

고강도인공경량골재의 기초성상에 관한 연구

정 상 진

(단국대학교 건축학과 교수)

김 우 재

(인천전문대학 건축공학과 겸임교수)

1. 서론

석탄회를 효율적으로 이용하려는 움직임은 콘크리트 분야에 있어서도 면밀히 검토되어, 최근 플라이애시뿐만 아니라 석탄회를 다량 사용한 콘크리트에 관한 연구 성과가 보고되어 새로운 석탄회의 활용방안으로 기대되고 있지만 콘크리트용 골재의 원재료로의 이용도 가능할 것으로 판단된다.

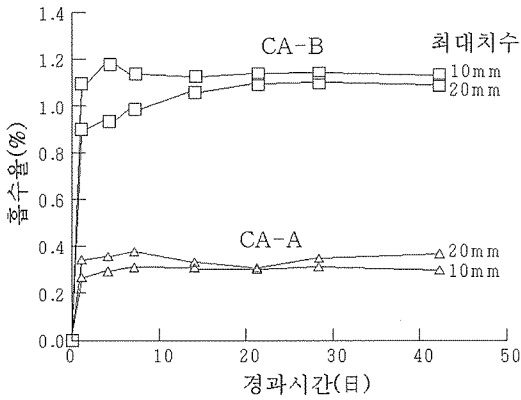
과거, 석탄회를 원료로 하여 제작된 골재에는 발포형 인공경량골재가 일부, 실용화된 것도 있다. 본 골재는 발포형 골재와 원료배합, 제품소성 등의 제조조건을 다르게 하여 골재의 조직을 치밀화하여 콘크리트의 고강도화·경량화가 가능한 석탄회를 주원료가 되는 인공굵은골재를 새롭게 개발하였다.

여기에서는 고강도인공골재의 제조방법,

골재 및 콘크리트의 기초성상, 골재의 적용분야 등에 대해서 서술하였다.

2. 골재의 제조와 성질

현재 연구되어진 석탄회를 원료로 하는 골재는 경량화를 주목적으로 하기 때문에 발포에 의해 조직을 다공화 시킨 인공경량골재이지만 석탄회 원료의 굵은골재(이하 CA골재)는 원료배합, 소성온도이력을 적절하게 제어한 소정의 원재료에서 골재 조직을 치밀화, 즉 비중을 최대가 되게 조정하여 골재의 고강도 및 저흡수성이 가능하였다. [그림1]에 나타낸 것과 같이 CA골재는 주원료인 석탄회 분말, 보조원료인 벤토나이트, 석탄회미분말을 소정의 비율로 배합하여, 1300℃에서 소성·제조한다. 제조되어진 CA골재에는 아노사이트



(그림 1) 경과시간과 흡수율과의 관계



[사진 1] 석탄회를 원료로한 고강도인공골재

(anorthite), 무라이트(mullite) 등의 화학적으로 안정된 광물을 많이 함유한다. 일본에서 생산되는 석탄회의 대부분은 보조원료, 소성조건의 조정에 의해 소요품질을 갖는 CA골재의 원재료로서 이용가능한 것이 알려졌으나 국내에서 생산되는 석탄회에 대한 품질연구가 필요한 실정이다.

CA골재 및 비교용 쇄석(기호 CS)의 제물성을 [표1]에 나타냈다. 표에서 CA-A, CA-B는 보조원료 비율의 조정에 의해 비중을 다르게 한 골재이다. CA골재는 석탄회를 주원료로 하기 때문에 치밀하게 소성하여 보조원료를 혼합하여 골재 비중은 2.0정도이고, 쇄석보다도 0.7정도 작다. 또한, CA-B의 흡수율은 쇄석과 같은 정도이고, CA-A는 거의 절반으로 조사되었다. [그림1]에 나타난 것과 같이 CA골재는 흡수율이 경과시간이 24시간 정도에서 포수상태에 도달하는 것이 특징이다. 이것은, CA골재에는 표층부분에 존재하는 개방기포가 작고, 서로 독립하여 내부까지 이어지는 연속기포 또한 작아 통상의 인공경량골재와는 기포조직이 다르기 때문으로 판단된다. CA골재의 실적율은 63~65%정도이며 쇄석보다도 3.4% 크다. 이것은 [사진1]에 나타난 것과 같이 골재 입형이 구형으로 우수하기 때문이다. 따라서 CA골재의 안정성이 쇄석보다도 우수하다는 것에서 짐작이 가능하다. 또 본 골재와 동일 소성조건으로 제작된 원형공시체의 압축강도는 200~250N/mm² 정도이고, 골재 자체의 압축강도는 200N/mm²이상 발현되었다.

