

지하 프리캐스트 박스 암거의 구조적 성능 개선에 관한 연구

Improvement of Structural Performance for the Precast Box Culvert

조병완¹ 태기호² 이계삼³
Jo, Byung Wan Tae, Ki Ho Lee, Kye Sam

ABSTRACT

To use concrete box culverts effectively, precast goods are manufactured at a factory, then linked and anchored with prestressing tendon at a field. However, the corrosion of rebar and prestressing tendon in the box culverts utilizing portland cement concrete is issued when the cracks occur at a underground water level. It has been reported that expansive concrete, compared with portland cement concrete, has many structural advantages such as increasing capacity of watertight, controlling initial crack and improving durability due to its property of expansion. During flexure test with RC beam made from expansive concrete, in the case of a constant section of concrete element, the lower steel ratio is, and in the case of a constant steel ratio, the more incremental the section of concrete element, the more incremental the amount of chemical prestress by expansive concrete is. At the segment of the box culverts using expansive concrete, the numbers of crack and its gap is reduced, and ultimate load and initial crack load is much larger than the segment at which expansive concrete is not used. Also lay-out of tendon with a curvature generate upward force so that deflection is reduced. Through the whole procedure, it could be confirmed that performance precast box culvert by means of using expansive concrete is improved.

1. 서 론

지하철이나 고속철도와 같은 사회 기반 시설이 확대됨에 따라 직사각형 라멘 형식의 지하 콘크리트 구조물의 건설이 점차 활기를 띠고 있다. 이러한 지하 박스 구조물의 대부분은 지하 깊은 곳에 위치함에 따라 시공시 콘크리트의 품질 관리가 어려우며, 콘크리트의 타설 방법, 타설 간격, 단면이 큰 경우 수화열 문제 등에 의해 심각한 균열이 초래되어 구조물의 내구성과 지하 방수성에 큰 문제가 있는 것으로 보고되고 있다. 또한 최근에 이러한 지하 박스 콘크리트 구조물을 효율적으로 사용하기 위하여 콘크리트 박스를 공장에서 프리캐스트로 제작하고 현장에서 프리스트레싱 강선으로 연결, 정착시키는 방법이 많이 사용되고 있으나 지하 구조물의 특성상 지하 수위에 따라 콘크리트의 한열시 팽창 및 강선의 부식이 심각한 내구성 문제를 야기시키고 있다 따라서 이러한 지하 프리캐스트 콘크리트 박스 구조물의 구조적 성능을 개선하기 위하여 콘크리트 매합시 팽창제를 혼입하여 건조 수축 균열로 인한 지하 누수를 방지하고 화학적 프리스트레싱에 의해 단면 내력을 저감시킬 뿐만 아니라 경계거인 난민 실계가 가능하도록 하였으며, 프리캐스트 박스 암거 정착시 사용되는 수평 강선의 사출을 도우기 위하여 박스 암거 전체의 구조적 성능 개선을 도모하고자 하였다.

본 연구에서는 팽창 콘크리트의 재료적 특성과 화학적 프리스트레싱 효과를 분석하기 위해 단순보

¹ 정회원, 한양대학교 도시환경건설공학부 부교수
² 정회원, 한양대학교 대학원 박사 과정
³ 정회원, 육군사관학교 교수 요원

시험에서 인장 철근량, 단면의 크기, 팽창제의 유무 등의 변수에 따라 10개의 홈 시험체를 제작하였으며 실물 시험에서는 박스 암거 6개를 제작하고 이를 팽창 콘크리트 사용 유무와 포스트 텐션에 의한 상향력의 도입을 변수로 하여 그 구조적인 성능 개선을 검증하였다

2. 팽창 콘크리트 실험

2.1 개요

팽창 콘크리트의 재료적 특성과 화학적 프리스트레싱 효과를 분석하기 위한 단순보 실험에서는 인장 철근량, 단면의 크기, 팽창제의 사용 유무 등의 변수에 따라 10개의 홈시험체를 제작하였으며, 실물 실험에서는 박스 암거 6개를 제작하고 이를 팽창 콘크리트의 사용 유무와 포스트 텐션에 의한 상향력의 도입을 변수로 하여 4개의 시험체로 조립하였다.

