콘크리트 종류에 따른 강도 및 내구성 특성

Strength and Durability Properties by Concrete Type

이 병 덕* 심재원** 양 우 석** 안 태 송***
Lee, Byung Duck Shim, Jae Won Yang, Woo Seok Ahn, Tae Song

ABSTRACT

The optimum mix proportioning of concrete is to produce a concrete which satisfies the strength, workability and durability required with possible minimum component of materials. However, in practice, the cement content of mix proportioning in construction field is normally higher than the required.

In this study, the existing mix proportioning of concrete currently used in Korea Highway Corporation has been reviewed by reducing 10kg of cement content by 3~5 steps in strength and workability during the first year of this project. The optimum mix design is established based on the results of the above review and durability were examined during the second year.

The experimental results through 2 years show that 10~30% of the reduction of cement content still satisfies the specified strength of concrete and produces higher durability concrete.

1 서론

현재 우리나라의 시멘트콘크리트 배합비에 의하면 대체적으로 시멘트 사용량의 과다로 수화열과 건조수축에 의한 큰 균열발생 가능성을 내포하고 있다. 그리고 경제적 면에서 콘크리트의 배합설계시 시멘트량 과다설계로 인해 소요의 콘크리트 구조물의 단면을 시공하는데 비용이 높아지게 된다.

본 연구는 2차년도에 걸친 시험으로서, 현재 고속도로용 시멘트콘크리트 표준배합비[1]가 구조물의 기능수행에 요구되는 적정한 양의 구성재료로 배합비가 이루어졌는지의 여부를 점검하기 위해서이다. 이를 위해서 콘크리트 용도별로 강도, 내구성, 경제성에 만족하는 우수한 콘크리트를 생산할 수 있는 배합비를 도출하는 것이다.

2 실험 개요

2.1 사용재료

본 실험에서는 KS L 5101에서 규정한 1종 보통포틀랜드 시멘트는 비중 3.15, 분말도 3,200이고, 3종

* 정회원, 한국도로공사 도로연구소 책임연구원
** 정회원, 한국도로공사 도로연구소 연 구 원
*** 정회원, 한국도로공사 도로연구소 수석연구원

2. 실험 개요

2.1 사용재료

본 실험에서는 KS L 5101에서 규정한 1종 보통포틀랜드 시멘트는 비중 3.15, 분말도 3,200이고, 3종 조강시멘트는 비중 3.14, 분말도가 4,400인 것을 사용하였다. 굵은골재는 현재 고속도로 건설공사에 사용중인 쇄석골재로 콘크리트 종류별로 최대치수가 19mm, 25mm, 32mm, 40mm로 각각의 비중이 2.62, 2.61, 2.62, 2.62이고, 또한 잔골재는 강사를 사용하였으며 비중이 2.55 이다.

콘크리트 혼합물 제조시 사용한 혼화제는 콘크리트 종류별로 사용량이 다르고, 그 종류로는 AE감수제(리그닌 설폰산염계), 고유동화제(나프탈렌계), 고성능 AE감수제(포르말린 축합물)이고, 시멘트량 저감을 위한 방법의 일환으로 플라이애쉬(비중 2.39, 분말도 3,152)와 고로슬래그미분말(비중 2.90, 분말도 4,800) 및 석분(비중 2.35)을 콘크리트 종류의 일부에 첨가하였다.

2.2 실험변수 및 콘크리트 종류별 배합비

1차 년도에는 단위시멘트량을 위주로 강도시험을, 2차 년도에는 전년도 데이터를 바탕으로 내구성 시험으로 포장, 수중, 빈배합 콘크리트를 제외한 모든 콘크리트에 염소이온 투과성 시험, 수화열에 문제가 발생할 수 있는 콘크리트에 단열온도상승량 시험, 고강도 콘크리트와 부재치수가 커 건조수축으로 균열이 발생할 여지가 있는 콘크리트에 건조수축 시험을 실시하였다. 콘크리트 종류별 기준배합비는 표 1과 같고, 콘크리트 종류는 한국도로공사에서 고속도로 공사 목적에 알맞게 분류한 것이다.