3. CA골재를 이용한 콘크리트의 성질

3.1 보통콘크리트

시험에 이용한 콘크리트는 슬럼프 12cm, 공기량 5%의 보통 콘크리트로서 단위시멘트량

[표 1] 골재의 물리적 성질

골재의 종류		최대치수 (mm)	건조비중	흡수율 (%)	단위용적중량 (kg/m ³)	실적율 (%)	안정성 (%)	강열감량 (%)
CA골재	CA-A	20	2.03	0.35	1,320	65.0	0.4	22.0
	CA-B	20	1.86	0.72	1,180	63.4	0.4	21.3
쇄석	CS	20	2.64	0.76	1,610	61.0	6.1	11.6

(표 2) 콘크리트 배합 및 굳지않은 콘크리트의 제성질

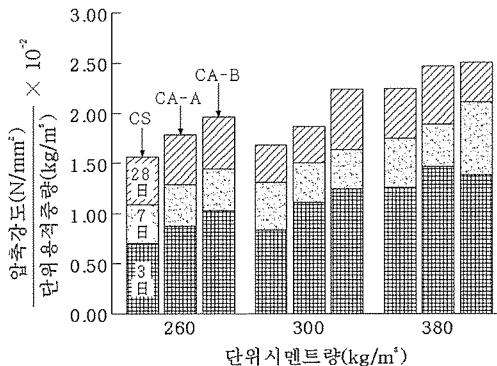
골재의 종류	물시멘트비 (%)	잔골재율 (%)	단위량(kg/m ³)				온도 (°C)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	단위용적중량 (kg/m ³)	블리딩률 (%)
			물	시멘트	잔골재	굵은골재					
CA-A	58.1	44.5	151	260	832	817	20.7	13.0	5.2	2,110	6.1
	50.7	43.5	152	300	798	816	20.6	13.5	5.0	2,110	4.9
	40.3	41.0	153	380	724	821	20.5	12.0	4.6	2,140	3.1
CA-B	56.5	44.5	147	260	836	753	19.8	12.5	5.5	2,050	3.6
	49.3	43.5	148	300	802	752	20.0	12.5	4.9	2,040	3.6
	40.5	41.0	154	380	723	751	19.8	12.5	4.6	2,050	4.0
CS	61.2	44.5	159	260	823	1,046	20.3	11.5	4.5	2,320	6.0
	54.7	43.5	164	300	784	1,038	20.8	13.0	5.1	2,310	5.5
	42.9	41.0	164	380	713	1,046	20.7	11.5	5.0	2,330	4.3

을 260~340kg/m³의 범위로 하여 실험을 실시했다. 쇄석은 [표1]과 같은 재료를 사용하고, 잔골재는(비중:2.59, 흡수율:1.48%, 조립율:2.75)를 사용했다.

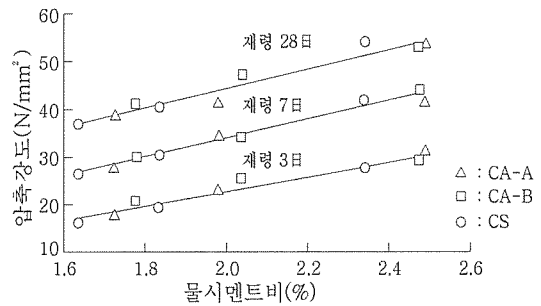
[표2]에 콘크리트배합 및 굳지않은 콘크리트의 성질을 나타냈다. 콘크리트 소요 슬럼프를 얻기 위하여 단위수량은 CA골재를 이용한 경우에는 쇄석보다 8~16kg/m³가 적게 들어가고, 결과적으로 물시멘트비를 2.4~5.4%를 저감했다. 이것은 CA골재의 우수한 실적률 및 입자형상 때문에 쇄석을 이용한 경우보다 콘크리트의 워커빌리티가 증가된다. CA골재 콘크리트의 블리딩율은 쇄석의 경우보다도 감소하는 경향이 있지만, 단위수량의 저감효과

의 한계는 명확하지 않다. 이것은 콘크리트 중에 내재하는 수량이 CA골재 콘크리트는 작고, 굵은골재 밀면 부분에 축적된 블리딩수가 쇄석의 경우보다도 작은 것으로 사료된다.

