

콘크리트 용도별 최적배합을 위한 연구

Optimum Mix Design of Concrete

이 병 덕^{*}

양 우 석^{**}

안 태 송^{***}

Lee, Byung Duck

Yang, Woo Seok

Ahn, Tae Song

ABSTRACT

Strength provisions in Korea Concrete Institute code are more conservative than those in ACI code by increasing load factors and decreasing capacity reduction factors. Cement content of mix design in construction field is usually higher than the modified for standard deviation because of rigorous inspection. Higher cement content increases not only concrete strengths but also heat of hydration, shrinkage and brittleness which are not beneficial.

To reduce and optimize the cement content in current mix design of Korea Highway Corporation, properties of fresh and hardened concrete for 16 different mix proportions have been investigated. It is found that the chemical admixture and cement content of current mix proportions for highway construction are somewhat higher than the optimum amount. Therefore, the optimum mix design for 16 different purposes has been proposed.

1. 서론

현재 우리나라의 시멘트 콘크리트 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. 또한 우리나라의 콘크리트 시방서에서는 콘크리트 구조물의 안전율을 고려하여 설계강도에 각종 보정계수를 과도하게 책정하여 콘크리트 혼합물이 필요 이상으로 많이 소요 되고 이에 따라 구조물의 중량이 증대하게 된다. 그러므로 콘크리트 구조물별로 소정의 강도를 발현할 수 있도록 적정 단위시멘트량과 시멘트 대체혼화재의 사용으로 재료의 낭비를 막고 공사비 절감, 건조수축과 균열 방지로 구조물의 보수비용 감소와 보수기간의 연장, 또한 사회적으로 문제시되고 있는 구조물의 안전성 증진을 기대할 수 있을 것이다.

본 연구는 현재 고속도로용 시멘트 콘크리트 표준 배합비를 시험을 거쳐 단위시멘트량을 저감하고도 콘크리트 혼합물이 제 기능을 다할 수 있는지의 여부를 점검하기 위해서이다. 이를 위해서 콘크리트의 사용 용도별로 단위시멘트량을 단계별로 줄이고 혼화재의 적정량을 시멘트 대체재로 혼화하여 강도, 내구성, 경제성에 만족하는 우수한 콘크리트를 생산하게 하는 것이다. 그리하여 상대적으로 단위시멘트량이 많이 첨가되는 고강도콘크리트에서 수화열과 건조수축으로 인한 균열의 문제를 적정 수준 이하로 줄이는 것이다. 그리고 보통강도 콘크리트에서는 단위시멘트량과 대체 혼화재에 따라 소요의 내구성을 발휘할 수 있는 배합비를 산정하는 것이다. 또한 경제적으로 최소비용적인 콘크리트 혼합물을 만들 수 있는 배합비를 도출하는 것이다.

* 정회원, 한국도로공사 도로연구소 연구원

** 정회원, 한국도로공사 도로연구소 위촉연구원

*** 정회원, 한국도로공사 도로연구소 재료연구실장

2. 실험 개요

2.1 사용재료

사용된 시멘트는 1종 보통포틀랜드 시멘트로 비중이 3.15이고, 굵은골재는 쇠석골재로 콘크리트 종류별로 최대치수가 13mm, 19mm, 25mm, 40mm로 비중이 2.64, 2.63, 2.61, 2.70이고, 그리고 잔골재는 비중이 2.58인 세척사를 사용하였다.

배합에 사용한 혼화제는 콘크리트 종류별로 사용량이 다르고 AE감수제는 리그닌설폰산염계, 고유동화제는 나프탈렌설폰산계, 고성능 AE감수제는 포르말린축합물, 수중불분리성 콘크리트에 첨가한 수중불분리성 혼화제는 셀룰로오스계인 HPMC(Hydroxypropyl Methyl Cellulose)를 사용하였다.

또한 시멘트량 저감을 위한 방법의 일환으로 플라이애쉬와 고로슬래그미분말 및 석분을 콘크리트 종류의 일부에 첨가하여 굳지않은 콘크리트 및 경화한 콘크리트의 성질에 미치는 영향과 그 성능을 확인 하였다.