2.2 사용 재료

실험에 사용된 콘크리트는 28일 압축 강도 400kgf/cm²으로 설계된 레미콘 제품을 사용하였으며, 이 값은 기계적 프리스트레싱을 가하는 박스 암거의 제작을 고려하여 산정하였다(표1 참조) 배근된 철근은 설계기준항복강도가 3000kgf/cm²인 SD30A를 사용하였다

표1 콘크리트의 배합표

Type	굵은골재 최대치수 (mm)	슬럼프 범위 (cm)	공기량 범위 (%)	W/C (%)	S/A (%)	단위량(kg/m ³)					비고	
						W	C	S	G	혼화제		
										팽창제		혼화제
Type-A	25	8±2	4±1	36	42.0	144	400	755	1,051	0	4.0	AE 004
Type-B	25			36			348			52		AE 004

Type-A 보통콘크리트 Type-B : 팽창콘크리트

2.3 시험체 설계 및 실험방법

2.3.1 철근콘크리트 보

15cm×20cm×150cm(순경간 12m)의 제원에 인장 철근으로 2-D19 및 압축 철근으로 2-D13을 배근한 시험체를 표준 시험체로 하여 팽창제의 사용유무, 인장 철근량, 콘크리트 단면적을 변수로 실험을 수행하였다. 팽창제의 양은 화학적 프리스트레싱의 효과가 적절하다고 판단되는 시멘트 대비 치환율 13%로 결정하였으며 인장철근의 변화에 따른 거동특성을 파악하기 위하여 모든 시험체에 2-D13의 압축철근을 배치하고 인장철근만을 표준 시험체의 85.4%, 70.9%로 감소시킨 시험체를 제작하였다. 또한, 콘크리트 단면을 표준 시험체의 78%와 64%로 감소시킨 시험체를 제작하여 케미칼 프리스트레싱의 적절한 도입을 위한 콘크리트 단면적의 유효 범위를 규명하고자 하였다. 시험체의 설계는 콘크리트 구조 설계 기준에 따라 설계하였으며, 전단 파괴를 최소화하기 위하여 전단철근으로 D13의 스티킹을 10cm와 18cm 간격으로 배근하였다. 각 시험체의 종류와 특징은 표2와 같다 100ton 용량의 만능시험기를 이용한 4점 휨재하(4-point bending test) 방법을 적용하였으며 인장 철근과 압축 철근의 시긴 중앙부에는 철근 게이지를 타설 전에 각각 설치하였다. 하중의 제하는 0.5ton 간격으로 하였다. 그림2는 휨시험의 하중 재하 방법을 간략화한 것이다.

2.3.2 박스 암거 시험체

지하 박스 암거의 일반적인 형태인 내부공간 1.5m×1.5m, 길이 2m 제원의 박스 암거를 제작하였다. 시험체는 콘크리트 및 도로교 표준시방서에 의거하여 강도 설계법으로 설계하였으며, 사용된 설계 조건은 다음 표4와 같다. 긴장력의 산정시 시험체와 콘크리트 기초사이의 마찰계수 μ 는 10으로 하였으며 6개의 세그먼트를 이용하여 4개의 시험체를 제작하였다. 단면의 제원은 그림1에 나타내었으며 표5는 각 시험체의 종류와 특징을 정리한 것이다. 단일 시험체의 휨강도 실험은 팽창제의 사용 유무를 변수로 하여 화학적 프리스트레싱의 유효한 도입 여부를 분석하고자 하였으며 접합부 강도 실험에기

는 포스트 텐션을 이용하여 접합부에 압축력 및 상향력을 도입한 시험체(곡률강선배치)와 압축력 만은 도입한 시험체(직선강선배치)의 역학적 거동 차이를 비교하고자 하였다. 실험을 위해 프레임을 설치하고 유압 잭을 사용하여 가력하였다. 재하되는 하중량을 측정하기 위해 유압 잭의 하부에 로드 셀을 설치하는 한편, 시험체의 변위를 측정하기 위하여 상부 슬래브의 하부 중앙과 측벽 슬래브의 외부에 변위계(LVDT)를 설치하였다. 상하부 및 측벽슬래브 중앙 위치의 압축 철근과 인장 철근에는 각각 타선선에 철근 게이지를 설치하였으며 접합 시험체의 경우에는 접합 면에 클립 게이지를 설치하여 두 시험체의 접합 강도를 검토하고자 하였다 그림3과 그림4는 각각 단일 세그먼트 강도 실험과 접합부 강도 실험의 하중 재하 방법을 단순화하여 나타낸 것이다.