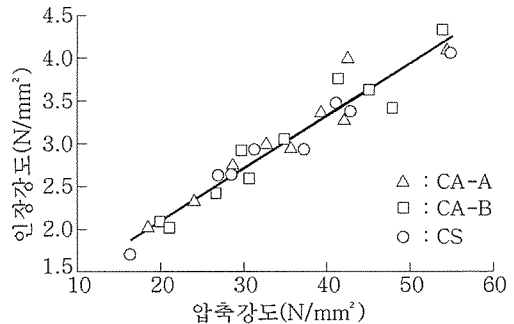
[그림2]에 경화콘크리트의 단위용적중량과



(그림 2) 단위용적중량과 압축강도



(그림 3) 시멘트물비와 압축강도와의 관계



(그림 4) 압축강도와 인장강도와의 관계

압축강도를 나타냈다. CA골재 콘크리트는 쇠석과 비교해 경량의 고강도가 되고 이러한 경향은 비중이 작은 CA-B의 경우에 한층 현저한 것으로 판명된다. [그림3]에 시멘트물비와 압축강도와의 관계를 나타냈다. 이것에 따르면 사용한 골재의 종류 여하에 따른 양자의 관계는 대체로 동일 직선으로 표시된다. 즉 압축강도 60N/mm² 정도까지의 범위에서는 물시멘트비가 동일하다면 CA골재 콘크리트는 양질 쇠석의 경우와 동등 강도를 발현한다. [그림4]에 압축강도와 인장강도와의 관계를 나타냈다. 일반적으로 인공경량골재를 이용한 콘크리트는 압축강도와 비교하여 인장강도가 작지만, 압축강도 60N/mm² 까지의 범위에서는 CA골재 콘크리트의 인장강도는 압축강도의 약 1/10~1/12정도이고 쇠석을 이용한 경우와 큰차가 없다. [그림5]에 압축강도와 정탄성계수와의 관계를 나타냈다. 동일 압축강도에서 비교한다면 CA골재를 이용한 콘크리트의 탄성계수는 쇠석을 이용한 경우보다 크다. 일반적으로 콘크리트의 강도가 동일하다면 단위용적중량이 작은 것이 거의 탄성계수가 작다고 알려져 있지만 본 시험에서는 반대 결과가 얻어졌다. 이와같이 CA골재 콘크리트의 인장강도 및 탄성계수가 쇠석을 이용한 경우와 동등 이상이 되는 이유에 대해서는 CA골재와 시멘트페이스트와의 경계부분의 조직이 쇠석보다도 치밀하고 게다가 골재표면의 미세한 요철, 골재와 시멘트페이스트와의 경미한 반응 가능성, 구형입자에 의한 골재·매트릭스 경계부의 응력집중

경감 등이 시멘트페이스트와의 부착강도를 한층 개선시켜 콘크리트구성소재간의 복합특성이 개선되었기 때문으로 사료된다.

[표2]에서와 같이 단위시멘트량 300kg/m³의 콘크리트에 대해서 건조수축시험 및 동결융해시험을 실시했다. 시험결과를 [그림6] 및 [그림7]에 나타냈다. 그림에 의하면 CA골재를 이용한 콘크리트의 건조수축은 쇠석을 이용한 경우보다도 작다. 이것은 CA골재 콘크리트의 단위수량이 쇠석 콘크리트보다도 적게 혼입된 결과로 사료되며, 또한 CA골재 콘크리트의 내구성능 지수는 90%정도이고, CA골재를 이용한 콘크리트의 동결융해 저항성은 쇠석을 이용한것과도 동일한 성능을 발현하였다.

