

구조용 경량콘크리트의 배합설계를 위한 ACI211.2-98의 수식화

Mathematization of ACI211.2-98 for Mix Design of Structural Lightweight Concrete



최재진*
Jae-Jin Choi



송진우**
Jin-Woo Song

1. 서론

오늘날의 콘크리트 구조물은 급속한 경제성장과 건설기술의 발달 등으로 대형화, 고층화되고 있으며, 고층의 건축구조물 또는 교량의 상판과 기초 등에서는 콘크리트의 단위용적질량을 작게 하기 위하여 골재의 일부 또는 전부를 경량골재로 하여 제조하는 경량골재 콘크리트가 폭넓게 사용된다.

국내에서는 경량콘크리트의 배합설계방법을 상세히 다룬 서적이나 규정을 찾아보기 힘들다. 미국콘크리트학회의 ACI211.2 및 일본건축학회의 경량콘크리트 배합설계·시공지침안 등은 경량콘크리트의 배합설계를 위한 좋은 지침으로 활용할 수 있다. 다만 이러한 지침을 이용하기 위해서는 그 내용을 상세히 이해할 필요가 있으며, 계산과정에서 오류가 생기지 않도록 확인을 필요로 한다. 이 때문에 보통콘크리트의 배합설계방법에 대해서는 ACI211.1에 제시된 표의 값을 도식으로 나타내 계산과정을 줄임으로써 배합설계의 이해를 돕고 편리하게 이용하도록 한 연구결과와 전산화를 위한 연구결과가 이미 보고된 바 있으며, 본 고에서는 경량콘크리트의 배합설계방법으로 ACI211.2-98에 제시된 각종 배합설계 참고표의 값을 수식화함으로써 경량콘크리트 배합설계의 자동화를 위한 자료를 제공하고자 한다.

ACI211.2-98에서는 구조용 경량콘크리트의 배합설계 방법을 질량법과 부피법으로 나타내고 있는데 본 고에서는 질량법으로 제시된 보통의 잔골재와 구조용 경량 굵은 골재를 사용하였을 때의 콘크리트의 단위수량, 공기량, 물-시멘트비, 단위부피당 굵은 골재의 부피비, 굳지 않는 콘크리트의 단위질량 등을 구하는 방법을 수식화하였으며, 이를 위해 Jandel사의 Table Curve 2D 및 3D 소프트웨어를 활용하였다. 또한 계산 예로써 제시된 수식과 표의 값으로 계산한 재료량을 비교하였다.

* 정회원, 공주대학교 건설환경공학부 교수
jjchoi@kongju.ac.kr

** 정회원, 공주대학교 건설환경공학부 석사과정

2. 수식화

ACI211.2-98의 질량법에 제시된 <표 1~5>를 수식화 하였으며, 수식에 의한 값과 표의 값의 상관성을 알 수 있는 결정계수 r^2 의 값을 함께 나타냈다.

2.1 단위수량 결정

굵은 골재 최대치수와 슬럼프에 따른 단위수량의 추정값을 나타낸 <표 1>을 그림으로 나타낸 것이 <그림 1>과 <그림 2>이며, 굵은 골재 최대치수 x (mm), 슬럼프값 y (mm)일때 단위수량 z (kg/m³)를 구하는 식은 AE 콘크리트는 식 (1), Non-AE 콘크리트는 식 (2)로 나타낼 수 있다.

AE 콘크리트의 단위수량(kg/m³) (1)

$$z = a + bx + cy + dx^2 + ey^2 + fxy$$

$$a = 197.39919$$

$$b = -5.2677394$$

$$c = 0.75379859$$

$$d = 0.13765182$$

표 1. 굵은 골재 최대치수와 슬럼프에 따른 단위수량의 추정값(kg/m³)

굵은 골재 최대치수(mm)	슬럼프 범위(mm)		
	25-50	75-100	125-150
AE 콘크리트			
9.5	181	202	211
12.5	175	193	199
19	166	181	187
Non-AE 콘크리트			
9.5	208	228	237
12.5	199	217	222
19	187	202	208

