 반복된다고 보고되고 있다. 동결융해 작용에 의한 콘크리트의 변화가 동해이다. 동해의 대책은 콘크리트의 물시멘트비를 어느 정도 낮게함과 동시에 AE제, AE감수제를 사용하여 적정량의 공기를 도입하는 것이다. 그러나 동해에 의한 열화에는 건조의 영향 등이 있고, 또한 골재의 품질도 큰 영향을 준다. 더욱이 콘크리트에 도입된 공기의 질(크기와 기포간격)도 고려하지 않으면 안된다.

3. 고유동 콘크리트의 한냉지에 있어서의 과제

3.1 고유동콘크리트의 성질과 검사해야 할 내용

고유동 콘크리트의 종류는 고로슬래그미분말등을 다량으로 첨가한 물결합재비 30% 전후의 것으로부터 셀룰로오스계와 아크릴계의 증점제(분리저감제)를 이용한 보통콘크리트와 큰 차이가 없는 물시멘트비를 가진 것까지 여러가지가 있다. 이 때문에 고유동 콘크리트의 한냉지에서의 실용화를 도모하기 위해서는 이제까지 보통콘크리트에서 검토된 많은 사항을 검토하여야 한다.

고유동 콘크리트에서는 고성능AE감수제의 사용량이 비교적 많다. 이 때문에 응결시간이 지연되는 경우가 많고, 더욱이 이러한 혼화제를 사용한 콘크리트에서는 저온에 의한 유동성의 저하가 발생한다. 이를 개선하기 위하여 고성능AE감수제를 더욱 증량하게 되면 실용적으로 문제가 될 정도의 응결지연을 초래할 가능성이 있다.

고유동 콘크리트의 내동해성의 검토도 중요하다. 콘크리트의 동해 방지에는 콘크리트에 도입된 공기포가 중요한 역할을 한다. 이 때문에 고유동 콘크리트가 가진 높은 유동성과 점성에 의한 기포

의 성질이 문제가 되므로 경화콘크리트의 기포조직의 검토도 행하여야 한다. 더욱이 실용적으로는 이와 같은 조건하에서 기포가 안정적으로 존재하는지가 중요한 검토사항이 된다.

저온에 의한 강도증진의 지연에 대한 적절한 성과는 분체계의 고유동 콘크리트의 강도증진과정을 적산온도식으로 한 단계이다. 급후는 그 적용범위를 확대해 더욱 실용성이 있도록 할 필요가 있다.

초기동해에서는 고유동 콘크리트에 있어서도 보통콘크리트와 같은 조건에서 초기동해에 대한 내성이 얻어지는지가 검토의 대상이다. 이를 위해 지금부터 초기의 단계로부터 어느정도 경화가 얻어진 단계까지의 콘크리트를 동결시켜 그후의 물성의 변화를 파악할 필요가 생긴다. 우리들은 이 문제에 대하여 실험을 개시한 단계이며, 현단계에서는 충분한 지식을 얻지 못하고 있다.

3.2 실험에 사용된 고유동콘크리트의 종류

고유동콘크리트에는 전술한 바와 같이 미분말성분을 비교적 다량으로 사용한 것, 증점제(분리저감제)의 사용에 의해 점성을 높인 것, 또는 이 두가지를 함께 이용한 것이 있다. 우리들은 이제까지 분체계 고유동콘크리트의 성능평가에 몰두하고 있으며, 증점제계의 고유동콘크리트에 대해서는 실험을 개시한 단계이다. 이 때문에 후자에 대하여는 그 성과를 정리하는 단계에는 도달하지 못하였으므로 여기에서는 주로 전자의 고유동콘크리트에 대한 결과를 소개하고자 한다.