3.2 고강도콘크리트

시험에 이용한 콘크리트는 물시멘트비 27.9%, 단위시멘트량 520kg/m³(조강시멘트)의 고강도 콘크리트이다. 콘크리트의 배합은 [표3]에 나타난 것과 같이 단위량을 동일하게 했다. 사용한 쇠석(최대치수:20mm, 표건비중:2.85, 실적율:58.4%)은 고강도 콘크리트 제품용으로 사용되는 것이고 [표1]에 표시한 쇠석과는 다르다.

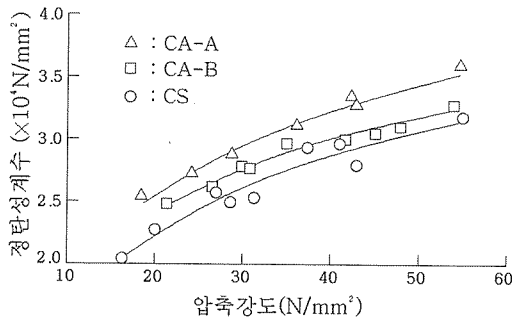
쇠석 콘크리트의 슬럼프 및 슬럼프플로우는 각각 23cm, 53cm이지만, CA골재 콘크리트의 슬럼프플로우는 59cm로 증대되고 양호한 분리 저항성을 갖는다. 그래서, 보통 콘크리트의 경

[표 3] 고강도콘크리트 배합 및 굳지않은 콘크리트의 성질

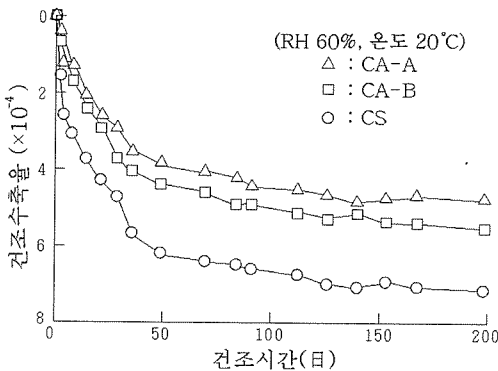
골재 종류	물시멘트비 (%)	잔골재율 (%)	단위량(kg/m ³)					온도 (°C)	슬럼프 (cm)	슬럼프 플로우 (cm)	공기량 (%)	단위용적중량 (kg/m ³)
			물	시멘트	잔골재	굵은골재	감수제					
CA-B	27.9	42.0	145	520	731	726	10.4	21.5	측정불능	59.0	2.5	2,130
CS						1,106		21.0				

[표 4] 압축강도, 정탄성계수 및 단위용적중량 시험결과

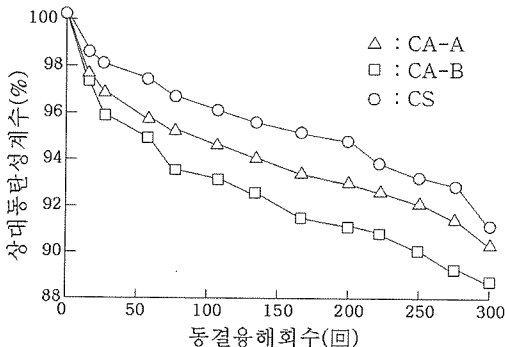
골재 종류	물시멘트비 (%)	재령 (일)	압축강도 (N/mm ²)	정탄성계수 (×10 ⁴ N/mm ²)	단위용적중량 (Kg/m ³)
CA-B	27.9	7	76.7	3.26	2,160
		28	85.5	3.34	2,150
CS	27.9	7	77.5	3.75	2,550
		28	85.2	3.95	2,520



[그림 5] 압축강도와 정탄성계수와의 관계



[그림 6] 건조수축시험결과



[그림 7] 동결융해시험결과

우와 같이 물시멘트비 작은 고강도콘크리트에 있어서도 CA골재는 콘크리트의 워커빌리티 개선에 효과적인 것이 확인되었다.

