

롤러다짐 댐 콘크리트의 효율적인 배합비 도출에 관한 연구

Mix Proportions of Concrete for Roller Compacted Concrete Dam Application

원 종 필* · 윤 종 환** · 김 완 영***

Won, Jong Pil · Yoon, Jong Hwan · Kim, Wan Young

Abstract

Roller-compacted concrete(RCC) dam have gained acceptance worldwide in a relatively short time due to their low cost, which is derived in part from their rapid method of construction. And RCC has recently emerged as an economically attractive material for dam construction, replacing the use of conventional concrete and even challenging the economics of earthfill and rockfill embankment dams. There are existing two major mix design methods, one used in USA and the other used in Japan. In this study, proper mix proportions of concrete for RCC dam is obtained using method of compound their merit.

Keywords : Mix proportion, Roller compacted concrete Dam.

I. 서 론

1950년 이래 세계적으로 15 m 이상으로 건설된 댐의 38%가 콘크리트 재료로 건설되었다. 그러나 흙댐(earth dam) 및 사력댐(rockfill dam)과 같은 제방형 댐의 등장으로 1982년 16.5% 까지 감소하였다.^{5),7)} 콘크리트 중력댐과 비교할 때 흙댐 및 사

력댐은 경제적이면서 장비 사용의 효율성 때문에 그 시공이 더욱 증가하였다.^{5),7)} 콘크리트 중력댐의 이용이 감소하고, 흙댐과 사력댐의 사용이 증가하면서 새로운 문제점이 등장하였는데, 경제적 비용은 감소하였지만 안정성의 결여로 댐 붕괴 및 시공의 실패가 증가하였다.⁵⁾ 실제로 1920년대 이후 건설된 댐의 자료를 살펴보면 1950년 대 이후 다양한 크기의 많은 제방형 댐들이 월류에 의한 상층부 파괴와 충전재료의 내부 침식으로 무너졌다.^{3),5)} 반면에 같은 기간의 콘크리트 댐들을 살펴보면 안정성에서 큰 문제를 야기하지 않았다.¹¹⁾ 이로 인해 흙댐 및 사력댐과 같은 제방형 댐에서 사용재료에 따른 댐 체체의 안정성 문제와 콘크리트 댐의 경제

* 건국대학교 지역건설환경공학과
** 건국대학교 대학원
*** 한국수자원공사 수자원연구원
* Corresponding author. Tel.: +82-2-450-3750
Fax: +82-2-2201-0907
E-mail address: jpwon@konkuk.ac.kr

성 한계로 많은 연구자들이 콘크리트 댐과 제방형 댐의 장점을 살리고 서로의 단점을 보완할 수 있는 새로운 댐 건설 방식을 연구하였고 1960년대 초부터 1970년대에 걸쳐 RCC 댐(Roller Compacted Concrete Dam)을 발전 시켰다.^{4),11)}

RCC 댐 공법에 사용되는 콘크리트인 RCC는 극도로 된 반죽이며 단위시멘트량이 매우 적은 빈배합이다. 따라서 건조수축, 크리프 등 부피변화가 적어 물성 면에서 유리하고, 댐과 같은 거대한 단면의 시공시 수화열의 감소에도 큰 장점을 가지고 있다. 배합의 특성을 규명하는 측정 방법들 역시 기존 콘크리트 중력댐에서 사용되고 있는 매스콘크리트와 많이 다르다. 예를 들어 기존의 콘크리트에서는 워커빌리티 측정을 위해 슬럼프 시험이 적용되는데 매우 건조한 무슬럼프의 RCC는 슬럼프시험의 적용은 불가능하며, 이러한 경우는 비비시험이 컨시스턴스 및 워커빌리티 측정을 위해 적용된다.