2.2 실험변수 및 콘크리트 종류별 배합비

콘크리트 종류별 최적배합을 도출하기 위하여, 본 실험에서는 단위시멘트량을 주요 변수로 설정하였으며, 단위시멘트량의 저감율은 콘크리트 종류에 따라 작업성을 확보하고 소요의 강도를 발현할 수 있는 배합비로서 시험배합을 수 회 걸쳐서 각 단계별로 단위시멘트량을 10kg/m³씩 3~5 단계로 저감하여 배합비를 설정하였고, 다만, 수중불분리성 콘크리트는 잔골재율을 주요 변수로 하였고 빈배합(lean) 콘크리트는 고로슬래그미분말의 첨가량에 따른 콘크리트 특성을 고찰하였다. 콘크리트 종류별 기준배합비는 표 1과 같고, 콘크리트 종류는 한국도로공사에서 고속도로 공사 목적에 알맞게 분류한 것이다.

표 1 콘크리트 배합표

종별	설계 기준 강도 (kg/cm ²)	골재 최대 치수 (mm)	W (kg)	C (kg)	W/c (%)	S/a (%)	S (kg)	G (kg)	Fly ash (kg)	AE 감수제 (C×%)	유동 화제 (C×%)	고강도 AE 감수제 (C×%)	수중불 분리성 혼화제 (%)	비고
고 강 도	450	13	191	490 (555)	39	42	659	934	-	0.15	0.23	-	-	PSM
		19	162	540 (540)	30	41	647	934	-	-	0.70	1.00	-	FCM
	400	19	184	510 (520)	36	41	657	946	-	0.20	0.25	-	-	
		19	172	393 (437)	35	42	668	927	98	-	-	1.50	-	Fly-ash 20% 대체
1종	270	25	185	403 (392)	46	45	760	929	-	0.15	-	-	-	
			170	370 (361)	46	44	769	991	-	0.12	0.25	-	-	
2종	240	25	180	346 (346)	52	44	767	987	-	0.20	-	-	-	
			210	240	420 (409)	50	37	603	1043	-	-	0.22	-	-
3종	210	25	182	331 (321)	55	43	788	1056	-	-	-	-	-	
			177	321 (327)	55	43	750	1006	-	0.15	-	-	-	-
중분대 (난간)	240	19	165	337 (345)	49	48	846	931	-	0.15	-	-	-	
			160	278 (276)	46	47	822	941	70	-	0.20	-	-	Fly-ash 20% 대체
L축구 다이크	210	19	162	331 (331)	49	48	852	926	-	0.30	-	-	-	
			149	232 (232)	45	47	838	949	99	0.30	-	-	-	Fly-ash 30% 대체
			160	320 (320)	50	48	730	975	-	0.30	-	-	-	석분 잔골재 15% 대체
빈배합	$\sigma_7=50$	40	70	157 (158)	-	41	930	1234	-	-	-	-	슬래그미분말 0, 30, 40% 대체	

* 표에서 () 밖의 단위시멘트량은 본 연구에 사용한 최대단위시멘트량, ()안은 기준배합비의 단위시멘트량

3. 결과 및 고찰

3.1 경화한 콘크리트의 압축강도 특성

3.1.1 고강도콘크리트

첫째, PSM(Precast Segmental Method)용 고강도콘크리트에서의 강도시험 결과는 그림 1과 같다. 재령 7일에서의 이 콘크리트는 설계기준 강도의 75%정도의 강도발현이 되었으며, 본 배합에 의한 단위시멘트량(450~490kg)이 증가함에 따라 강도는 비례적으로 증가하지는 않았다. 재령 28일에서의 강도는 설계기준 강도의 15%이상이 발현되었다. 따라서 본 배합으로 강도성능을 시험한 결과 강도불량

울을 고려하더라도 기존 배합비의 단위시멘트량을 20%정도, 혼화제량을 50%정도 줄인 배합비가 필요할 것으로 판단된다. 또한 단위시멘트량을 저감하여 경제적 측면의 이점도 있겠으나 고강도콘크리트에서의 많은 시멘트량으로 인해 발생할 수 있는 수화열, 건조수축, 균열을 적정 수준이하로 억제시킬 수 있을 것이다.