[표4]에 압축강도와 정탄성계수 시험의 결과를 나타냈다. CA골재 콘크리트의 강도는 쇄석콘크리트와 대체로 같고, CA골재를 이용하여도 물시멘트비를 28%정도로 한다면 재령 28일에 있어서 85N/mm²정도의 고강도를 얻을 수 있었다. 또한 콘크리트의 단위용적중량은 15%정도의 경감이 가능하고 고강도 영역에 있어서도 콘크리트의 경량화가 가능하였다. 한편 고강도 CA골재 콘크리트에서는 재령 7일 및 28일 모두 3.3 10⁴N/mm²정도의 정탄성계수가 얻어지지만 [그림6]의 보통콘크리트의 결과를 함께 고려한다면 60N/mm²이상의 고강도콘크리트에서는 압축강도가 증대되어도 정탄성계수는 큰폭으로 증가하지는 않았다.

3.3 고유동 콘크리트

[표2], [표3]에서 CA골재는 구형도가 우수하기 때문에 콘크리트의 유동성을 증대시키고, 워커빌리티를 개선시키는 것으로 나타났다. 따라서, CA골재는 고유동 콘크리트용 골재로서도 적용할 수 있다고 판단된다.

[표5]에 CA골재를 사용한 고유동 콘크리트의 배합과 성질을 쇄석을 이용한 경우와 비교해서 나타내었다. 사용 결합재는 보통 시멘트와 플라이애시를 소정 비율로 혼합한 것을 사용하였다. 콘크리트의 배합은 슬럼프 플로우치 및 V로트 유하시간을 설정하였다.

[표5]에 의하면, 굵은골재 실적을 보정의 최적치는 쇄석에서는 0.44이지만, CA골재의 경우에는 0.53~0.55까지 증가하여 콘크리트 중의 굵은골재 용적비율 증가가 가능하다. 따라서, 고유동 콘크리트 가운데 굵은골재 절대용적은 쇄석을 이용한 것은 약 0.25m³/m³이지만

CA골재를 사용하는 경우에는 실적울의 증가와 함께 약 0.33m³/m³ 까지 증가한다. 이는 굵은골재의 실적울에서 본다면, 실적울에 전부 반영하지 않고 CA골재의 우수한 입자형상 효과가 콘크리트의 유동성 개선에 공헌하여 소모 모르타 구성성분의 감소가 가능하게 되며, 골재와 모르타와의 비중 차가 쇄석을 이용한 경우보다 감소하기 때문에 콘크리트의 재료분리 저항성이 향상된다고 판단된다. 결과적으로는 CA골재를 사용한 고유동 콘크리트는 소모 유동성, 재료분리저항성을 얻기 때문에 단위수량 및 결합재량을 각각 21kg/m³ 및 66kg/m³ 저감할 수 있고, 재료의 구성비율은 [표6]에 나타난 것처럼 종래의 고강도 콘크리트에

근접하고 있다.

이후, 최적배합방법의 확립, 적절한 콘크리트 재료의 선정 등에 대해서 상세한 검토가 필요할 것이다.

3.4 그 외 골재와 병용한 CA골재 콘크리트

(1) 쇄석과의 병용

[표6] 및 [표7]에 쇄석의 일부(25%, 50% 및 75%)를 CA골재로 용적치환한 콘크리트의 성질을 나타내었다. 소모 슬럼프를 얻기 위해 단위수량은 CA골재의 치환비율에 비례해서 감소시키고, 결과적으로 CA골재가 많은 경우 물시멘트비의 저감이 가능하다.

[표 5] 고유동콘크리트의 배합 및 콘크리트 제성질

(1) 콘크리트 배합

골재 종류	결합재의 구성비율 (wt.%)		결합재의 구속 물비	굵은골재 실적울 (Vol.%)	실적울 보정*	물결합재 비 (wt.%)	물시멘트 비 (wt.%)	잔골재율 (Vol.%)	단위량(kg/m ³)						
	시멘트	플라이 애시							물	시멘트	플라이 애시	잔골재	굵은골재	감수제**	AE제
CA-B	100	0	0.95	63.4	0.53	0.53	27.3	44.2	175	641	0	657	598	6.83	0.460
	75	25	0.91	63.4	0.53	0.53	39.2	44.2	171	436	145	657	598	6.65	0.347
	50	50	0.81	63.4	0.55	0.55	64.6	42.8	166	257	257	644	620	4.93	0.307
CS	50	50	0.81	61.0	0.44	0.44	64.5	52.6	187	290	290	726	667	5.38	0.327