표2 휨시험체의 변수에 따른 분류

시험체 No.	팽창계(%)	사용 인장철근	제원(cm)	철근비교(%)	단면비교(%)	수량
P-S19	0	D19×2	15×20×150	100	100	2개
C-S19	13	15×20×150	100	100	"	
P-S16	0	D16×2	15×20×150	85.4	100	1개
C-S16	13	D16×2	15×20×150	85.4	100	"
P-S13	0	D13×2	15×20×150	70.9	100	"
C-S13	13	D13×2	15×20×150	70.9	100	"
P-1A13	0	D13×2	13×18×150	70.9	78	"
C-1A13	13	D13×2	13×18×150	70.9	78	"
P-2A13	0	D13×2	12×16×150	70.9	64	"
C-2A13	13	D13×2	12×16×150	70.9	64	"

표3 실물시험체의 설계조건

항 목	조 건	비 고
활하중	DB-24	
긴장력(1개소)	3.35ton	$\frac{\mu \times W \times L}{4}$
도피고	1.5m	포장층 0.5m
콘크리트 압축강도(σ_{ck})	340kgf/cm ²	
흙의 내부마찰각(ϕ)	30°	
철근압축응력(σ_s)	4000kgf/cm ²	

표4 실물시험체의 종류 및 특징

시험체 No.	시험 종류	특징	비고
PS	접합부 강도시험	접합	압축력(PC Strand 개당 7.8ton)
CS	접합부 강도시험	접합	압축력+상향력(1.6ton/m)
PI	강도시험	비접합	보통콘크리트
CI	강도시험	비접합	팽창콘크리트

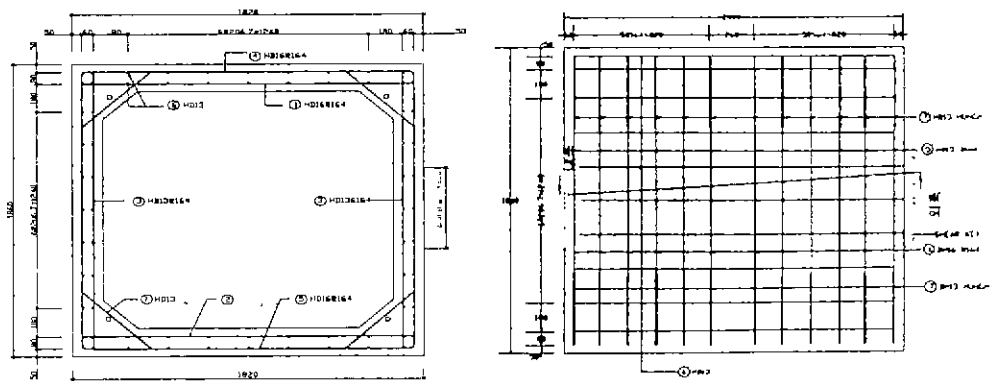


그림1 박스단면의 배근도

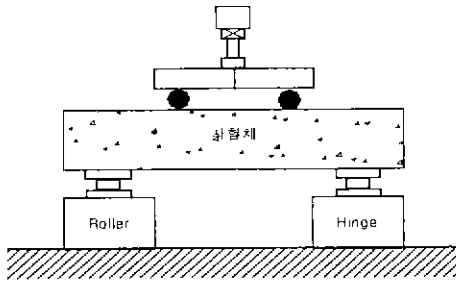


그림2 휨시험 하중재하 방법

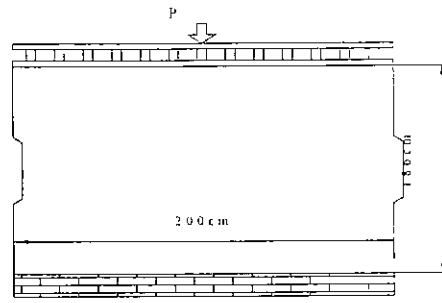
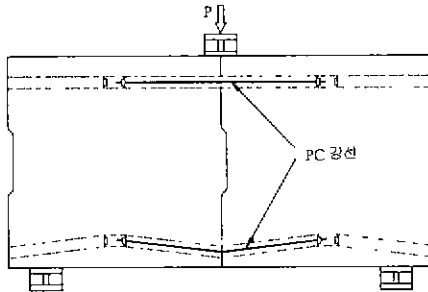
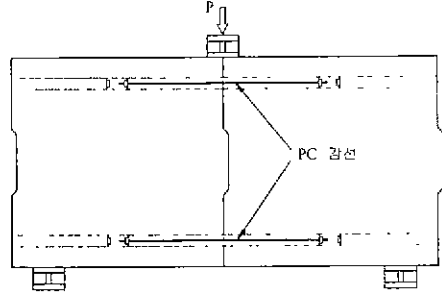