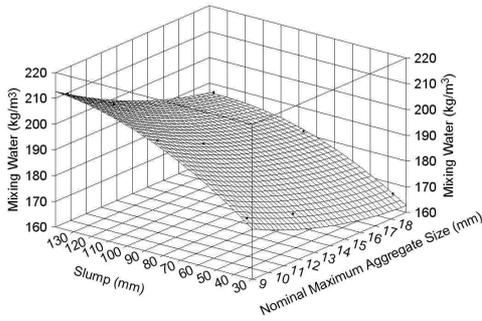


그림 1. AE 콘크리트의 단위수량(kg/m³)

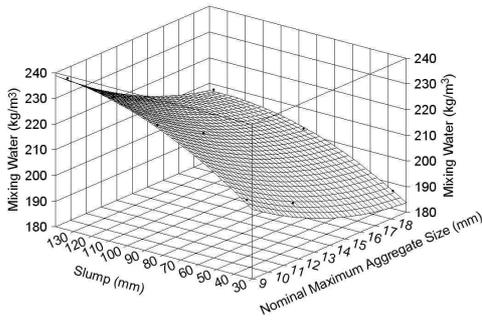


그림 2. Non-AE 콘크리트의 단위수량(kg/m³)

$$e = -0.0022$$

$$f = -0.0086925795 (r^2 = 0.997)$$

Non-AE 콘크리트의 단위수량(kg/m³) (2)

$$z = a + bx + cy + dx^2 + ey^2 + fxy$$

$$a = 240.09539$$

$$b = -7.3639802$$

$$c = 0.73167845$$

$$d = 0.18803419$$

$$e = -0.0022$$

$$f = -0.0075618375 (r^2 = 0.997)$$

식 (1)과 식 (2) 회귀식의 결정계수 r^2 는 모두 0.99 이상이었으며, 또 이 식으로 계산한 결과를 선으로 나타내고 배합설계 참고표에 제시된 값을 점으로 나타낸 <그림 3, 4>로부터도 수식 이 표의 값을 잘 설명하고 있음을 보여준다.

2.2 공기량 결정

AE 콘크리트의 공기량 추천값과 Non-AE 콘크리트의 공기량을 나타낸 것이 <표 2>이며, 이를 그림으로 나타낸 것이 <그림 5, 6>이다. 굵은 골재 최대치수 x (mm), 노출조건 y (Extreme,

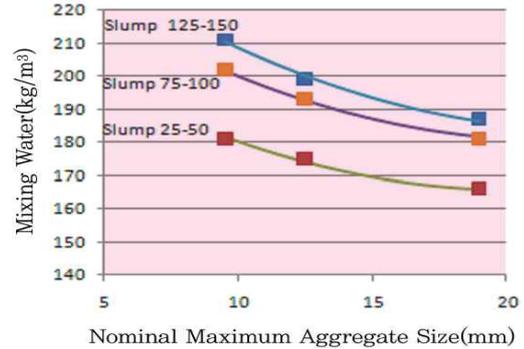


그림 3. AE 콘크리트의 단위수량

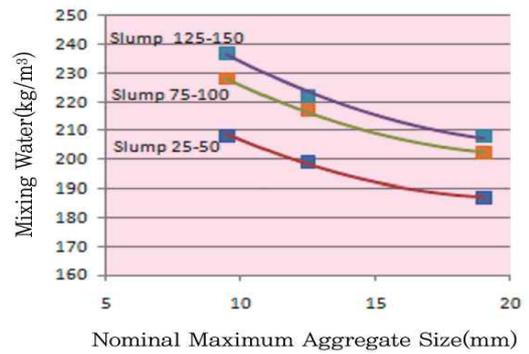


그림 4. Non-AE 콘크리트의 단위수량

Moderate, Mild exposure)일때 AE 콘크리트의 공기량 z (%)는 식 (3)으로 나타내고, Non-AE 콘크리트의 공기량은 식 (4)로 나타낼 수 있다. 이때 식 (3)의 노출조건 y 는 Extreme, Moderate, Mild exposure에서 각각 3, 2, 1의 값을 갖는다.