RCC 댐은 시공방법의 발전과 함께 RCC의 배합 설계에 대한 많은 연구가 진행되었는데 대표적으로 사용되는 방법으로 미국과 일본의 방법을 들 수 있다. 미국의 경우는 그래프와 수식들을 이용한 방법을 통해 배합설계를 실시하고 있으며, 일본의 경우는 댐 현장의 특수한 지질 및 지형 조건을 고려해 시공현장에 맞게 반복 실험을 하여 배합을 결정하고 있다.^{8),9)} 미국에서 사용되는 방법은 미국 공병대에서 정립된 방법으로, 배합의 기본량에 대한 다양한 표와 그래프를 만들어 배합설계에 직접 적용하는 형식이다. 이 방법은 매우 신속하고 간편한 장점을 가지고 있지만 사용되는 재료의 특성이나 현장 특성의 반영이 결여되는 단점을 지닌다. 일본의 방법은 지진에 취약한 지질 조건을 감안하여 배합설계에 사용되는 재료와 기후 조건에 맞게 계속되는 반복 실험을 통해 배합을 결정한다. 이 방법은 배합이 결정된 후 현장에서의 시공성과 적용성은 뛰어나지만 무수한 반복 실험으로 인해 너무 시간이 오래 걸리는 단점을 가지고 있으며, 초기 실험을 위한 기본 범위를 결정하는데 있어 적절한 기

준이 정해져 있지 않아 더욱 많은 실험과 시간을 요구한다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 적용되는 RCC 댐의 배합 설계를 위해 상용되고 있는 두 가지 방법을 기초로 하여 그 장점을 조합한 효과적인 방법을 제시하고, 이에 따른 적정 배합비를 도출하려 한다.

II. 배합조건 및 사용재료

1. 배합조건

본 연구에 적용되는 RCC 댐의 목표 배합 조건은 Table 1과 같다. 배합 조건은 RCC 댐 구조물의 건설에 가장 일반적으로 사용되고 있다.

Table 1 Target mixture property

f_{ck} (MPa)	G_{max} (mm)	slump (cm)	Vc (s)*	Air (%)
11.77	80	0	20 ± 10	1.5±1

* Vc : Vibrating compaction value

2. 시멘트

댐과 같이 큰 단면을 갖는 구조물은 수화열을 최소화하는 것은 매우 중요하다. 따라서 1종 보통 포틀랜드 시멘트보다는 2종이나 4종 시멘트가 선호되고 있는데 최근에 세계적으로 RCC 댐 구조물에 가장 많이 적용되고 있는 시멘트는 2종인 중용열 포틀랜드 시멘트이다.^{6),8)} 따라서 본 연구는 국내에서 생산되는 S사의 중용열 포틀랜드 시멘트를 사용했으며, 그 화학성분 및 조성광물은 Table 2 및 Table 3과 같다.

Table 2 Chemical compositions of cement

(Unit : %)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	lg. loss
23.3	3.9	3.6	62.4	2.9	0.11	0.82	1.9	1.0

Table 3 Mineral component of cement
(Unit : %)

C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF	C ₄ S+C ₃ A
42	37	6	12	48

3. 골재

굵은 골재는 최대치수 80 mm의 부순 골재가 사용되었으며 잔골재도 같은 종류의 골재가 사용되었

Table 4 Grade distribution of coarse aggregate

Max. size of aggregate (mm)	Size of sieve (mm)	Percent (%)		
		80	40	20
80		37	32	31

Table 5 Physical properties of fine and coarse aggregate

Type of experiment	Coarse aggregate	Fine aggregate
Stability (%)	5.5	5.0
Specific gravity (SSD)	2.51	2.54
Rate of absorption (%)	0.87	0.98
Clay mass (%)	0.01	0.2
Rate of passing 0.08mm sieve (%)	0.1	1.1
Rate of abrasion (%)	28.2	-
Unit weight (kg/m ³)	1418	1618
Chloride (%)	-	0.01
F.M	7.4	2.92