그림3 단일세그먼트 하중재하 방법



(a) 강선을 절곡 배치한 경우



(b) 강선을 직선 배치한 경우

그림4 접합부 강도시험의 하중재하 방법

3. 실험결과 및 고찰

3.1 휨실험

팽창 콘크리트를 실용적으로 이용하기 위해서는 콘크리트 부재에 도입되는 초기 화학적 프리스트레스를 정량적으로 계산하는 것이 중요하다. 이를 위해 콘크리트 균열 발생 시점 이후부터 절단 항복 시점까지인 절근 탄성 영역의 직선 구간을 연장하여 변형률 측과 교차하는 점의 변형률을 검토하였는데 이것이 콘크리트의 경화 및 팽창제의 팽창작용에 의한 초기 변형률로 추정된다. 표준단면(15cm×20cm)에 2-D19의 인장철근을 배치한 보통 콘크리트 시험체(P-S19)의 초기변형률은 122×10^{-6} 인 반면 같은 제원의 팽창콘크리트 시험체(C-S19)의 초기변형률은 312×10^{-6} 으로 약 388kgf/cm^2 의 응력이 발생하며 이것이 팽창제에 의해 도입되는 화학적 프리스트레스의 양이다 표6에 정리된 휨실험 결과에서 알 수 있는 바와 같이 이러한 화학적 프리스트레스는 콘크리트 단면이 동일할 경우 인장 길근비가 작을수록, 철근량이 일정한 경우에는 콘크리트의 단면이 클수록 더 크게 발생하였다 C-S19이 P-S19에 비해 인장 철근 항복 강도에서 14.8%, 최대하중에서 높게 나타났다 5tonf, 10tonf, 13tonf에서 하중을 제거하는 방법으로 표준시험체(C-S19, P-S19)에 실시된 재개하 실험에서는 P-S19의 잔류 변형률에 비해 C-S19의 잔류 변형률이 미소하였으며 13ton에서의 재개하에서는 P-S19의 인장 강도가 침박하였으나 C-S19는 약간의 잔류 변형률 증가만 발생하여 항복하지 않았음을 보여준다 인장 강근량은 14.6% 감소시킨 팽창 콘크리트 시험체(C-S16)는 같은 제원의 보통 콘크리트 시험체(P-S16)에 비해 항복하중이 27.1% 높았으며 P-S19 시험체의 항복 하중보다도 10.9% 높게 나타났으며 처짐에 있어서도 P-S19 시험체와 거의 유사한 거동을 보였다 영역에서는 C-S16의 처짐이 오히려 P-S19의 처짐보다 더 낮게 나타났다. 표준 시험체의 인장철근을 29.1% 감소시킨 시험체(C-S13)의 경우에는 P-S16과 비슷한 초기 거동을 보였으나 6tonf 이후에는 동일 하중에서의 처짐과 변형률이 P-S16보다 높게 나타났다. 그러나 이 경우에도 C-S13이 같은 조건의 보통 콘크리트 시험체(P-S13)에 비해 인장 철근의 항복강도에서는 26.5%, 최대 강도에서는 12.7% 높았다 콘크리트 단면적이 표준 단면(15×20) 시험체(C-1A13)는 표준 단면인 시험체(P-S13)와 처짐과 인장 철근의 변형에 기 거의 유사한 역학적 거동을 보였다. 초기 균열하중은 전 시험체에서 평균 콘크리트 시험체가 보통 콘크리트 시험체에 비해 우수한 결과를 보였다 항복 하중시의 처짐과 최대 하중시의 처짐을 비교한 인장비율도 P-S19의 경우와 유사하게