* 실적울보정 : 굵은골재 실적울에 곱하여 굵은골재 용적을 결정하기 위한 정수

** 감수제 : 고성능 AE 감수제(폴리카본산계 : 표준형)

(2) 콘크리트의 성질

골재 종류	결합재의 구성비율 (wt.%)		슬럼프 플로우 (cm)	공기량 (%)	V로트 유하 시간 (초)	상대 로트 속도비	압축강도 (N/mm ²)			정탄성계수 (×10 ⁴ N/mm ²)			건조수축 (3개월) (×10 ⁻⁴)	내구성 지수 (%)	단열온도 상승특성		
	시멘트	플라이 애시					재령 7일	재령 28일	재령 91일	재령 7일	재령 28일	재령 91일			Q _m	γ	δ
CA-B	100	0	65.5	6.0	16	0.6	63.6	72.8	87.4	3.10	3.32	3.50	-	-	-	-	-
	75	25	68.0	5.5	19	0.5	48.8	63.0	79.3	2.67	2.92	3.12	5.46	-	-	-	-
	50	50	65.5	4.5	20	0.5	21.9	32.1	45.4	2.14	2.36	2.68	4.84	86.0	55.37	0.662	1.751
CS	50	50	67.8	5.2	15	0.7	26.0	41.0	53.2	2.21	2.47	2.81	6.25	-	57.35	0.574	1.894

[표 6] 쇄석을 함께 사용한 CA골재 콘크리트의 배합 및 굳지않은 콘크리트의 성질

굵은골재 혼합비율 (Vol.%)		물시멘트비 (%)	단위량(kg/m ³)					온도 (℃)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	단위용적중량 (kg/m ³)
CA-A	CS		물	시멘트	잔골재	굵은골재					
						CA-A	CS				
25	75	52.3	160	300	789	223	731	21.0	12.0	4.3	2,290
50	50	52.0	156	300	793	372	525	21.0	11.5	4.2	2,240
75	25	50.7	152	300	798	524	317	21.0	12.0	4.5	2,180

[표 7] 압축강도, 인장강도 및 정탄성계수 시험결과

굵은골재 혼합비율 (Vol.%)		물시멘트비 (%)	압축강도(N/mm ²)			인장강도(N/mm ²)			정탄성계수 (×10 ⁴ N/mm ²)		
CA-A	CS		재령3일	재령7일	재령28일	재령3일	재령7일	재령28일	재령3일	재령7일	재령28일
25	75	53.3	22.8	31.1	42.7	2.22	2.99	3.10	2.32	2.61	2.97
50	50	52.0	23.8	31.5	43.1	2.37	2.57	3.27	2.42	2.66	3.00
75	25	50.7	24.4	32.7	44.4	2.30	2.87	3.33	2.50	2.73	3.01

콘크리트의 단위용적중량은 골재의 치환비율에 따라서 2,180~2,290kg/m³의 범위에 직선적으로 변화한다. 실제 콘크리트 제조에는 골재저장설비의 증설, 복잡한 제조공정 등의 과제는 남아있지만, CA골재와 쇄석을 병용하면 콘크리트의 성질을 향상시키며, 중량을 저감할 수 있는 콘크리트를 제조할 수 있다.

85N/mm²이상의 고강도 및 고탄성이 가능하고, 압축강도가 60N/mm² 정도에서도 정탄성계수의 저하는 적다. 한편, 단위용적중량을 한층 저감시켜도 CA골재 콘크리트는 통상의 인공경량골재 콘크리트에서 확인되는 탄성계수의 저하가 발생하지 않을 것으로 예측되고, 실용적인 고강도 경량 콘크리트의 실현도 기대되

(2) 인공경량 잔골재와의 병용

종래의 인공경량골재 콘크리트 (경량 콘크리트 1종, 단위용적중량 1,800kg/m³ 정도)에서는, 물시멘트 비를 작게해서도 70N/mm² 정도 이상의 고강도 발현을 기대하기 어렵지만, 특히 5×10⁴N/mm² 정도 이상의 정탄성계수를 얻을 수 없다. 이것이 인공경량골재 콘크리트를 고강도 콘크리트 구조물에 적용할 경우 큰 장애가 된다. 한편, CA골재 콘크리트는 단위용적중량 2,100kg/m³ 정도 이지만, 압축강도