둘째, FCM(Free Cantilever Method)용 고강도콘크리트로 3일 재령에서의 강도가 320kg/cm²를 목표로 한 콘크리트이다. 그림 2와 같이 재령 3일에서의 시멘트량(483~523kg/m³)에 따른 강도발현은 단위시멘트량 493, 483kg 에서는 목표강도에 미치지 못하였고, 전반적으로 강도발현이 저조한 것으로 나타났다. 따라서 적정 단위시멘트량은 기준강도 이하의 불량율과 제반여건을 고려하여 본 배합에 의해 523kg 이면 문제가 없을 것으로 여겨지며, 재령 7일에서의 강도는 모든 배합에서 재령 28일 설계기준 강도 보다 10% 이상의 발현율을 보였다. 재령 28일에서의 결과는 설계기준 강도에 비해 단위시멘트량(483kg)이 가장 작은 배합비에서 30%, 단위시멘트량(523kg)이 가장 많은 배합비에서 약 40% 정도의 강도 증진을 보였다. 상기의 시험값을 바탕으로 조기에 긴장재의 인장에 필요한 소요강도를 발현하기 위해서는 단위시멘트량을 줄이는 대신 초기 강도를 발현할 수 있는 시멘트를 사용하고 수화열을 저감할 수 있는 방안을 모색하는 것이 바람직하다고 여겨진다.

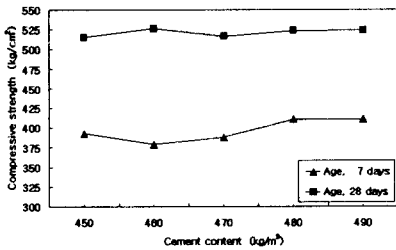


그림 1 PSM용 고강도콘크리트($\sigma_{ck} = 450\text{kg/cm}^2$)

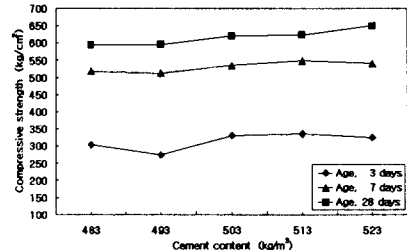


그림 2 FCM용 고강도콘크리트($\sigma_{ck} = 450\text{kg/cm}^2$)

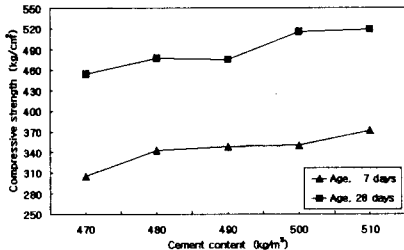


그림 3 고강도콘크리트($\sigma_{ck} = 400\text{kg/cm}^2$)

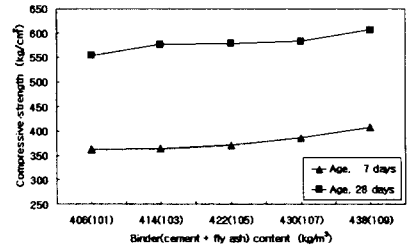


그림 4 고강도콘크리트($\sigma_{ck} = 400\text{kg/cm}^2$)

셋째, 그림 3에서 볼 수 있듯이 재령 7일에서의 압축강도는 시멘트량이 감소함에 따라 감소하였고, 재령 28일에서의 강도발현 경향도 단위시멘트량(470kg~510kg)이 증가함에 따라 증가하였다. 그리고 설계기준강도 보다 약 10~20%나 큰 것으로 나타났다. 따라서 본 배합으로 만들어진 콘크리트의 강도 일면의 성능분석에 의거하여 기존의 표준배합비는 단위시멘트량 약 10%, 혼화제량을 20~30% 정도 줄여야 할 것으로 판단된다.

넷째, 플라이애쉬 20%를 첨가한 콘크리트에서의 강도시험 결과는 그림 4와 같다. 7일 재령의 결과는 단위결합재량이 증가함에 따라 강도가 증가하였다. 그리고 단위결합재량이 가장 많은 배합비에서는 재령 28일의 설계기준강도와 유사한 강도 발현이 나타났다. 재령 28일에서의 결과도 단위결합재량이 증가함에 따라 강도 역시 증가하는 추세를 보였다. 그리고 설계기준 강도보다 작게는 35%에서 크게는 50%를 초과하는 것으로 나타났다. 결과적으로 혼화제량은 적정량으로 판단되고 기존 배합비의 단위결합재량은 대폭적으로 줄이는 배합비의 조정이 필요할 것으로 여겨진다.