따라 증가하였다

3.2 실물실험

3.2.1 단일시험체의 강도실험

팽창콘크리트로 제작한 시험체(C1)는 보통콘크리트로 제작한 시험체(P1)와 비교하여 유사한 파괴 양상을 가지는 반면, 균열의 수가 적고 균열의 형태도 비교적 간결하였다. C1 시험체와 P1 시험체의 초기 변형률은 각각 884×10^{-6} 으로 추정되며 따라서 C1 시험체에 도입되는 프리스트레스의 양은 416kgf/cm^2 으로 실물 시험체의 경우에도 팽창제에 의한 화학적 프리스트레가 유효하게 도입됨을 알 수 있다. C1 시험체는 P1 시험체와 비교하여 초기 균열하중에서 47.2%, 항복하중에서 35.5%, 최대하중에서 6.6% 각각 더 큰 것으로 나타났으며 처짐의 제어에서도 상대적인 우수성을 보여주었다.

표5 휨실험 결과

시험체	초기변형률 ($\times 10^{-6}$)	프리스트레스 (kgf/cm^2)	설계하중 (tonf)	항복하중 (tonf)	최대하중 (tonf)	항복하중시 처짐(mm)	최대하중시 처짐(mm)	연성비
C-S19	312	388	10.89	13.46	15.95	4.29	12.11	2.82
P-S19	122	-	10.89	11.72	14.62	4.63	12.51	2.70
C-S16	491	708	7.91	13.00	13.89	3.43	13.49	3.93
P-S16	144	-	7.91	10.23	12.32	4.29	13.49	3.14
C-S13	754	949	5.24	8.59	10.30	2.91	15.77	5.42
P-S13	289	-	5.24	6.79	9.56	3.43	16.00	4.66
C-1A13	171	277	4.50	6.73	8.94	3.66	15.20	4.15
P-1A13	35	-	4.50	6.09	7.93	4.40	13.49	3.07

표6 Reloading시의 복원값

No.	처짐(mm)			인장철근 변형(10^{-6})			압축콘크리트 변형(10^{-6})		
	5tonf	10tonf	13tonf	5tonf	10tonf	13tonf	5tonf	10tonf	13tonf
CS19-2	0.19	0.43	0.6	79	169	216	-43	-84	-116
PS19-2	0.42	0.76	1.24	225	318	yielding	-131	-181	-432
비교(%)	221	176	207	285	188	∞	304	215	372

3.2.2 접합 시험체의 강도실험

접합부에 하중을 파괴될 때까지 재하하여 다음과 같은 파괴양상을 얻었다. 상부 슬래브 하부의 인장측에서 초기 균열이 발생하였으며 접합면을 따라 진전하였다. 시험체의 정점에서 1/3 지점까지 긴긴한 균열은 전단키가 설치된 측벽 중앙에서 억제되었으며 하중을 지속적으로 증가시킴에 따라 균열은 집합면이 아닌 전단키를 관통하여 진전하였다. 집합부는 세그먼트 사이의 힘의 불연속면을 의미하므로 접합부를 통하여 세그먼트 간에 전단응력과 압축응력이 전달되도록 설치되어야 하며 접합부의 선단 거동에 영향을 미치는 인자는 전단키의 유무, 전단키의 형상(돌출비, 경사각)과 개수, 표면 상태, 구속 응력, 하중 형태, 콘크리트의 강도 등이다. 실물 시험에서 팽창콘크리트를 사용하고 강선을 절곡으로 배치한 시험체(CS)와 보통 콘크리트를 사용하고 강선을 직선으로 배치한 시험체(PS) 모두 전단키의 지배 파괴 양상은 지압 파괴나 슬립에 의한 수평 분리가 아니라 전단 저면부의 웨어 오프(shear off)였으며 PS가 상대적으로 낮은 하중에서 웨어 오프(shear off)가 발생하였다. 전단키의 형상(d/h=1.12)은 적절하였으나 전단키의 외측에서 측벽으로 진행되는 사인장 균열을 제어하기 위한 별도의 전단 철근의 보강이 필요할 것으로 판단된다. 쿨링 게이지로 측정된 접합부의 변위는 CS가 낮은 수치를 나타내 있으나 다소 취성적으로 저농하였다. 이상의 결과는 포스트텐션의 강선을 절곡으로 배치하는 것이 시험체의 변위를 감소시켜 결과적으로 접합부의 구속 응력을 크게 하여 접합부의 전단 강도를 증가시킬 수 있음을 보여준다. CS와 PS의 시험 결과를 다음의 표7에 요약하였다. 이 결과에 따르면 평창개발 사용하고 상향력이 작용하도록 강선을 절곡으로 배치한 CS 시험체가 최대하중에서는 57 인력 지선