AE 콘크리트의 공기량(%) (3)

$$z = a + bx + cy + dx^2 + ey^2 + fxy$$

$$a = 4.493114$$

표 2. 굵은 골재 최대치수와 노출된 환경에 따른 공기량(%)

굵은 골재 최대치수(mm)	노출 조건		
	가벼운 노출	보통 노출	심한 노출
AE 콘크리트			
9.5	4.5	6	7.5
12.5	4	5.5	7
19	4	5	6
Non-AE 콘크리트			
9.5	3		
12.5	2.5		
19	2		

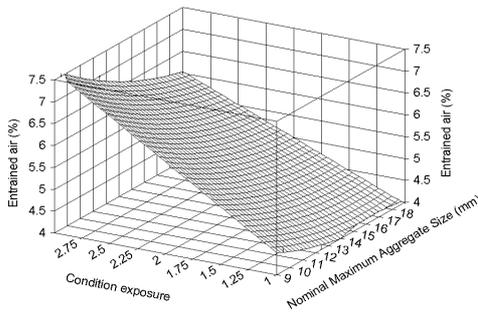


그림 5. AE 콘크리트의 공기량

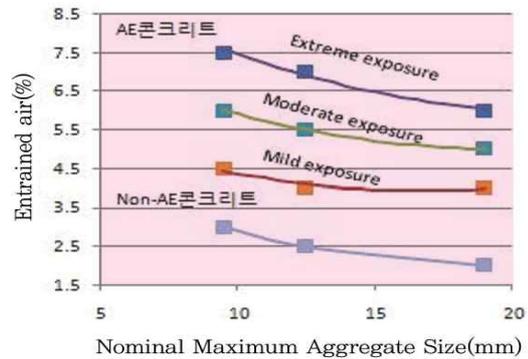


그림 7. 콘크리트의 공기량

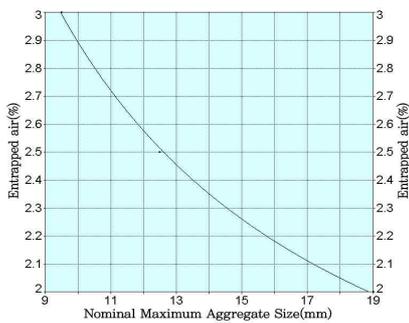


그림 6. Non-AE 콘크리트의 공기량

표 3. 콘크리트의 압축강도에 따른 물-시멘트비

압축강도 (MPa)	Non-AE 콘크리트	AE 콘크리트
42	0.41	-
35	0.48	0.40
28	0.57	0.48
21	0.68	0.59
14	0.82	0.74

$$\begin{aligned}
 b &= -0.26141972 \\
 c &= 2.1060071 \\
 d &= 0.0094466937 \\
 e &= 9.0124306e - 18 \\
 f &= -0.056537102 (r^2 = 0.997)
 \end{aligned}$$

Non-AE 콘크리트의 공기량(%) (4)

$$\begin{aligned}
 z &= a + b/x \\
 a &= 0.99413646 \\
 b &= 18.989872, (r^2 = 0.999)
 \end{aligned}$$

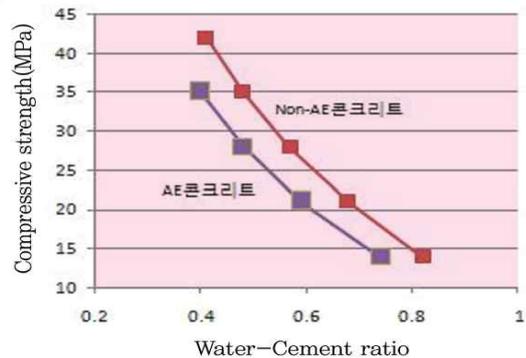


그림 8. 물-시멘트 비와 압축강도의 관계

<그림 7>은 <표 2>에 제시된 값을 점과 식 (3)과 식 (4)에 의해 계산한 결과를 선으로 나타낸 것으로 수식 계산 값은 표의 값과 잘 일치하고 있다.

2.3 물-시멘트비 결정

콘크리트의 압축강도 수준에 따른 물-시멘트비의 예상값을 나타낸 것이 <표 3>이며, 이를 그림으로 나타낸 것이 <그림 8>이다. 또한 물-시멘트비 x 와 압축강도 y (MPa)의 관계는 AE 콘크리트와 Non-AE 콘크리트의 경우 각각 식 (5)와 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

AE 콘크리트의 물-시멘트비 (5)

$$\begin{aligned}
 y &= a + bx + c/x \\
 a &= 5.9618646 \\
 b &= -14.608811 \\
 c &= 13.950668 (r^2 = 1.0)
 \end{aligned}$$

Non-AE 콘크리트의 물-시멘트비 (6)

$$\begin{aligned}
 y &= a + bx + c/x \\
 a &= 15.187785 \\
 b &= -23.772359
 \end{aligned}$$

$$c = 14.991591 (r^2 = 1.0)$$

2.4 콘크리트의 단위부피당 굵은 골재의 부피비 결정

<표 4>는 콘크리트의 단위부피당 굵은 골재의 부피비를 나타낸 것으로 이를 그림으로 나타내면 <그림 9>와 같다.