3.1.2 1종 콘크리트

먼저 표준배합비의 단위시멘트량이 392kg, 슬럼프 13cm, AE감수제만을 첨가한 그림 5의 1종 콘크리트를 살펴보면, 단위시멘트량 403kg~363kg으로 5단계 모두 설계기준 강도에는 만족하였고, 시멘트

량 감소 단계마다 5~10% 정도의 강도저하 현상을 나타냈다. 그러나 단위시멘트량이 403kg 보다 적게 첨가된 393kg의 콘크리트가 강도가 높게 나타났다. 따라서 기존 배합비의 단위시멘트량을 5%가량, 혼화제량을 30% 정도 감하여도 소요의 강도발현에는 문제가 없을 것으로 사료된다.

슬럼프가 15cm이고 AE감수제와 유동화제를 첨가한 콘크리트인 그림 6의 1종 콘크리트를 살펴보면, 재령 7일에서 설계기준 강도의 80%가 발현됨을 알 수 있었다. 그리고 가장 낮은 시멘트량을 첨가한 배합비에서도 설계기준 강도(270kg/cm²)를 상회하는 것을 볼 수 있다. 결과적으로 기존 배합비의 단위시멘트량이 다소 많이 사용된 것을 알 수 있다. 또한 AE감수제량도 20% 정도 감하여도 콘크리트의 소요성능 발현에는 지장을 초래하지 않을 것으로 판단되며 유동화제량은 적정량으로 설정되었다고 생각된다.

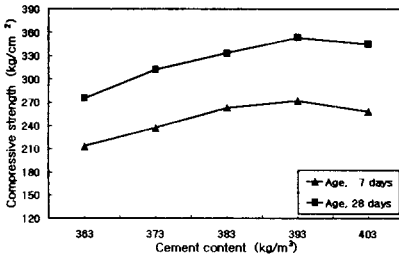


그림 5 1종 콘크리트(σ_{ck} = 270kg/cm²)

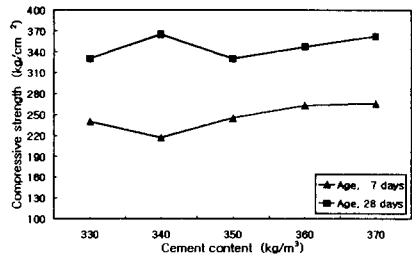


그림 6 1종 콘크리트(σ_{ck} = 270kg/cm²)

3.1.3 2종 콘크리트

그림 7에서 볼 수 있듯이 설계기준 강도 240kg/cm²에는 최대한으로 줄일 수 있는 단위시멘트량은 326kg으로 나타났으며, 이것은 기존 배합비의 단위시멘트량 346kg과 유사하다. 그러나 AE감수제량은 다소 줄여도 될 것으로 생각된다.

그림 8에서 수중불분리성 콘크리트의 수중타설시 재령 7일 강도성상을 살펴보면, 우리나라의 규준에서 뿐만 아니라 일본의 토목학회 기준에도 모두 만족하였고 잔골재율이 37%에서 46%까지 증가하는 경향을 띠고 있다. 반면 28일 재령에서의 압축강도 발현은 40%의 잔골재율에서 최대값을 나타내고 그 이상의 잔골재율 증가에 따라 압축강도가 감소하는 추세를 보이고 있다. 이러한 경향은 기중타설시에도 유사한 것으로 나타났다. 그러나 수중/기중강도비는 4가지 잔골재율 모두에서 90% 이상을 나타냈다.