에서는 23.7% 우수한 것을 알 수 있다

표7 접합부 강도시험 결과 요약표

시험체	최대하중(tonf)	Clip Gauge(10^{-6})	연직처짐(mm)	인장부 균열폭(mm)	비고
CS	81.66	2328	19.4	10.93	압축력-상향력
PS	77	10560	25.41	9.24	압축력
비교	57%	-	23.7%	-	-

4. 결론

힘 실험과 실물모형실험을 통해 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다

1. 팽창 콘크리트에 의해 부재에 도입되는 화학적 프리스트레스의 양은 콘크리트 단면이 일정할 경우 철근비가 낮을수록 증가하였으며 철근비가 일정한 경우에는 단면이 클수록 증가하였다.
2. 보 시험체의 힘 실험시 팽창 콘크리트를 사용한 모든 시험체가 같은 체원의 보통 콘크리트 시험체에 비해 초기 균열 하중, 항복 하중, 최대 하중이 높았으며 복원력과 연성비의 증가가 확인되었다. 특히 초기 균열 하중과 항복 하중의 증가율은 도입된 화학적 프리스트레스의 증가량과 일정한 관계가 있음을 알 수 있다.
3. 단일 세크먼트에 대한 강도 시험에서 팽창 콘크리트를 사용한 시험체가 화학적 프리스트레스에 의한 수축보상 작용으로 균열 수와 폭이 크게 감소하였다. 그리고 최대 하중 및 초기 균열 하중이 보통 콘크리트를 사용한 경우보다 각각 6.6%, 47.2% 큰 것으로 나타나 박스 구조물에서도 화학적 프리스트레스를 적용하는 것이 가능하였다.
4. 접합부 강도 시험에서 전단력과 압축력을 전달하기 위해 설치된 전단키는 접합부의 균열을 제어하는 역할을 하였으나 일정 하중 이상에서는 저부가 파괴되며 끝단에서 사인장균열이 진행되는 웨어 오프(shear off)가 발생하였다.
5. 접합부 강도시험에서 강선을 절곡으로 배치한 시험체의 웨어 오프(shear off)가 발생하는 하중이 높았으며 접합면에 부착한 클립 게이지의 측정에서도 낮은 변위를 나타내었다. 이는 강선의 절곡 배치로 도입된 상향력으로 인해 처짐이 감소하였으며 결과적으로 전단력의 감소로 이어져 강선을 직선배치한 시험체에 비해 상대적인 접합강도의 증가가 발생한 것으로 판단된다. 강선을 절곡 배치한 시험체는 직선으로 강선을 배치한 시험체에 비해 연직처짐 23.7% 정도 감소하였으며 초기균열하중과 최대하중, 그리고 균열의 수와 폭에서 성능의 향상이 있었다.

위의 결론들을 통해 화학적 프리스트레스를 도입하는 경우 철근량 및 콘크리트 단면의 감소가 가능하며 수밀성과 균열에 대한 복원력의 증가로 내구성의 증대에 기여하고, 또한 강선의 절곡 배치로 인한 상향력으로 인해 처짐 및 균열을 감소시켜 사용성을 증대시킬 수 있을 것으로 판단된다

참고 문헌

- 1 건설교통부, 도로교 표준시방서, 1996
- 2 장석훈, "프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 세그멘탈 박스 거더 교량의 접합부 거동연구", 서울대학교 석사학위 논문, 1994
- 3 "팽창시멘트를 사용한 콘크리트 부재의 화학적 프리스트레싱", 인하대학교 컴퓨터과학응용연구소 논문집, 제2집, 1998. 2
- 4 Clyde E. Kesler, Donald W. Pfeifer, "Expansive Cement Concrete - Present State of Knowledge", ACI Journal, 1970 8.
5. P. Kumar Mehta, Paulo J.M Monteiro, "Concrete - structure, properties, and material". 2nd Edition, Prentice Hall, 1997