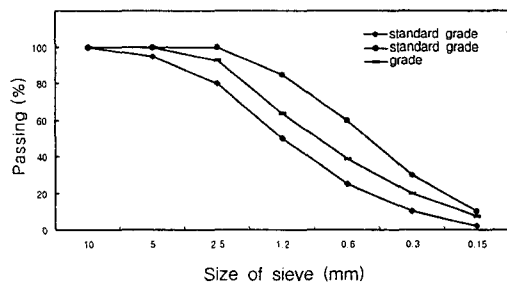


Fig. 1 Grading curve of fine aggregate

다. 본 연구에 사용된 굵은 골재와 잔골재의 입도는 Table 4와 Fig. 1에 나타내었고, 물리적 특성은 Table 5와 같다.

4. 혼화제

RCC는 빈배합이기 때문에 시공성을 높이고 초기 작업성을 확보하기 위해 감수제 또는 고유동화제가 사용되고 있다.^{8),9)} 본 연구에는 소량의 나프탈렌계 고유동화제를 사용하였다.

III. 배합설계

1. 배합설계 방법

가. 미국 공병대 방법

미국에서 댐 적용을 위한 RCC에 대한 연구는 1970년대 초반부터 공병대에서 활발히 연구가 진행되어 왔는데, 공병대에서는 초기 단계부터 누적된 연구 결과들을 표와 그래프로 정리하여 배합 설계에 사용하였다.⁸⁾ 미 공병대의 배합 설계 방식을 Fig. 2에 간략히 나타내었다. 이 방법의 특징은 오랜 연구 결과를 기본으로 많은 부분이 도식화되어 있는데 단위수량, 잔골재율 및 단위시멘트량은 표와 그래프를 이용해 결정한 후 잔여 재료의 절대용

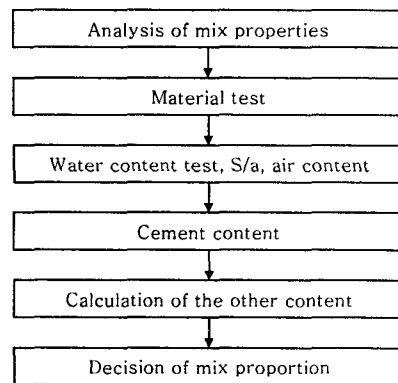


Fig. 2 Mixt design method of US Army Corps of Engineers⁸⁾

적을 산출하는 방식이다. 배합설계에 있어 매우 빠르고 편리한 장점이 있지만, 주재료인 시멘트를 포함한 골재 종류에 따른 재료적 특성과 지형, 기후 조건 차이의 반영이 힘들기 때문에 이를 국내에서 그대로 적용하기는 어려움이 있다.

나. 일본 방법

1970년대 후반 RCC 댐 공법을 도입한 일본은 정부의 주도로 일본 실정에 맞게 이를 발전 시켜왔고, 자체적인 새로운 시공 형식을 통해 이를 RCD (Roller Compacted Dam)라 명하였다.⁶⁾ 잣은 지진으로 주로 댐 내부는 RCC로 내부 코어를 만든 후 외부를 높은 강도의 일반 매스콘크리트로 마무리하는 시공형식을 갖는다.⁶⁾ Fig. 3은 일본에서 주로 사용되고 있는 RCC의 배합설계 방법을 나타내었다. 지역별로 지질 조건이 큰 차이가 나는 현장 조건을 고려해 시공 재료와 여러 가지 조건에 맞추어 여러 차례 반복 실험을 통해 배합을 결정하였다. 본 방법은 적용성과 시공측면에서 유리한 반면, 실험 초기 재료량의 범위를 산정 하는데 있어 과거 경험적인 수치를 가지고 반복실험을 통해서 결정하고 있어 배합을 도출하는데 시간이 오래 걸리는 단점이 있다.