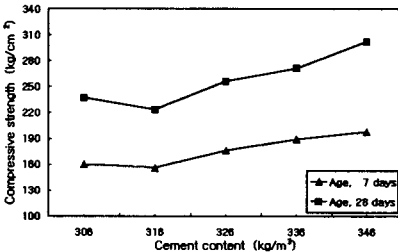


그림 7 2종 콘크리트(σ_{ck} = 240kg/cm²)

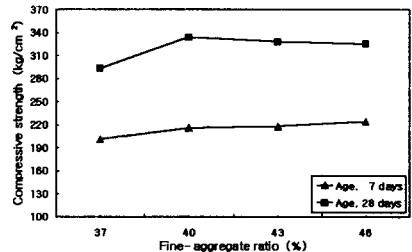


그림 8 수중불분리성 콘크리트(σ_{ck} = 240kg/cm²)

3.1.4 3종 콘크리트

설계기준 강도가 210kg/cm², 슬럼프가 8cm인 그림 9의 결과를 살펴보면, 대체적으로 물-시멘트비가 높아짐에 따라 콘크리트 강도가 감소하는 경향을 띠고 있으나, 물-시멘트비 55%에서 보다 물-시멘트비 56%에서의 강도가 다소 높은 것으로 나타났다. 설계기준 강도 측면으로 볼 때 4가지 배합 모두 기준치 보다 30~40% 정도의 높은 강도발현을 나타내었다. 강도 편차 및 기준강도 이하의 불량율과 안전율을 고려하더라도 단위시멘트량을 감소시키는 것이 바람직하다고 사료된다.

설계기준 강도가 210kg/cm², 기준 단위시멘트량이 327kg, 슬럼프가 15cm인 그림 10의 결과, 재령 7일에서의 강도발현은 재령 28일에서의 강도발현과 유사하게 단위시멘트량의 증가함께 따라 비례적으로 증가하였다. 그리고 3가지 배합 모두 설계기준 강도에는 만족하였고, 할증계수를 곱한 강도 기준에도 적절한 것으로 나타났다. 본 배합과 기존의 표준배합비를 비교하면 단위시멘트량에는 큰 차이가 없으나 혼화제량을 약 30% 정도를 줄이는 것이 타당하다고 판단된다.

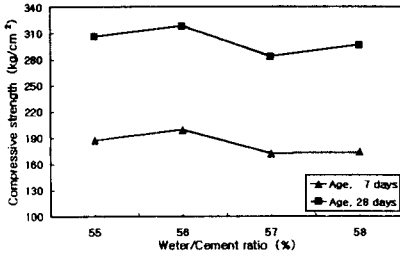


그림 9 3종 콘크리트($\sigma_{ck} = 210\text{kg/cm}^2$)

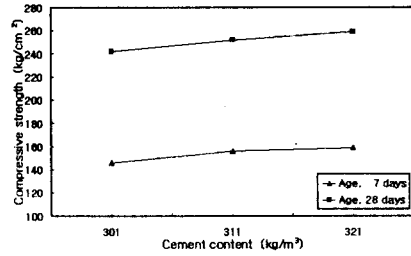


그림 10 3종 콘크리트($\sigma_{ck} = 210\text{kg/cm}^2$)

3.1.5 중분대용 콘크리트

그림 11에서 우선 재령 7일의 강도성상은 가장 낮은 시멘트량에서도 설계기준 강도와 거의 비슷하게 나타났다. 28일 재령의 결과는 단위시멘트량이 증가함에 따라 강도 또한 증가하는 현상을 나타냈다. 또한 재령 28일의 설계기준 강도에 작게는 40%에서 크게는 65%정도까지 높은 강도를 보였다. 그리고 본 배합시험에 의하면 단위시멘트량 327kg을 넘어서는 강도발현이 그다지 크지 않았다. 그러므로 시험오차와 시공오류, 현장여건을 감안하더라도 기존 배합비의 단위시멘트량(345kg)은 최소한 15%가량 낮추어도 콘크리트 품질에는 악영향이 없을 것으로 여겨진다.

그림 12의 초기재령 7일에서의 강도성상은 플라이애쉬를 첨가하지 않은 그림 11의 콘크리트 보다 강도발현이 다소 저조하였으나, 28일 설계기준 강도의 90%까지 육박하고 있는 것으로 나타났다. 재령 28일의 결과는 설계기준 강도 보다 상당히 높게 나타났다. 그 증가폭은 30~60% 정도이다. 따라서 소요의 강도를 발현하는데 필요한 결합재량은 기존의 표준 배합비의 15%정도 하향 조정하여도 콘크리트의 강도측면에서는 제 기능을 충분히 수행할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 현장에서 콘크리트 타설시 작업성 및 시공성을 고려하여 플라이애쉬를 첨가할 경우에는 AE감수제량을 상향조정해야 할 것으로 판단되며, 더불어 플라이애쉬의 첨가율을 다양하게 변화시켜 가면서 그에 따른 적정 배합비 도출이 필요할 것이다.