표 1은 이 실험에 사용된 고유동콘크리트의 종류이다. 내동해성을 검토한 시리즈에서는 비교를 위해 물시멘트비 55%의 보통콘크리트의 실험도 행하였다. 표중의 고유동콘크리트는 물과 결합재(시멘트와 고로슬래그 미분말등의 혼화제를 첨가한 것)량의 비가 32%~36%의 범위, 단위결합재량은 460~500kg/m³의 범위에 있다. 여기에서는 보통포틀랜드시멘트와 분말도 6,000cm²/g의 고로슬래그 미분말의 조합에 폴리카르본산계, 아미노술폰산계, 나프탈렌계의 3종류의 고성능AE감수제를 사용한 고유동콘크리트, 고로시멘트B종을

표 1 실험에 사용한 분체계 고유동콘크리트의 종류

시리즈	콘크리트의 종류	기호	결합재	고성능 AE감수제	공기량 (%)	AE조제	양생조건
I	고유동콘크리트	6P	OPC+6000급 고로슬래그미분말	폴리카르보산	2.0	*A1	2주수중 4주수중 4주기건 2주수중+乾濕
		6A		아미노술폰산		4.5	
		6N		나프탈렌	A1		
		LB	고로B종+석회석분말	폴리카르보산	2.0	-	
		SC	고로B종				
	보통콘크리트	55	OPC	-	2.0	D1	
					3.0		
					4.0		
					5.0		
					6.0		
II	고유동콘크리트	2C	고로B종	폴리카르보산	2.0	-	
		7S			4.5	A2	
		VE				D2	
		SF			아미노술폰산	B2	

*A1 : 전용소포제 B2 : 특이비온계면활성제
 A2 : 전용AE제 C1 : 수지산계AE제
 B1 : 로진계 계면활성제 D1, D2 : 아나온계 계면활성제

표 2 사용재료

	종 류	사 양
시멘트	보통포틀랜드시멘트	비중 : 3.16 비표면적 : 3320cm ² /g
	고로시멘트B종	비중 : 3.05 비표면적 : 3760cm ² /g
산골재	陸砂	비중 : 2.68 FM : 2.43 흡수율 : 1.17%
굵은골재	잡석	비중 : 2.64 FM : 6.69 흡수율 : 2.82%
혼화제	고로슬래그미분말	비중 : 2.90 비표면적 : 6080cm ² /g
	석회석분	비중 : 2.73 비표면적 : 5460cm ² /g
혼화제	고성능(AE)감수제	· 폴리카르보산계 · 아미노술폰산계 · 나프탈렌계 · 폴리카르보산계

결합재로 한 경우와 이것에 석회석분말을 첨가한 고유동콘크리트 또한 공기량의 안정성을 고려하여 고로시멘트B종과의 조합에 여러가지 혼화제를 사용한 조합에 관한 실험을 행했다. 이 콘크리트에 사용한 재료의 성질을 표2에 나타낸다.

고유동콘크리트의 콘크리트로서의 조합으로부터 굵은골재를 제외한 성분으로 모르터를 제작하여 20℃의 조건에서 프록터 시험을 향한 결과를 그림 3(왼쪽)에 표시한다. 그림에서는 보통모르터와 비교하여 고유동모르터에서 명료하게 응결시간이

3.3 고유동콘크리트의 凝結性能과 그 低温특성

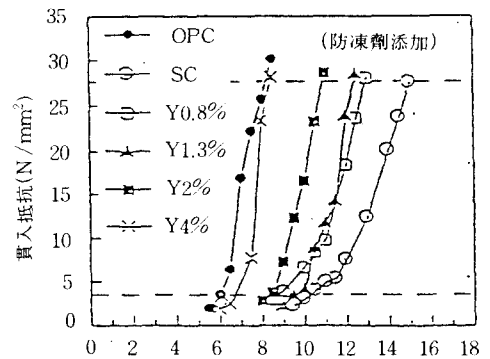
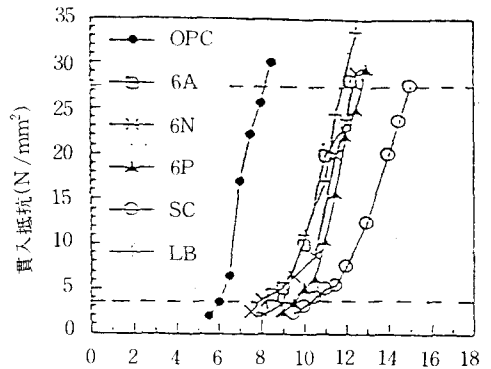


그림 3 보통모르터와 고유동콘크리트의 프록터 시험결과 (고유동콘크리트로부터 굵은골재를 제거한 조합에 의한 시험)