굵은 골재 최대치수 x (mm), 잔골재 조립률 y 일 때 단위부피당 굵은 골재의 부피비 z 는 식 (7)로 나타낼 수 있다.

콘크리트의 단위부피당 굵은 골재의 부피비 (7)

$$z = a + bx + cx^2 + dy$$

$$a = 0.29461538$$

$$b = 0.074534413$$

$$c = -0.0020242915$$

$$d = -0.1 (r^2 = 1)$$

<그림 10>은 <표 4>에 제시된 값을 점과 식 (7)로 계산한 결과를 선으로 나타낸 것으로 수식 계산 값은 표의 값과 잘 일치한다.

2.5 굳지 않은 콘크리트의 단위질량

<표 5>는 굵은 골재 밀도계수와 콘크리트 공기량에 따른 굳지 않은 콘크리트의 단위질량 추정값을 나타낸 것이며 이를 그림으로 나타낸 것이 <그림 11>이다.

표 4. 굵은 골재 최대치수와 잔골재 조립률에 따른 콘크리트의 단위부피당 굵은 골재의 부피비

굵은 골재 최대치수(mm)	잔골재 조립률			
	2.4	2.6	2.8	3
9.5	0.58	0.56	0.54	0.52
12.5	0.67	0.65	0.63	0.61
19	0.74	0.72	0.70	0.68

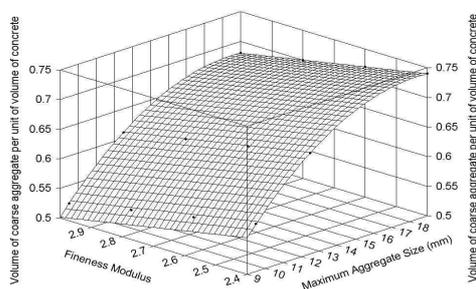


그림 9. 콘크리트 단위부피당 굵은 골재의 부피비

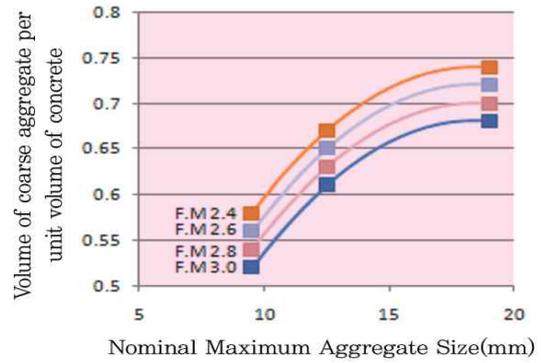


그림 10. 콘크리트 단위부피당 굵은 골재의 부피비

굵은 골재 밀도계수 x (g/cm³), 공기량 y (%)일 때 굳지 않은 콘크리트의 단위질량 z (kg/m³)는 식 (8)로 나타낼 수 있으며 앞서와 같은 방법으로 <표 5>의 값과 식 (8)로 계산하여 얻은 값을 그림으로 나타낸 <그림 12>에서 수식의 계산값은 표의 값과 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

굳지 않은 콘크리트의 단위질량 (8)

$$z = a + bx + cy + dx^2 + ey^2 + fxy$$

$$a = 1233.254$$

$$b = 434.88095$$

표 5. 굵은 골재 밀도계수와 콘크리트 공기량에 따른 굳지 않은 콘크리트의 단위질량 추정값(kg/m³)

굵은 골재 밀도계수(g/cm ³)	공기량(%)	4	6	8
1		1,596	1,560	1,519
1.2		1,679	1,643	1,608
1.4		1,768	1,727	1,691
1.6		1,851	1,810	1,774
1.8		1,934	1,899	1,857
2		2,023	1,982	1,940