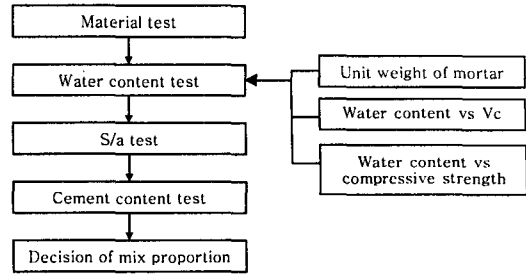


Fig. 3 Mix design method of Japan

2. 배합설계의 제안

본 연구는 위의 두 방법을 혼용해 주요 변수의 초기 범위 산정은 미국 공병대의 방법에 따라 결정함으로써 초기 범위 산정을 위해 실행해야 하는 반복 실험을 줄임으로서 일본에서 사용되고 있는 배합설계 방식의 단점을 최소화 하였다. 이렇게 결정된 초기 범위를 기준으로 정확한 배합비를 도출하기 위한 반복 실험을 일본에서 사용되고 있는 시험 방법에 따라 실시함으로써 사용되는 재료의 특성을 살리고 현장 조건을 고려할 수 있는 배합설계를 실시하였다. 이를 통하여 비교적 빠른 시간내에 재료와 현장특성이 반영된 배합비를 도출할 수 있었다. Fig. 4는 본 연구에서 사용된 배합 설계 순서이다.

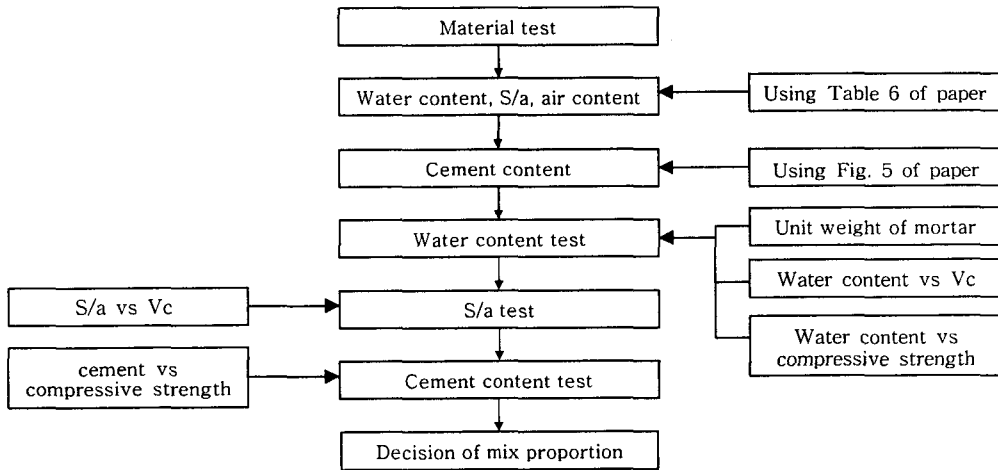


Fig. 4 Proposed mix design method in this study

Table 6 Water content, sand content for various nominal size aggregates

Contents	Nominal maximum size of aggregate					
	19.0mm		50mm		75mm	
	Average	Range	Average	Range	Average	Range
Water content, kg/m ³						
a) Vebe < 30 s	150	133-181	122	107-140	107	85-128
b) Vebe > 30 s	134	110-154	119	104-125	100	97-112
Sand content, % of total						
a) crushed aggregate	55	49-59	43	32-49	34	29-35
b) rounded aggregate	43	38-45	41	35-45	31	27-34

가. 단위수량 및 잔골재율

Table 6은 미국 공병대에서 배합설계를 실시하는 기본 자료로 이 표를 통해 단위수량 및 잔골재율을 결정한다.⁸⁾ Table 6에서와 같이 굵은골재 최대치수와 Vc값에 따라 단위수량의 범위를 산정하고 굵은골재 최대치수와 골재 종류에 따른 잔골재율을 결정한다. 본 연구에서 목표로 하는 배합조건과 재료 조건에 따라 1차적으로 초기 단위수량의 범위를 97~112 kg/m³으로, 잔골재율을 29~35%로 결정하였다.