지연하는 경향을 보이고 있다. 여기에서 고유동모르터의 응결축진을 목적으로 하여 시판되는 방동제(Y)를 첨가한 결과가 그림 3(오른쪽)이다. 방동제의 첨가에 의해 그 첨가량이 증가함에 따라 응결시간이 단축되고, 첨가량 4%의 경우에는 보통모르터와 동등한 응결성능을 보이고 있다. 그러나 방동제를 첨가한 경우 고유동모르터의 유동성은 첨가량의 증가에 비례하여 저하하여 본래의 목적인 고유동성을 잃는 경우도 발생하였다. 이와 같은 방법에 의하여 응결을 촉진시키기 위해서는 단위수량을 증가시키는 등의 고안이 필요하다.

그림 4는 굵은골재를 포함하여 콘크리트를 비빔 후 웨트스크리닝(wet screening)으로 굵은골재를 제거한 모르터에 대한 실험결과이다. 당초 모르터로서 비빔한 경우(그림 3)와 비교하여 보통콘크리트에서는 응결시간이 약간 지연되는 경향이 있으며, 한편 고유동콘크리트의 결과에서는 응결시간이 빨라지는 경향이 있다. 이 때문에 모르터 성분만으로 비빔한 경우에 보여지는 큰폭의 응결 지연은 콘크리트로 한 경우에는 보이지 않고, 보통콘크리트와 고유동콘크리트의 응결시간의 차이는 줄어드는 경향이 있다. 이 결과로부터 고유동 콘크리트의 응결의 지연은 실용적으로는 문제가 되지 않는다고 판단된다. 한편 10℃에서 비빔한 경우에 있어서도 보통콘크리트와 고유동콘크리트의 차이는 없었다.

이 때문에 고유동콘크리트에 있어서도 응결시간의 온도 의존성은 실용적으로 장애가 되는 정도는 아니라고 판단되지만, 한편으로는 10℃로 되면 고유동콘크리트와 슬럼프 플로우값은 초기값의 90%부터 60%정도로 저하하는 결과를 보였다. 또한 방동제를 첨가한 결과에서는 무첨가의 고유동콘크리트의 경우와 같은 양상으로 저온에 의한 슬럼프플로우값의 저하는 보였지만 첨가량의 증가에 따른 슬럼프플로우값의 저하는 보이지 않는다.

기존의 연구에서는 콘크리트 온도가 저하함과 동시에 고유동콘크리트의 유동성이 저하하는 것으로 알려져 있지만 그 정도는 이번엔 얻어진 결과만큼 크지 않았다. 또한 모르터의 실험결과와 콘크리트에서 채취한 모르터의 결과에서는 큰 차

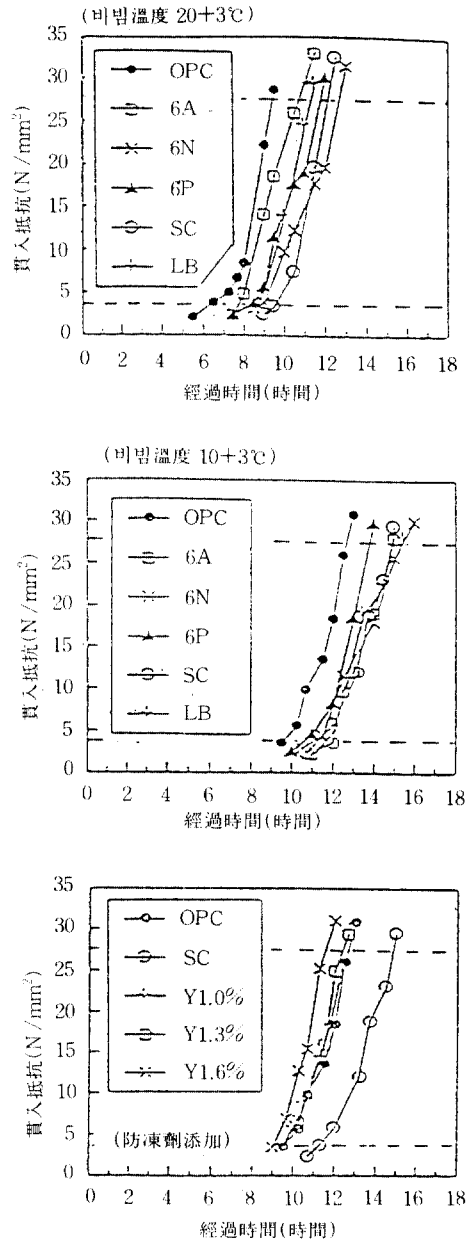


그림 4 보통콘크리트와 고유동콘크리트의 프록터 시험결과 (웨트스크리닝을 한 모르터에 의한 시험)