표 1 콘크리트 배합표[1, 3]

종별	설계기준강도 (kgf/cm²)	골재최대치수 (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	W/C (%)	S/a (%)	단위량 (kg/m³) W	C	S	G	혼화제	첨가량 (C×%) AE감수제	유동화제	고성능AE감수제	비고
고강도	450	19	15	4-7	35	42	160	457 (555)	698	967	-	-	-	1.5	중기양생
					31	43	156	503 (540)	714	954	-	-	-	1.1	3종시멘트
	400				40	43	168	420 (520)	730	976	-	0.2	0.2	-	
					40	45	167	334 (437)	756	932	83.5	-	-	0.8	플라이애쉬 20%대체
					36	42	168	327	753	965	140.1	0.3	0.25	-	플라이애쉬 30%대체
					40	43	168	210	722	968	210	0.3	0.35	-	고로슬래그 50%대체
1종	270	25	13	4-6	50	48	172	344 (392)	802	953	-	0.18	-		
			15		50	45	152	304 (361)	829	1018	-	0.2	0.35		
2종	240	25	15	4-6	52	44	164	316 (346)	793	1013	-	0.25	-		
		32			49	40	157	320 (340)	721	1094	-	0.25	-		
					45	39	157	244	683	1081	104.6	0.25	-		플라이애쉬 30%대체
					49	40	157	160	717	1088	160	0.20	-		고로슬래그 50%대체
3종	210	25	15	4-6	54	44	175	317 (327)	777	993	-	0.10			
		40	8	1-2	57	43	157	275 (314)	791	1061	-	-		-	
					53	42	157	237	792	1106	59.3	-			플라이애쉬 20%대체
					57	43	157	138	821	1100	138	-			고로슬래그 50%대체
중분대	240	19	2-5	4-6	53	49	155	292 (345)	901	945	-	0.08			
					50	48	142	227 (276)	895	977	56.8	0.25	-		플라이애쉬 20%대체
					50	48	142	199	891	973	85.3	0.3			플라이애쉬 30%대체
L측구 다이크	210	19	2-5	4-6	53	49	147	277 (331)	917	962	-	0.1			
					49	48	135	193 (232)	900	986	82.7	0.3			플라이애쉬 30%대체
					53	49	144	267 (320)	786	970	138.7	0.3			고로 50%대체
포장	σ_{bk}=45	32	4-6	4-6	49	39	151	308 (336)	713	1128	-	0.09			

※ 표에서 ( ) 밖의 단위시멘트량은 본 연구에 사용한 최적단위시멘트량, ( )안은 기존 표준배합비의 단위시멘트량

3. 결과 및 고찰

3.1 경화한 콘크리트의 압축강도 특성

그림 1의 PSM(Precast Segmental Method)용 콘크리트를 살펴보면, 점선으로 표시된 수평선은 공정 순서에 따라 요구되는 강도이고, 물-시멘트비 38%, 단시멘트량 421kg 배합에서 공정에 요구되는 강도를 모두 만족시키고 있다. 기존 표준배합비와 본 연구에서의 최적배합비간에 단위시멘트량의 차이는 134kg으로서 약 24%이다. 그러나 물-시멘트비 38% 배합은 재령 20일에서의 요구강도가 배합강도 이하이다.

FCM(Free Cantilever Method)용 콘크리트는 현장 타설용 고강도콘크리트로서, 물-시멘트비 31% 배합을 보면 3일에 요구되는 압축강도 320kgf/㎠과 28일 강도를 동시에 만족하는 배합이다. 3일 강도는 4% 상회하나 28일 강도는 약 34% 정도가 상회함을 보여주고 있다. 3일에 요구되는 강도 때문에 단위시멘트량을 약 7%만을 감소시킬 수 있었다.