나. 단위 시멘트량

Fig. 5는 미국 공병대에서 사용되는 방법으로 요구되는 재령의 강도에 따른 필요 단위 시멘트량을 나타내는 그래프이다.⁸⁾ 본 연구에는 배합 조건인 91일 재령 압축강도 120 kg/cm²에 맞추어 100~120 kg/m³의 시멘트량의 범위를 결정하였다.

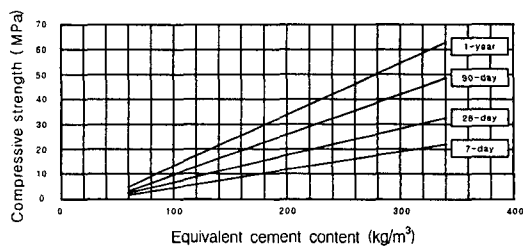


Fig. 5 Equivalent cement content versus compressive strength⁸⁾

결정된 단위수량과 단위 시멘트량을 기준으로 잔여 배합 재료량을 산정하였고 이를 배합 결정을 위한 기본 범위로 활용하였다.

다. 단위수량 시험

1) 모르타르 단위수량 결정

본 실험은 모르타르 배합에서 단위 용적 중량이 가장 크면서 공극률이 가장 적은 단위수량을 찾아 콘크리트 단위수량으로 환산하여 대략적인 단위수량의 범위를 결정하는 방법이다. 앞서 결정된 1차 단위수량의 범위를 보완하기 위한 실험으로 실험결과(Table 7) 85 kg/m³ 정도의 단위수량이 계산되었다. 기존에 진행되었던 실제 공사의 경험에 따르면 시공성이 좋은 단위수량은 계산된 콘크리트 환산 단위수량보다 약 5~15% 정도 증가시킨 것으로 평가되고 있다. 이를 근거로 본 연구에서는 85 kg/m³ 보다 증가시킨 89~98 kg/m³으로 2차 초기 단위 수량을 결정 하였다. Table 6에서 결정된 1차 단위 수량 97~112 kg/m³과 결정된 2차 수량 85 kg/m³을 모두 포함한 범위로 단위 수량 시험을 실시하였다.

Table 7 Test result of unit water content

Unit water content of mortar (kg/m ³)	Unit water content of concrete (kg/m ³)	Premium apply (kg/m ³)
225	85	89-98

Table 8 Water content versus Vc test result

Water content (kg/m ³)	Vc (s)					Mean
	1	2	3	4	5	
80	35	30	33	32	31	32
90	21	25	23	20	22	22
100	22	20	23	21	20	21
110	15	18	17	17	18	17

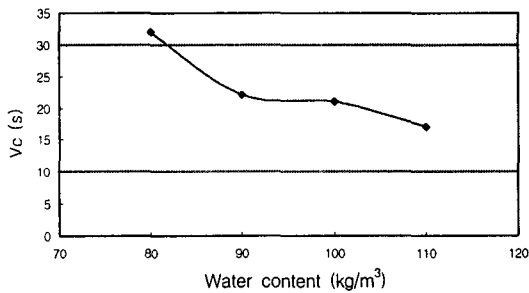


Fig. 6 Water content versus Vc

2) 단위수량과 비비시간의 관계

단위수량과 비비시간의 관계를 통한 단위수량의 산정은 콘크리트 중의 단위수량을 변화시키면서 비비시간을 측정해 시공성이 좋은 단위수량을 찾는 방법으로서 ASTM C 1170-91 과 CRD C 53-01을 따랐다.^{2),10)} 실험은 Table 6과 Table 7을 모두 포함하는 범위로 실시하였다. 실험결과는 5회 반복 실험 결과의 평균값으로 Fig. 6에 나타내었으며 각 반복에 대한 실험값을 Table 8에 나타내었다. 결과를 살펴보면 80~110 kg/m³까지의 단위수량 범위 대부분이 20±10초의 배합조건을 만족하지만 이 중 90~100 kg/m³ 정도의 단위수량이 적당할 것으로 판단된다.