이점이 발견되지 않았다. 고유동콘크리트의 응결성상, 특히 온도의존성에 대하여는 보다 연구를 행할 필요가 있다.

3.4 고유동 콘크리트의 내동해성과 기포 특성

고유동 콘크리트의 동결융해시험은 ASTM C666 수중동결융해법으로 행했다. 보통의 콘크리트와 비교하여 분체계의 고유동콘크리트에서는 단위분체량이 많고, 건조에 따라 생기는 극히 미세한 균열이 내동해성에 악영향을 미칠 가능성이 있다. 이 때문에 시험에서는 시험시의 보통 양생 조건인 2주 수중에 4주 수중, 4주 기건, 2주 수중 후 2주간의 건조습윤의 반복의 3가지 양생조건을 더하여 실험을 행하였다.

공기량 2%를 목표로 한 non AE콘크리트의 실험결과를 그림 5에 나타내었다. 같은 재료를 사용한 물시멘트비 55%의 보통콘크리트에서는 어느 양생조건에서도 급격한 열화가 보여지는데 반하여, 2주, 4주의 수중양생을 행한 고유동콘크리트의 내동해성은 non AE의 조건임에도 불구하고 꽤 우수한 결과를 보이고 있다. 이와같은 결과는 고강도콘크리트에서도 종종 보여지는데, 저 물시멘트비의 콘크리트가 충분히 양생되므로 동결가능한 수량이 감소하고 그 결과로 내동해성이 향상된 것으로 생각할 수 있다. 이 때문에 기건 양생을 함으로써 수화의 진행이 불충분한 콘크리트, 건조 습윤의 작용을 받은 콘크리트는 다른 조건의 콘크리트보다 조기에 변화하는 경향이 있다. 한편 보통콘크리트에서는 기건 양생의 경우가 표준조건(2주 수중)의 경우보다도 내동해성이 우수한 것이 많은데 이와 같은 경향은 물결합재비가 낮은 고유동콘크리트의 특징으로도 생각할 수 있다. 그러므로 2주 수중의 표준시험의 조건에서 행한 동결융해시험에 있어서, non AE의 고유동콘크리트에서 우수한 결과가 얻어졌다고 하여도 이 콘크리트에 공기의 도입이 불필요하다고 생각할 수는 없다.

이 실험에서는 동일 공기량의 보통콘크리트와 비교하여 고유동콘크리트의 내동해성이 우수한 결과를 보이고 있다. 이것을 공기량과의 관계로 나타낸 것이 그림 6이다. 그림중에서 점선으로 가려진 부분의 경계는 표준양생조건(2주 수중)의 보통콘크리트에서 얻어진 내동해성과 공기량의 관계를 나타낸 것으로서 고유동콘크리트의 실험 결과가 이 경계보다도 아래측에 오면, 같은 공기

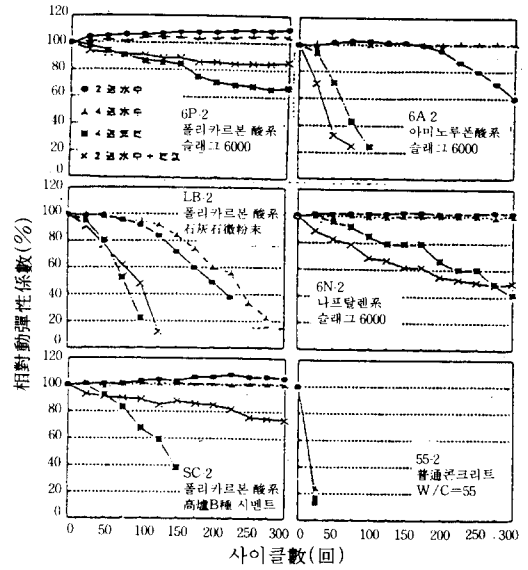


그림 5 동결융해 시험결과 (상대동탄성계수)