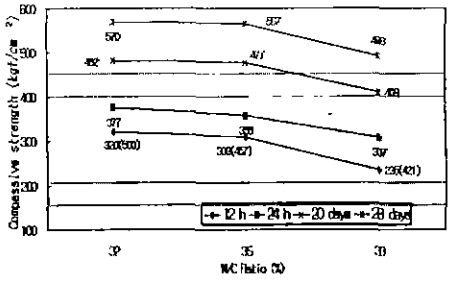

그림 1 PSM용 콘크리트의 압축강도

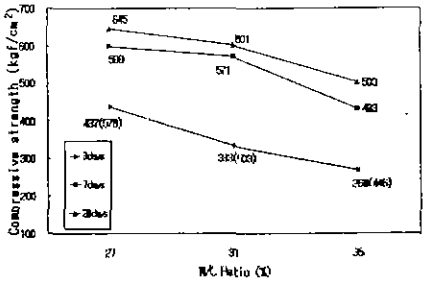

그림 2 FCM용 콘크리트의 압축강도

ILM(Incremental Launching Method)용 콘크리트에서 광물성혼화재를 치환하지 않은 경우, 물-시멘트비 40%의 배합으로부터 단위시멘트량을 기존의 표준배합보다 약 19%를 감소하였음에도 불구하고 28일 설계기준강도의 20% 정도 상회하는 결과를 얻었다(그림 3). 플라이애쉬를 20% 치환한 경우, 물-시멘트비 40%, 단위시멘트량 334kg(그림 3)으로 설계기준강도를 약 31% 상회함을 알 수 있었고, 단위시멘트량의 감소는 표준배합비에 비하여 약 24% 감소한 값이다. 플라이애쉬를 30% 치환한 콘크리트에서는 초기강도가 크게 떨어지는 현상을 보였으나, 물-시멘트비가 36%인 배합에서는 소정의 강도발현이 될 수 있었다(그림 3). 고로슬래그미분말을 단위시멘트량의 50%를 치환한 경우(그림 3)는 물-시멘트비 40%인 배합에서 설계기준강도보다 약 13% 상회하는 값을 얻을 수 있었고, 이는 건조수축, 수화열, 투과성의 저감을 기대할 수 있을 것이다.

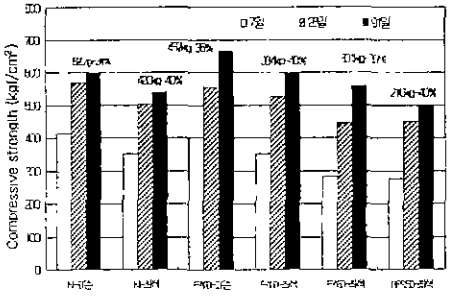

그림 3 ILM용 콘크리트의 압축강도

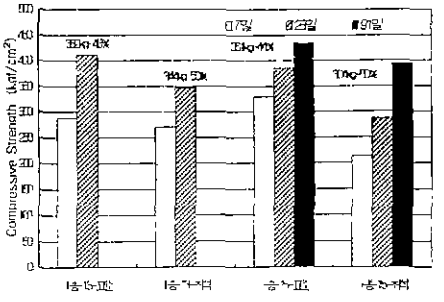

그림 4 4종 콘크리트의 압축강도

1종 콘크리트는 물-시멘트비 50%로서 슬럼프 13cm인 경우(그림 4)는 단위시멘트량을 12% 감소시켜 28일 압축강도는 설계강도보다 28.5% 큰 결과를 얻었다. 또한 슬럼프 15cm인 경우(그림 4)는 단위시멘트량을 16% 감소시키고 설계기준강도보다 약 32% 상회하는 결과를 얻었다.

굵은골재 최대치수 25mm를 사용한 2종 콘크리트는 물-시멘트비 52%의 배합에서 소요의 강도가 발현되었다(그림 5). 이 배합은 단위시멘트량을 표준배합비로부터 8% 감소시킨 배합이다. 굵은골재 최대치수 32mm를 사용하고 혼화재를 첨가하지 않은 콘크리트의 경우는 물-시멘트비 49%인 배합이 최적으로 나타났다. 이는 단위시멘트량을 약 7% 감소시켜 28일 설계강도를 약 8% 상회하는 결과를 얻을 수 있었다. 고로슬래그미분말을 단위시멘트 중량의 50% 치환한 배합에서는 물-시멘트비 49%인 배합(그림 5)이 최적배합으로 28일 압축강도가 288kgf/cm^{2}이므로 물-시멘트비를 다소 낮추어도 소요의 강도 발현에는 문제가 없을 것으로 사료된다. 플라이애쉬를 30% 치환한 배합은 고로슬래그미분말을 50% 첨가한 콘크리트 보다 물-시멘트비가 한 단계 낮은 45%로 설정하면 소요의 강도발현이 될 수 있다(그림 5).