라. 잔골재율 결정

다양한 범위의 잔골재율을 적용하여 각각의 컨시스턴시의 변화를 측정해 배합 조건에 맞는 잔골재율을 결정하는 방법으로 특정 배합 조건이 결정되지 않은 경우는 가장 좋은 컨시스턴시를 갖는 배합

Table 9 Fine aggregate content(S/a) versus Vc test result

S/a (%)	Vc (s)					Mean
	1	2	3	4	5	
25	36	39	38	36	35	37
30	27	27	29	28	28	28
35	19	21	22	21	22	21
40	19	17	15	15	17	17

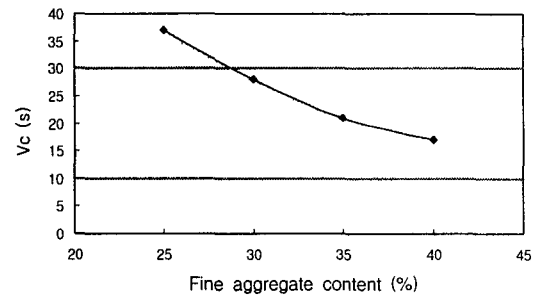


Fig. 7 Fine aggregate versus Vc

을 결정하게 되지만 본 연구에서는 결정된 배합 조건을 만족시키는 잔골재율을 찾는 것이 목적이다. 잔골재율 시험에서 적용된 단위수량은 앞서 결정된 범위의 중간 값인 95 kg/m³를 적용하였다. 실험은 각 변수에 따라 5회 반복 실시한 것이며 각각의 값은 Table 9에 그 평균값은 Fig. 7에 나타내었다. 실험 결과 20±10초의 배합 조건을 만족하는 값들 중 35% 전·후의 값이 적절할 것으로 판단된다.

마. 단위 시멘트량 결정

단위 시멘트량을 결정하기 위한 실험으로 미국 공병대에서 제시된 그래프에서 정해진 값을 기준으로 다양한 범위의 시멘트량을 적용하여 필요한 단위 시멘트량을 결정하였다.⁸⁾ 압축용 공시체의 제작은 ASTM C 1176-92를 따랐으며 압축강도의 측정은 KS F 2405에 준하여 실시하였다. 실험은 2회 반복 실시하였으며 각각의 실험값은 Table 10에 실험결과와 평균값은 Fig. 8에 나타내었다. 실험결과 요구되는 압축강도를 나타내는 단위 시멘트

Table 10 Cement content versus compressive strength test result

Cement content (kg/m ³)	Compressive strength (MPa)						Mean
	Batch 1			Batch 2			
	1	2	3	1	2	3	
90	9.87	9.35	9.51	9.84	9.37	9.59	9.59
100	11.44	11.36	11.07	11.32	11.13	11.16	11.25
110	12.77	12.23	12.32	12.27	12.40	12.29	12.38
120	15.49	16.11	15.75	15.75	15.80	15.73	15.77

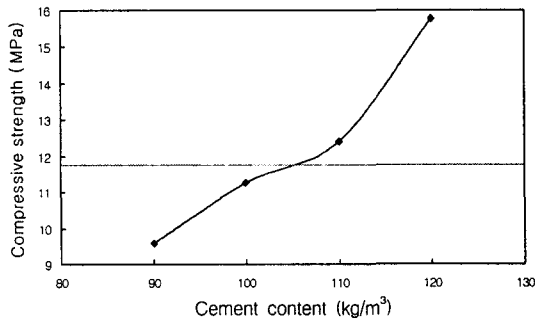


Fig. 8 Compressive strength versus cement content

량은 약 110 kg/m³ 정도이지만, 할증률을 적용하여 115 kg/m³ 정도를 단위 시멘트량으로 결정하였다.