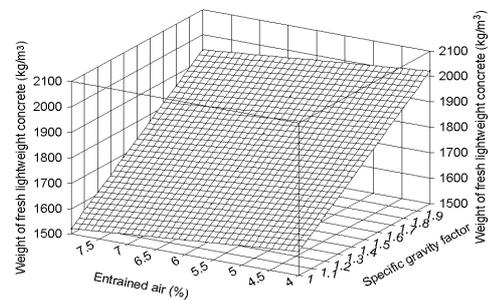


그림 11. 굳지 않은 콘크리트의 단위질량

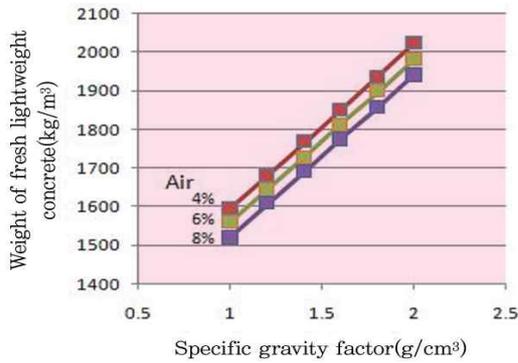


그림 12. 공기 양은 콘크리트의 단위질량

$$c = -16.178571$$

$$d = -0.5952381$$

$$e = -0.041666667$$

$$f = -1.7142857 (r^2 = 1.0)$$

3. 배합설계 예

앞의 '2. 수식화'를 통하여 얻은 수식으로 계산한 경량콘크리트의 단위재료량과 ACI211.2-98에 제시된 표의 값으로 계산한 단위재료량을 비교하기 위한 계산 예를 나타냈다.

3.1 설계조건

동결융해가 반복되는 구조물에 사용할 배합비를 정한다.

(1) 사용재료

시멘트 : 밀도 3.15 g/cm³
 잔골재 : 강모래(절대건모질도 2.60 g/cm³, 조립률 2.60)
 굵은 골재 : 구조용 경량골재(최대치수 19 mm, 밀도계수 1.60 g/cm³, 단위용적질량 700 kg/m³, 흡수율 10%)