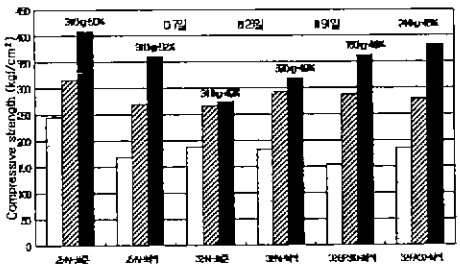

그림 5 2종 콘크리트의 압축강도

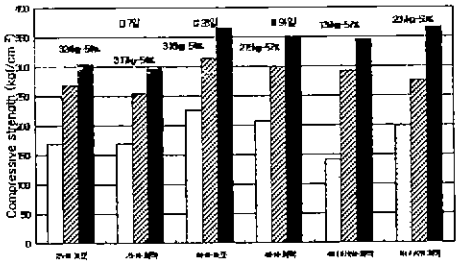

그림 6 3종 콘크리트의 압축강도

굵은골재 최대치수 25mm를 사용한 광물성혼화재를 첨가하지 않은 3종 콘크리트의 경우, 기존의 표준배합과 최적배합간에 소요의 강도발현에 필요한 단위시멘트량에는 큰 차이가 없었다.(그림 6). 광물성혼화재를 첨가하지 않은 굵은골재 최대치수 40mm인 경우는 기존표준배합의 단위시멘트량을 13% 정도 감소시켜 설계기준강도보다 41%를 상회하는 결과(그림 6)를 얻었다. 강도면에서는 아직도 시멘트량을 줄일 수 있으나 굵은골재 최대치수가 커 워커빌리티 때문에 더 이상 줄일 수 없다고 사료된다. 고로슬래그미분말을 단위시멘트 중량의 50% 치환한 배합의 경우는 단위시멘트량을 약 56% 감소시켜 설계강도를 39% 정도 상회하는 결과(그림 6)를 얻을 수 있었다. 또한 플라이애쉬를 단위시멘트량 중량의 20%를 치환한 배합은 단위시멘트량을 약 30% 줄여 설계강도의 약 14% 정도보다 큰 값을 얻었다(그림 6).

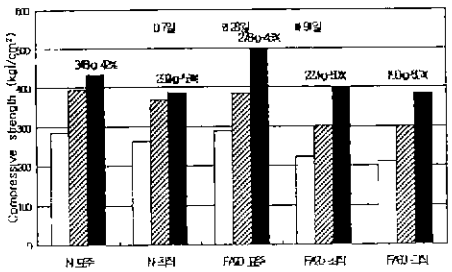

그림 7 중분대용 콘크리트의 압축강도

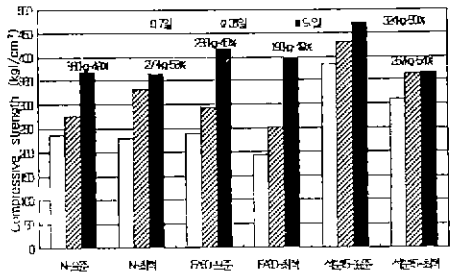

그림 8 L측구 및 다이크용 콘크리트 압축강도

광물성혼화재를 첨가하지 않은 중앙분리대용 콘크리트는 물-시멘트비 53%에서 단위시멘트량을 15% 정도 줄여도 설계기준 강도를 약 53% 정도 상회하는 결과(그림 7)를 얻었고, 플라이애쉬를 20% 치환한 배합에서는 단위시멘트량을 기존 표준배합보다 단위시멘트량을 약 18% 감소시켜 설계강도보다 약 25% 큰 결과(그림 7)를 얻었다. 또한 표준배합에서 플라이애쉬 30%를 치환한 콘크리트에서는 실험배합으로 단위시멘트량을 28% 감소시켜도 설계강도보다 약 25% 정도 상회하는 값을 얻었다.

광물성혼화재 무첨가 L측구용 배합의 경우, 물-시멘트비 53%에서 단위시멘트량을 16% 줄여 설계강도를 57% 상회하는 결과(그림 8)를 얻었으며, 플라이애쉬를 30% 치환한 배합에서는 물-시멘트비 49%로서 기존의 표준배합비보다 단위시멘트량을 17% 감소시켜 설계기준 강도에 20% 상회한 결과(그림 8)를 얻었다. 또한 석분을 잔골재 대신 치환한 배합의 경우는 기존의 표준배합의 단위시멘트량을 18% 감소시켜(물-시멘트비 54%) 설계강도에 42% 상회한 결과(그림 8)를 얻을 수 있었다.