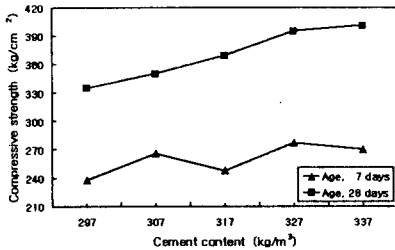


그림 11 중분대용 콘크리트($\sigma_{ck} = 240\text{kg/cm}^2$)

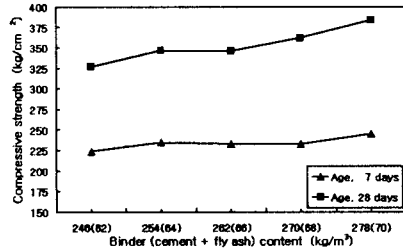


그림 12 중분대용 콘크리트($\sigma_{ck} = 240\text{kg/cm}^2$)

3.1.6 L층구, 다이크용 콘크리트

본 시험에서는 플라이애쉬를 첨가하지 않은 것과 시멘트량을 줄이고 대체 혼화재료인 플라이애쉬를 일부 첨가한 것과 잔골재의 일부를 석분으로 대체한 것 등의 3가지 종류로 강도발현 특성을 고찰하였다.

그림 13의 ①에서 볼 수 있듯이 5가지의 모든 배합에서 재령 7일의 강도발현율은 설계기준 강도보다 크게 나온 것으로 나타났다. 재령 28일 강도성상을 고찰하면, 재령 7일에서의 경향과 유사하게 단위시멘트량이 증가함에 따라 비례적으로 증가하지는 않았다. 표준배합비의 단위시멘트량은 20~30%가량을 감소하는 것이 필요하겠고 혼화제량은 적절한 것으로 판단된다.

플라이애쉬를 시멘트량의 30%를 대체한 콘크리트는 그림 13의 ②에서 볼 수 있듯이 그림 ①의 동종의 보통콘크리트에 비해 초기재령에서의 강도가 다소 낮게 발현되었다. 그림 ②의 결과를 종합하면, 그림 13의 ①배합 콘크리트에 비해 물-시멘트비가 낮고 단위시멘트량이 동일함에도 불구하고 강도발현이 작은 것은 여러 가지 원인이 있겠으나 주된 원인은 플라이애쉬량이 과다하게 첨가된 것으로 보여진다. 또한 설계기준 강도보다 소요의 강도발현이 크게 나와 표준 배합비의 단위결합재량을 줄이는 것이 타당하다고 판단된다.

그림 13의 ③은 골재를 분쇄한 후 스크리닝하여 얻어낸 석분을 잔골재의 15%를 대체하여 단위시멘트량 278~318kg/m³를 5단계로 감소하여 시험한 결과이다. 재령 7일의 강도결과는 설계기준 강도보다 30%~45%나 높은 것을 볼 수 있다. 재령 28일의 강도성상은 재령 7일의 경우와 유사하게 단위시멘트량

이 298kg인 콘크리트에서 최대값을 나타냈고, 설계기준 강도의 60~90% 까지 높게 나타났다. 그러나 대체적으로 미립분이 많아지므로 적당한 워커빌리티를 얻기 위해서는 단위수량을 증가시켜야하나 AE 감수제의 사용량을 다소 높이는 것이 필요하겠다. 그리고 표준배합비의 단위시멘트량은 추가 시험을 거친 후 조정되어야하나 단순히 본 시험에 의해서는 20% 정도를 줄이는 것이 바람직하다고 여겨진다.