[표 8] 인공경량잔골재를 사용한 CA골재콘크리트배합 및 굳지않은 콘크리트의 성질

W/C (%)	S/a (%)	단위량(kg/m ³)					슬럼프 (cm)	공기량 (%)	단위용적중량(kg/m ³)
		W	C	S	G	감수계			
25	44.0	150	600	535	672	5.28	53.8	2.1	2,010
30	45.0	150	500	574	693	3.65	50.5	2.4	1,960
35	46.0	150	429	607	704	2.79	50.5	2.5	1,930

[표 9] 압축강도, 인장강도 및 단위용적중량 시험결과

W/C (%)	S/a (%)	압축강도 (N/mm ²)		정탄성계수(×10 ⁴ N/mm ²)		단위용적중량(kg/m ³)		
		증기양생후	재령14일	증기양생후	재령14일	증기양생후	재령14일	건조
25	44.0	64.6	67.7	3.13	3.17	1,980	1,930	1,840
30	45.0	52.1	54.8	2.84	2.92	1,930	1,880	1,790
35	46.0	35.5	44.1	2.53	2.58	1,890	1,840	1,740

어진다. 그러므로, 인공경량 잔골재를 병용하여 경량화 CA골재 콘크리트의 특성에 대해서 검토한다.

[표8]에 콘크리트의 배합 및 굳지않은 콘크리트의 성질을 나타내었다. 콘크리트는 물시멘트비를 25%, 30% 및 35%, 단위수량을 150kg/m³으로 일정하게 하고, 소정의 슬럼프 플로우를 얻기 위해 고성능 감수제(폴리카르본산계)의 첨가량을 조정하였다.

[표9)에는, 압축강도와 콘크리트의 단위용적중량을 나타내었다. 콘크리트의 양생은 공장제품을 대상으로 하기 때문에 증기양생(최고온도 : 65℃)으로 하였다. 표에 의하면 물시멘트비 25%의 콘크리트는 재령 14일에 있어서 단위용적중량은 1,930kg/m³ 이지만, 압축강도 67.7N/mm²을, 또한 정탄성계수는 3.17 104N/mm²을 발현하는 것이 확인되었다. 또한, 현재의 고강도 콘크리트 제품, 달리 말하면 도로용 프리스트레스트 콘크리트의 소요강도(설계기준강도)는 49N/mm² 정도가 주류인 것을 생각해 본다면, 65N/mm² 정도에서 정탄성계수 3.0 104N/mm² 이상을 유지할 수 있는 콘크리트라면, 이러한 종류의 콘크리트 구조물에 충분히 적용가능하다고 사료된다.

또한, 이 CA골재 콘크리트의 단위용적중량이 2,000kg/m³ 이하인 것을 고려한다면, 통상

적인 콘크리트보다도 현저하게 자중경감효과를 기대할 수 있지만, 굵은골재(CA골재)와 모르터와의 비중차 감소에 의해 콘크리트의 재료분리저항성도 향상되기 때문에, 인공경량 잔골재를 병용한 CA골재 콘크리트를 소정의 콘크리트 구조물에 적용하면 설계·시공상의 효과가 클 것으로 판단된다.

4. CA 골재를 이용한 초 고강도 프리스트레스트 콘크리트의 성질

고가교에 이용되는 프리스트레스트 콘크리트에는 고강도 콘크리트가 이용되어지고 있다. 그러나, 고강도를 얻기 위해서는 골재를 엄선해서 사용하여야 하나, 최근에는 고강도 콘크리트에 적합한 양질 골재의 입수가 어려운 것이 현실이다.

CA골재 콘크리트는 압축강도 100N/mm² 정도, 단위용적중량 2,100kg/m³ 정도의 고강도·경량 콘크리트의 제조가 가능하다. 따라서 고강도 CA골재 콘크리트를 적용하여 설계기준강도를 98N/mm²까지 높인 프리스트레스트 콘크리트를 제작하고, 쇄석 콘크리트를 이용한 경우와 비교 검토하였다.

[표10] 및 [표11]에 사용한 콘크리트의 성질 및 재하시험결과를 각각 나타내었다.