3.2 콘크리트 종류에 따른 단열온도상승 특성

본 실험에서 얻은 실험 결과와 회귀분석에 의해 얻은 단열온도상승 속도에 관한 계수 r는 콘크리트 종류별로 아래와 같고, 열특성치는 표 2와 같다. 단열온도상승 실험결과에 대한 전반적인 사항을 정리하면 첫째, 고강도 콘크리트(PSM, FCM, ILM용)는 다른 종류의 콘크리트에 비해 단위시멘트량이 많이 첨가됨에 따라 단열온도상승량이 크게 증가하였고, 콘크리트 타설후 초기재령(1일)에서 온도상승이 50~60℃로 기울기가 가파르게 나타남을 알 수 있었다. 둘째, 광물성혼화재를 첨가하지 않은 기존의 표준배합과 최적배합간에 단열온도상승의 경향은 유사하게 나타났다. 셋째, 광물성 혼화재인 고로슬래그와 플라이애쉬의 치환은 콘크리트의 단열온도상승량과 발열속도를 크게 감소시키는 것으로 나타났다. 이는 실제 현장에서 콘크리트 타설시 광물성혼화재 혼입이 수화열 제어 효과가 있다고 사료된다.

표 2 최대단열온도상승량 k와 상수 r의 결과 값

콘크리트 종 류	타설온도 (℃)	k	r	단열온도상승 곡선식
PSM-450	17.1	59.5	1.17	$59.5\times(1-e^{-1.17t})$
FCM-450	18.0	66.4	1.91	$66.4\times(1-e^{-1.91t})$
ILM-N-(표준)	18.2	64.0	1.52	$64.0\times(1-e^{-1.52t})$
ILM-N-(실험)	18.5	60.9	1.20	$60.9\times(1-e^{-1.2t})$
ILM-FA30	18.2	57.7	0.56	$57.7\times(1-e^{-0.56t})$
ILM-BFS50	17.0	47.8	0.52	$47.8\times(1-e^{-0.52t})$
2종-N(표준)	19.8	42.4	0.90	$42.4\times(1-e^{-0.90t})$
2종-N(실험)	18.5	41.5	0.89	$41.5\times(1-e^{-0.89t})$
2종-FA30	17.0	37.83	0.65	$37.8\times(1-e^{-0.65t})$
2종-BFS50	17.5	32.13	0.69	$32.1\times(1-e^{-0.69t})$
3종-N(표준)	17.5	43.12	0.96	$43.1\times(1-e^{-0.96t})$
3종-N(실험)	17.0	41.91	0.91	$41.9\times(1-e^{-0.91t})$
3종-FA20	17.0	30.63	0.53	$30.6\times(1-e^{-0.53t})$
3종-BFS50	17.0	26.36	0.54	$26.4\times(1-e^{-0.54t})$

3.3 콘크리트 종류에 따른 건조수축

FCM용 콘크리트, 설계기준 강도가 400kg/㎠인 ILM용, 2종 콘크리트, 포장 콘크리트의 건조수축 실험 결과는 실험배합과 기존배합간에 큰 차이가 없었으며, 광물성 혼화재 첨가 유·무에 상관없이 비슷한 수축변형율을 나타냈다. 그러므로 콘크리트의 건조수축에는 플라이애쉬나 고로슬래그미분말의 첨가 효과가 크지 않다는 것을 알 수 있었으며, 단위수량이나 단위시멘트량을 줄이는 방법이 가장 효과적이라 할 수 있다[2].

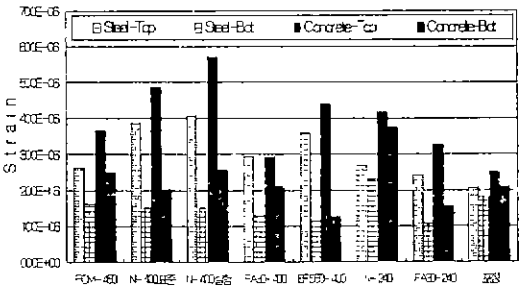

그림 9 철근 및 콘크리트의 상·하면 건조수축 변형율

3.4 콘크리트 종류에 따른 투과성

광물성혼화재를 첨가하지 않은 실험배합과 기존의 표준배합간에 콘크리트의 투과성은 큰 차이를 보이지 않았으며, 동일 재령과 물-시멘트비에서 통과전하량을 비교하면 광물성 혼화재를 첨가하지 않은