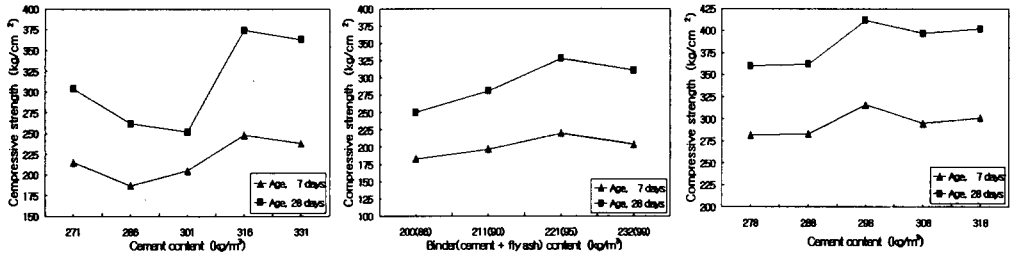


그림 4.13 L측구, 다이크용 콘크리트($\sigma_{ck} = 210\text{kg}/\text{cm}^2$) ① ② ③

3.1.7 빈배합(lean) 콘크리트

빈배합 콘크리트는 재령 7일 강도가 $50\text{kg}/\text{cm}^2$ 인 콘크리트이다. 시험은 보통 빈배합 콘크리트와 고로슬래그미분말을 30%, 40%의 양을 시멘트 대체재로 콘크리트 성능비교를 하였다.

그림 14의 결과에서처럼 고로슬래그미분말을 첨가하지 않은 콘크리트에서는 재령 7일에서 초기강도가 고로슬래그미분말을 30% 첨가한 콘크리트보다 15%정도, 40%를 첨가한 콘크리트보다는 무려 38%정도나 높은 강도발현을 나타냈다. 그러나 28일 재령에서의 결과는 고로슬래그미분말 30%를 치환한 콘크리트에서 오히려 다소 높은 강도성상을 나타냈으나 40%를 대체한 콘크리트에서는 재령 91일 강도에서조차 강도발현이 가장 낮고 저조한 것으로 나타났다. 본 배합에 의해 상기의 결과를 종합하면 단위시멘트량을 감소시킬 수 있을 것이라 판단되고, 또한 단위시멘트량 저감의 일면으로 고로슬래그미분말의 사용을 적극적으로 활용해야 할 것이고, 그 치환율은 30%정도가 적절할 것으로 사료된다.

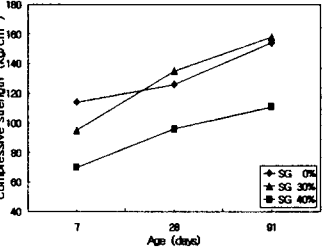


그림 14 빈배합(Lean) 콘크리트

4. 결론

시멘트 콘크리트로 축조된 구조물에서 소요의 요구조건을 충족시키기 위해 최적배합을 선정 할 목적으로 1차년도에 수행한 강도시험과 작업성시험만을 고찰한 결과는 다음과 같다. 2차년도의 내구성에 관한 실험과 각종 콘크리트의 최적배합(혼화재료 사용 및 실험변수 추가)에 관한 연구 및 보충실험이 수행되어야 최종적으로 현장에서 최적배합을 도출할 수 있다. 그러므로 본 결론은 최종 결론이 아님을 밝힌다.

본 연구에서 시험한 굳지않은 콘크리트의 물성시험 결과는 소요의 기준에 만족하였다. 또한 콘크리트 종류별로 단위시멘트의 감소량은 차이가 있으나 모든 콘크리트에서 단위시멘트량을 줄였음에도 불구하고 설계기준 강도 보다 높은 압축강도가 발현 되었다. 그러므로 기존의 고속도로 시멘트 콘크리트 표준 배합비의 단위시멘트량이 높게 산정되었음을 알 수 있었다.

따라서 단위시멘트량과 혼화제량은 강도와 내구성과 같은 콘크리트의 요구특성을 손실하지 않는 범위 내에서 가능한 하향 조정하는 것이 바람직하다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. P. Paulini, "Reaction Mechanism of Concrete Admixtures", Cement and Concrete Research, Vol. 20, pp. 910~918, 1990.
2. P. Kumar Mehta., & Paulo J. M. Monteiro., "Concrete -Structure, Properties, and Materials-", Prentice-Hall, INC. Englewood Cliffs, New Jersey 07623, 1993.
3. 한국도로공사, "건설공사 품질시험 편람", 한국도로공사, pp. 80~112, 1998.
4. 한국콘크리트학회, "최신 콘크리트 공학", 기문당, pp. 407~411, 1992.