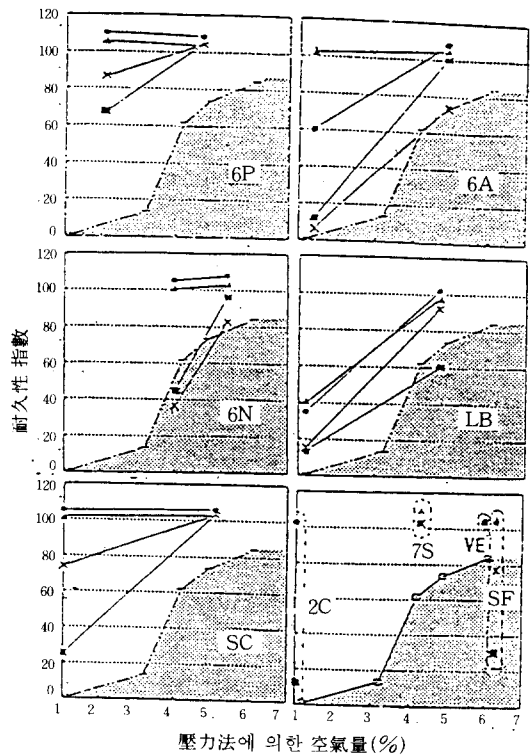


그림 6 고유동콘크리트와 보통콘크리트의 내동해성 비교

량을 가진 보통콘크리트보다도 내동해성이 열악한 것을 의미한다. 그림에서는 많은 데이터가 이 경계의 상부에 있어, 본 실험의 범위에서는 고유동콘크리트가 같은 재료를 사용한 보통콘크리트보다도 내동해성이 우수하다고 판단할 수 있다.

콘크리트의 내동해성에서는 그 콘크리트의 기포조직이 중요하다. 이 실험에서 사용된 고유동콘크리트의 기포크기는 보통콘크리트와 비교하여 작은 것이 많이 분포하고 있다. 이것은 동일 공기량의 경우에 기포간극계수가 작은 것을 의미하고, 그 질이 우수하다고 말할 수 있다. 그러나 고유동콘크리트중에 존재하는 공기포의 양 및 그 성질은 비빔, 타설의 조건, 재료의 성능 및 비빔후의 시간 등에 의하여 매우 민감한 영향을 받는다. 본 실험에서는 비빔시간을 6분간으로 하였으므로 그 영향이 발생하였을 것으로 생각된다.