콘크리트(N계열)가 플라이애쉬(FA계열)나 고로슬래그미분말(BFS계열)로 치환한 콘크리트에 비해 1.5~3배 가량 투과성이 큰 것으로 나타났다(그림 10~12). 특히, 플라이애쉬와 고로슬래그미분말을 치환한 콘크리트에서는 장기재령에서 통과전하량이 크게 감소하였다. 이는 광물성 혼화재의 큰 분말도로 미세공극을 충진하는 효과가 뛰어나 조직이 치밀한 콘크리트가 되어 투과성을 개선하는데 기여한다는 것을 알 수 있었다. 따라서 투과성은 광물성혼화재의 첨가로 콘크리트와 골재간의 천이대에 존재하는 공극 크기와 분포를 조절하여 수분의 흐름통로를 좀 더 불연속적으로 되게 할 것이다.

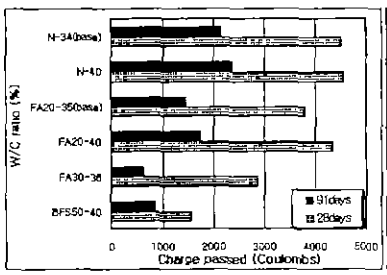

그림 11 ILM용 콘크리트의 투과성

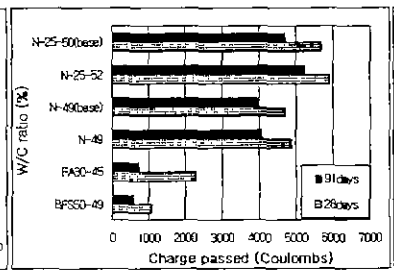

그림 12 2종 콘크리트의 투과성

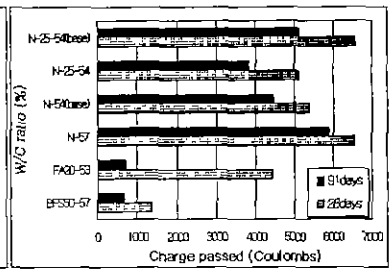

그림 13 3종 콘크리트의 투과성

4. 결 론

(1) 강도 측면에서 현재 사용되고 있는 대부분의 시멘트 콘크리트 표준배합비는 콘크리트 종류에 따라 그 구조물에 기능수행을 하는데 필요한 소요강도 이상의 과다한 강도가 발현 되었고, 그러므로 단위시멘트량을 콘크리트 종류에 따라 다소의 차이는 있지만 10~30% 정도 감소시켜도 설계기준강도 및 배합강도에 만족하는 것으로 사료된다.

(2) 최대 단열온도상승은 플라이애쉬 30% 치환한 배합은 약 10% 정도, 고로슬래그미분말 50% 치환한 배합은 약 25% 이상 감소하였다. 최대 단열온도상승은 단위시멘트량이 증가함에 따라 증가하였고, 플라이애쉬나 고로슬래그미분말을 첨가함에 따라 감소하였다. 따라서 플라이애쉬와 고로슬래그미분말의 첨가는 수화열 억제 효과가 있다.

(3) 건조수축량은 현행 표준배합 콘크리트와 혼화재를 첨가하지 않은 콘크리트 간에는 거의 유사한 경향을 띄었으며, 플라이애쉬와 고로슬래그미분말을 치환한 콘크리트에서는 혼화재를 치환하지 않은 것과 비교하여 거의 같거나 다소 낮은 결과로서, 광물성혼화재의 효과가 크지 않았다.

(4) 플라이애쉬나 고로슬래그미분말로 치환한 배합의 경우 투과성은 혼화재를 치환하지 않은 콘크리트에 비해 매우 낮아지고, 특히 장기재령으로 갈수록 현저하게 투과성이 감소하는 결과를 얻었다. 그러므로 콘크리트에서 중성화를 촉진할 수 있는 높은 투과성은 분말도가 큰 플라이애쉬나 고로슬래그미분말을 사용하면 큰 효과가 있다고 사료된다.

참 고 문 헌

1. 한국도로공사, "고속도로공사 전문시방서 (토목편)", 시멘트 콘크리트, pp 14~49, 1998.
2. P. Kumar Mehta, & Paulo J. M. Monteiro., "Concrete -Structure, Properties, and Materials-", Prentice-Hall, INC Englewood Cliffs, New Jersey 07623, 1993
3. 한국도로공사, "콘크리트 용도별 최적배합을 위한 연구", 도로연 99-47-24, 1999.