바. 배합 결정

결정된 실험값을 종합하여 컨시스턴시 및 압축강도를 반복 측정된 결과 단위수량 95 kg/m³, 단위시멘트량 115 kg/m³, 잔골재율 35%가 결정되었으며 이를 다시 반복하여 Table 11과 같은 RCC 댐 콘크리트에 적용할 적정 배합비를 얻을 수 있었다.

IV. 결 론

본 연구는 RCC 댐의 국내 적용을 위하여 적정

배합비를 도출하는 것을 목표로 각종 실험을 실시하였다. 그 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 배합설계 방법으로는 RCC가 가장 활발히 연구되고 있는 미국 공병대와 일본에서 주로 사용되는 방법을 조합하여 시간을 줄이면서도 현장조건과 재료의 특성을 반영할 수 있는 방법을 택하여 실시하였다.

2. 제안된 배합설계 순서는 주요 변수의 초기 범위 산정은 미국 공병대의 방법에 따라 결정하고, 이를 기준으로 정확한 배합을 도출하기 위한 반복 실험은 일본에서 사용되고 있는 방법에 따라 실시하였다.

3. 제안된 배합설계 방법은 미국 공병대 배합설계에서 사용재료와 현장의 특성 반영이 결여되는 단점을 극복할 수 있고 일본 배합설계의 단점인 과도한 시간의 소비와 수많은 양의 실험 변수를 줄일 수 있었다.

4. 배합설계 방법은 향후 RCC 댐을 국내에 적용하는데 충분히 적용 가능할 것으로 판단된다.

References

1. ACI, 1988, Roller Compacted Mass Concrete, *American Concrete Institute Committee* 207.5R-89.
2. ASTM, 1991, Standard Test Methods for Determining Consistency and Density of Roller-Compacted Concrete Using a Vibrating Table. *American Stand Test Method C* 1170-91
3. Charles V. Logle, 1985, Economic considerations in selection of a Roller Compacted Concrete Dam, *Proceedings of the*

Table 11 Proposed mixture proportion of concrete for RCC Dam application

G _{max} (mm)	V _c (s)	Air (%)	w/c	S/a (%)	W (kg/m ³)	C (kg/m ³)	S (kg/m ³)	G (kg/m ³)	SP (kg/m ³)
80	20 ± 10	1.5±1	0.79	34	92	117	765	1,468	0.33

- Symposium sponsored by the Colorado Section and Construction Division of the *American Society of Civil Engineers* in conjunction with the ASCE Convention in Denver, Colorado, pp. 111-122.
4. Donald J. Hall and Donald L. Houghton, 1974, Roller Compacted Concrete Studies at Lost Creek Dam, *U.S. Army engineer district*, Portland.
 5. Kenneth D. Hansen, and William G. Reinhard, 1991, Roller-Compacted Concrete, McGraw-Hill, Inc.
 6. Shigeyoshi Nagataki, Tsutomu Yangida and Tadahiko Okumura, 1985, Construction of Recent RCD-concrete Dam Projects in Japan, Proceedings of the Symposium sponsored by the Colorado Section and Construction Division of the *American Society of Civil Engineers* in conjunction with the ASCE Convention in Denver, Colorado, pp. 62-70.
 7. Toshio Hirose and Tsutomu Yanagida, 1984, Burst of Growth Demands Speed Economy, *Concrete International*, May, pp. 14-18.
 8. US Army, 2000, Roller Compacted Concrete, US Army Corps of Engineers, *EM 1110-2-2006*.
 9. US Army, 1995, Seismic Design Provisions for Roller Compacted Concrete Dams. US Army Corps of Engineers, *EP 1110-2-12*.
 10. US Army, 2001, Test Method for Consistency of No-Slump Concrete Using the Modified Vebe Apparatus. US Army Corps of Engineers, *CRD-C 53-01*.
 11. W. O. Tynes, 1973, Feasibility Study of No-s slump Concrete for Mass Concrete Construction, *U.S. Army engineer waterways experiment station-Miscellaneous paper C-73-1*.