[표 10] 프리스트레스 콘크리트 시험에 사용한 콘크리트의 성질

골재종류	설계기준강도 (N/mm ²)	물시멘트비 (%)	단위시멘트량 (kg/m ³)	압축강도 (N/mm ²)	인장강도 (N/mm ²)	휨강도 (N/mm ²)	정탄성계수 (x10 ⁴ N/mm ²)	단위용적중량 (kg/mm ³)
CA-B	98	20.0	675	118.1	3.80	4.81	3.38	2,100
CS	49	38.6	438	57.6	3.10	4.50	3.23	2,420

[표 11] 프리스트레스 콘크리트의 재하 시험 결과

골재종류	설계기준강도 (N/mm ²)	유효프리 스트레스 (N/mm ²)	제원				균열비중		파괴하중	
			폭(cm)	높이(cm)	체적(m ³)	중량(kg)	실측치	이론치	실측치	이론치
CA-B	98	24.0	70	35	2.82	5,920	161.8	155.9	334.4	392.3
CS	49	12.9	70	50	4.03	9,740	152.0	151.0	404.0	375.6

쇄석 콘크리트의 경우에는 고성능 감수제를 이용하여도 콘크리트의 교반이 불가능하였다. 그러나 물시멘트비 20%의 고강도 콘크리트에 CA골재를 이용한 경우 콘크리트 제조에 있어서도 비교적 용이하게 제조할 수 있었다. 또한, 표에 나타난 것처럼 120N/mm² 정도의 고강도 발현을 확인할 수 있었고, 설계기준강도 98N/mm²의 고강도 프리스트레스트 콘크리트의 설계·시공이 가능하였고, 콘크리트의 단위용적중량도 13% 정도 경감할 수 있는 것이 확인되었다. 또한, 자중경감의 효과도 고려해 설계강도 98N/mm²로 하고, 쇄석 콘크리트와 동등의 균열내력으로 설계한다, CA골재 콘크리트를 이용한 경우 쇄석 콘크리트의 경우보다도 부재의 크기를 줄일수 있을 것이며, 단위용적중량의 감소와 더불어 자중은 쇄석 콘크리트를 사용한 경우의 60% 정도까지 경감할 수 있을 것이다. 고강도 프리스트레스트 콘크리트의 실용화에 있어서 이후, 고강도 CA골재 콘크리트 및 프리스트레스트 콘크리트의 파괴모드의 상세한 검토, 고강도 콘크리트용 보강재의 적절재료 선정 및 개발, 재료특성을 고려한 설계방법의 검토 등 많은 과제가 남았지만 콘크리트의 체적·자중경감과 함께 단면축소에 의한 건설한계로의 대응, 경량화에 의한 하부체적·구조형식의 변경 및 제조·운반·가설 코스트의 저감효과 등 종합적으로 고려하면 CA골재 콘크리트를 이용한 초고강도 프리스트레스트 콘크리트의 실현 가능성은 크다고 사료된다.

5. 결론

본 원고에서 소개한 석탄회를 주원료로 하는 인공골재는, 종래에 없는 콘크리트의 고강도·경량화가 가능하고, 또한 기존의 콘크리트 재료와 조합하여 우수한 특성을 발현하는 콘크리트의 제조도 가능하다. 따라서, 이후 석탄회의 활용대책으로 유용한 활용수단이 될 수 있을 것이다.

참고 문헌

- 1) 曾根徳明 外, 石炭灰を多量に混用したコンクリートの配合設計に關する一考察, セメント・コンクリート論文集, No. 50, pp. 726~731, 1996
- 2) 谷川公一 外, 石炭灰を多量に混用したコンクリートの諸特性に關する検討, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, pp. 331~336, 1995
- 3) 榮井建二 外, 石炭灰を原料とした人工輕量骨材を用いたコンクリートの流動性と強度特性, 콘크리트工學年次論文報告集, Vol. 17, No. 1, pp. 411~416, 1995
- 4) 서치호 외, 유동화 경량골재콘크리트의 유동특성과 슬럼프플로우 경시변화에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 논문집, 제13권 9호, pp. 285~296, 1997
- 5) 서치호 외, 고유동 경량골재콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 논문집, 제17권 4호, pp. 71~78, 2001