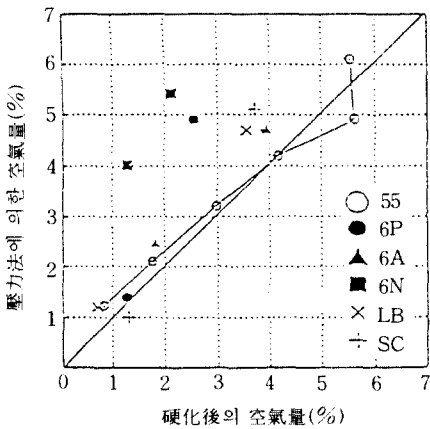


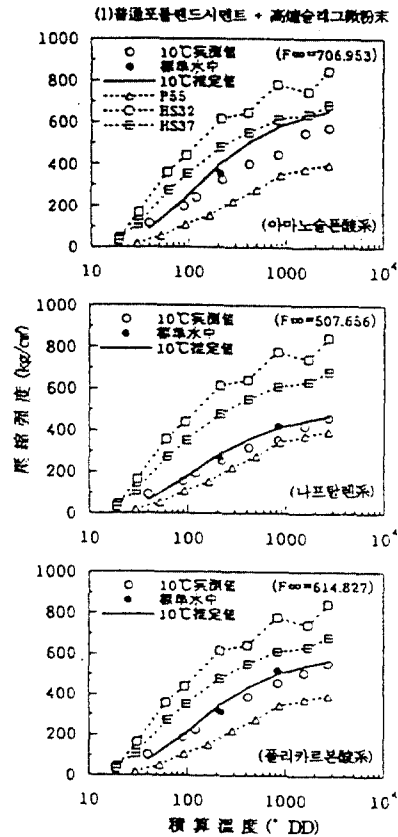
그림 7 경화후의 공기량과 굳지않은 상태의 공기량 (압력법)의 관계

콘크리트의 내동해성에는 공기량의 존재가 중요하기 때문에 공기포의 안전성 또한 중요하다. 그림 7은 굳지않은 콘크리트에서 얻어진 공기량을 거꾸집에 타설하여 경화한 후의 콘크리트 공기량과 비교한 결과이다. 보통콘크리트에서는 양자에 차이가 없는데 반하여 고유동콘크리트에서는 실제로 타설한 콘크리트의 공기량이 적은 경향이 있

다. 고유동콘크리트의 내동해성을 확보한 다음에 콘크리트중에 공기량이 안정적으로 존재하는 것은 극히 중요하므로 기포의 안정성에 관한 연구를 보다 진행시켜야 한다.

3.5 고유동콘크리트의 低温強度 増進性狀

고유동 콘크리트의 강도증진 특성을 적산온도 ($M = \Sigma(\theta + 10)\Delta t$)의 식으로서 표시한 결과를 그림 8에 나타내었다. 실험에서는 양생온도를 10℃와 20℃로 하고 있지만 비빔시의 콘크리트 온도는 모두 20℃이고, 3.3에서 기술한 유동특성에 미치는 저온의 영향과 이에 따른 조합보정은 고려하지 않았다. 그림에는 별도의 실험에서 얻어진 물시멘트비 32%와 37%의 고강도콘크리트, 물시멘트비 55%의 보통콘크리트에 관한 결과를 함께 기록하였다.



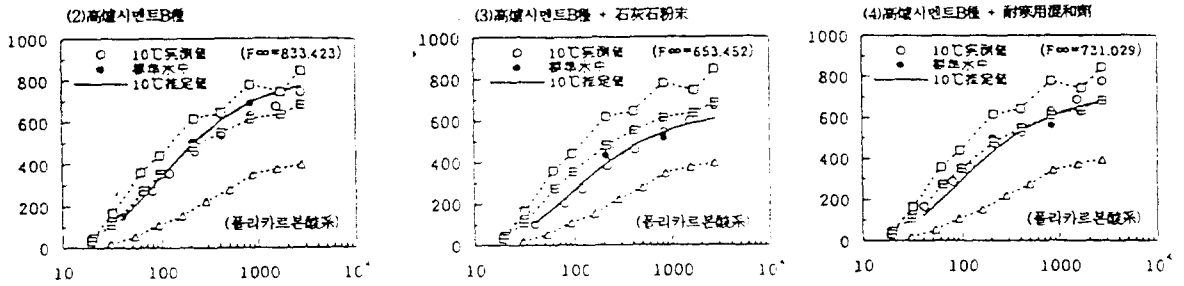


그림 8 고유동콘크리트의 강도증진 특성

이들의 비교에서, 장기적으로 대략 같은 강도인 고유동 콘크리트에서 조기재령의 강도는 사용하는 혼화제 또는 고로슬래그의 분말도 등에 따라 다르지만 대체로 고강도콘크리트보다 낮은 경향이 있다. 또한 고유동 콘크리트의 강도증진특성은 보통콘크리트의 경우와 같은 적산온도식(로지스틱 곡선, 본베르추곡선)에 근사하는 것이 가능했다. 급후에는 이 데이터를 해석하여 한냉기후에 맞는 콘크리트의 강도 보정값의 산출과 검토를 진행할 것이다.

4. 결 론

현단계에서 우리들은 증점제(분리저감제)를 사용한 고유동 콘크리트의 데이터를 정리하지는 못하였으며, 여기에서는 분체로서 고로슬래그를 사용한 분체계 고유동 콘크리트에 대한 결과를 소개했다. 앞서 기술한 바와 같이 검토는 아직 충분하지 않으므로 급후에 연구가 필요한 부분이 많다. □