(2) 콘크리트

설계기준강도 : 18 MPa, 배합강도 : 21 MPa
 슬럼프 : 100 mm

3.2 수식에 의한 배합설계

(1) 단위수량 결정

슬럼프 100 mm, 굵은골재 최대치수 19 mm일 때, 식 (1)을 사용하면 단위수량

$$z = a + bx + cy + dx^2 + ey^2 + fxy$$

$$a = 197.39919$$

$$b = -5.2677394$$

$$c = 0.75379859$$

$$d = 0.13765182$$

$$e = -0.0022$$

$$f = -0.0086925795$$

$$\therefore \text{단위수량} = 181 \text{ kg/m}^3$$

(2) 공기량 결정

굵은 골재 최대치수 19 mm, 심한노출[3]일 때, 식 (3)을 적용하면 공기량은

$$z = a + bx + cy + dx^2 + ey^2 + fxy$$

$$a = 4.493114$$

$$b = -0.26141972$$

$$c = 2.1060071$$

$$d = 0.0094466937$$

$$e = 9.0124306e - 18$$

$$f = -0.056537102$$

$$\therefore \text{공기량} = 6\%$$

(3) 물-시멘트비 결정

배합강도 21 MPa, AE 콘크리트일 때, 식 (5)을 적용하면 물-시멘트비는

$$y = a + bx + c/x^2$$

$$r^2 = 0.9999985$$

$$a = 5.9618646$$

$$b = -14.608811$$

$$c = 13.950668$$

$$\therefore \text{물-시멘트비} = 0.59$$

(4) 단위시멘트량 결정

$$\text{단위수량/물-시멘트비} = 181/0.59 = 306 \text{ kg/m}^3$$

$$\therefore \text{단위시멘트량} = 306 \text{ kg/m}^3$$

(5) 단위 굵은 골재량 결정

굵은 골재 최대치수 19 mm, 잔골재 조립률 2.60일 때, 식 (7)을 적용하면 단위 굵은 골재 부피비는

$$z = a + bx + cy + dx^2 + ey^2 + fxy$$

$$a = 1233.254$$

$$b = 434.88095$$

$$c = -16.178571$$

$$d = -0.5952381$$

$$e = -0.041666667$$

$$f = -1.7142857$$

$$\therefore \text{단위 굵은 골재 부피비} = 0.72$$

$$\therefore \text{굵은 골재의 건조질량} = 0.72 \times 700 = 504 \text{ kg/m}^3$$

표 6. 표의 값 적용 및 수식 적용에 의한 배합설계 결과 비교

	굵은 골재 최대 치수 (mm)	슬립프 (mm)	공기량 (%)	물-결합제 비 W/B (%)	잔골재율 S/a (%)	단위질량(kg/m ³)					
						물	시멘트	잔골재	굵은 골재	혼화제 AE제	전체무게 (kg/m ³)
표의 값 적용	19	100	6	59	69	181	306	769	554	추천값	1810
수식 적용	19	100	6	59	69	181	306	771	554	추천값	1812

∴ 굵은 골재의 표면건조 포화상태의 질량
 $= 504 \times (1 + 0.1) = 554 \text{ kg/m}^3$

(6) 잔골재량 결정

굵은 골재의 밀도계수 1.6 g/cm^3 , 공기량 6%일 때, 식 (8)을 적용하면 굳지 않은 콘크리트의 단위질량은

$$z = a + bx + cy + dx^2 + ey^2 + fxy$$

$$a = 1233.254$$

$$b = 434.88095$$

$$c = -16.178571$$

$$d = -0.5952381$$

$$e = -0.041666667$$

$$f = -1.7142857$$

$$\therefore \text{콘크리트의 단위질량} = 1,812 \text{ kg/m}^3$$

$$\therefore \text{잔골재량} = 1,812 - (181 + 306 + 554) = 771 \text{ kg/m}^3$$

이상의 수식으로 계산한 경량콘크리트의 단위재료량과 함께 ACI211.2-98에 제시된 표의 값으로 계산한 단위재료량을 비교하여 나타낸 결과가 <표 6>이다. 수식에 의한 단위재료량과 표의 값을 직접 대입하여 계산한 단위재료량은 물, 시멘트, 굵은 골재의 경우 같은 값을 보였으며, 잔골재량은 2 kg/m^3 의 차이를 나타냈다. 이러한 차이는 시험비비에 의해 경량콘크리트의 단위질량을 확인하여 배합수정이 필요한 부분으로 초기의 시험 배합으로서 수식과 표에 의해 계산한 단위재료량은 거의 같은 값을 나타낸다.

4. 결론

본문에서 ACI211.2-98의 질량법에 제시된 보통의 잔골재와 구조용 경량굵은 골재를 사용하였을때의 콘크리트의 단위수량, 공기량, 물-시멘트비, 단위부피당 굵은 골재의 부피비, 굳지 않은 콘크리트의 단위질량 추정값 등에 대한 배합설계 참고표를 수식화 하였다.

이 수식들은 모두 배합설계 참고표의 값을 결정계수 $r^2 = 0.99$ 이상으로 매우 잘 설명하며, 콘크리트 배합설계 예를 통해서도 참고표와 수식을 이용하여 계산한 재료량이 거의 같음을 확인하였다. 이 수식은 앞으로 구조용 경량콘크리트의 시험배합의 결정 및 배합수정을 위한 전산프로그램 작성에 활용할 수 있으며, 또한 수작업에 의한 배합비 계산의 오류방지와 계산시간의 단축에 의해 배합설계의 효율성 증대 효과 등을 가져 올 수 있을 것으로 사료된다. 

참고문헌

- 최재진, 콘크리트 배합설계 프로그램 개발 연구, 한국산학기술학회 논문지, Vol. 1, No. 1, 2000, pp. 63 ~ 72.
- ACI211.1, Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete, American Concrete Institute, 1991.
- ACI211.2, Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Lightweight Concrete, American Concrete Institute, 1998.
- Ken Hover, Graphical Approach to Mixture Proportioning by ACI211.1-91, Concrete International, Vol. 17, No. 9, 1995, pp. 49 ~ 53.
- 日本建築學會, 輕量コンクリート調査設計-施工指針案-同解説, 技報堂, 1978.
- 日本土木學會, 人工輕量骨材コンクリート設計施工マニュアルLibrary, No. 56, 1985, pp. 2 ~ 4.

담당 편집위원 :

김한수(건국대학교) hskim@konkuk.ac.kr