

고유동성 콘크리트를 이용한 보부재(A시리즈)의 충전상황별 휨거동 연구

A Study on the Flexural Behavior according to Filling conditions of
Beam Members(A Series) Using High Performance Concrete

장일영* 윤영수** 엄주환*** 송재호****
Jang, Il Young Yoon, Young Soo Um, Ju-han Song, Jae-Ho

Abstract

This paper presents the flexural behavior of high performance concrete beams having different concrete filling conditions. Three tests were conducted on full-scale beam specimens with design concrete compressive strength of 400 kg/cm². Different concrete filling conditions were intentionally made such that the first beam specimen was soundly cast to obtain the perfect concrete filling condition. Second beam specimen was cast in such a way that up to the longitudinal tensile reinforcement from the top, good concrete was filled while poor concrete was poured for the bottom part to simulate the poor workmanship, workability and unsatisfactory compaction. Third beam specimens was cast in such a way that up to the neutral axis of the beam section from the top, good concrete was filled while so did for the bottom part as the second beam specimen. The test results were analyzed in terms of load-displacement response, formation of crack, crack width, crack spacing and shift of neutral axis. An evaluation of the ductile response of three different beam specimens was made in combination with the ultimate load according to the three different concrete filling conditions.

1. 서론

최근의 급격한 경제 성장은 인구 과밀화, 시설물 집중현상, 사회 간접자본의 활발한 투자 및 사용자의 고급화 성향을 더욱더 가속화시키고 있다. 따라서 구조물의 건설은 대형화, 특수화, 초고층화 경향을 나타내고 있으며, 이에 상응하여 건설재료 성능 향상, 신구조공법과 설계기술 개발 및 다양한 시공능력의 향상

이 어느 때보다 절실히 요구되고 있다. 그러나 국내의 경우에는 불량재료 사용, 설계결함 및 부실시공 등이 원인이 되어 많은 구조물이 붕괴되는 대형사고가 빈발하여 건설공사 및 콘크리트 공사의 신뢰도는 크게 떨어져 있는 상황이다. 특히 부실시공이 가장 큰 원인으로서 매우 큰 문제로 여겨지고 있다. 이것은 건설재료의 성능향상과 설계기술 개발이 선행되어도 실제의 시공이 부실하게 이루어진다면 전체 구조물의 신뢰도는 크게 떨어질 수 밖에 없다는 것을 의미한다.

건설현장의 숙련기술공 부족, 인건비 급등 및 3-D 기피현상으로 인한 노동력 부족현상, 구조물의 초고층화 및 특수화 경향에 의한 고

* 금오공과대학교 토목공학과 조교수
** 삼성물산 건설 기술연구소 선임연구원
*** 한국종합기술개발공사 도로부 구조팀
**** 금오공과대학교 토목공학과 교수

밀도 배근 구조물의 증가현상, 구조물의 대형화 추세 및 콘크리트 펌프공법 발달 등의 이유로 대량타설이 많이 이루어지고 있는 현상, 그리고 설계시의 안전율을 들먹이는 시공자의 안이한 자세 등은 콘크리트의 충분한 다짐을 전제로한 밀실한 충전성의 확보를 어렵게 하는 경우가 많으며 이것은 부실공사의 대표적인 일례이기도 하다. 이처럼 안전하고 오래 쓸 수 있는 콘크리트 구조물의 기본조건인 타설시의 충전성 확보를 위해 다짐이 필요 없는 고유동성 콘크리트의 개발 연구가 많이 진행되고 있는 것은 우리나라 건설공사 여건상 필연적인 추세이며 매우 다행스런 일이라 아니할 수 없다. 그러나 고유동성 콘크리트 실용화 측면에서의 성과는 매우 미흡한 상태이다.

이것은 현장의 여러가지 환경변화 및 배근 상태에 따른 조건변화 등 불확실성이 많기 때문이다. 실제로 고유동성 콘크리트를 사용 다짐없이 타설하여 실제 구조물에 적용하였을 경우 고유동성 콘크리트가 제성능을 발휘하지 못하고 구조물의 일부분에서 재료분리 및 골재패쇄현상이 발생하여 충전이 제대로 되지 않는 경우가 발생할 수 있다^{1),2)}.

본연구에서는 실제로 발생할 수 있는 이러한 경우를 상정하여 고유동성 콘크리트를 개발하고 보부재 시험체를 제작 재하실험을 하여 예상되는 충전상황별 휨거동을 조사 분석하였다. 즉 고유동성 콘크리트가 제성능을 발휘하지 못한 경우에 구조물에 어떤 영향을 미치는가에 대해서 재료 및 구조적으로 제특성을 규명하는데 그 목적을 두고 있다. Fig.1에 본연구에서 예상하는 대표적 충전상황을 도식적으로 나타내었으며 완전충전, 중립축이상 충전 및 인장철근이하 불량충전의 세가지 상태를 실험변수로 하여 하중-변위 관계, 균열폭, 균열 간격, 균열 형상, 중립축 이동에 따른 부재거동 등에 관하여 비교 고찰하였다.

2. 고유동성 콘크리트의 재료특성

2.1 사용 재료 및 배합 설계

시멘트는 보통포틀랜드 시멘트, 굵은골재는 최대 치수가 19mm인 산지쇄석, 잔골재로는 강모래를 사용하였다. 혼화제로는 고로슬래그와 플라이 애쉬를 사용하였으며 나프탈렌계 고성능감수제를 혼화제로 사용하였다. Table 1에 본실험에서 사용한 고유동성 콘크리트의 배합설계표를 나타낸다. 제령 4일에서 탈형하였으며 상온상태에서 습윤양생을 하였다. 각종 시험 공시체 및 부재시험체에 타설할 경우 다짐작업을 하지 않았으며, 고유동성 콘크리트에서 일반적으로 요구하는 정도의 슬럼프 및 플로우값 보다는 약간 낮았으나 충전성에는 문제가 없었다.

재료분리 및 골재패쇄현상 등으로 인해 생기는 충전불량상태를 재현하기 위하여 부재시험체 타설시 거꾸집 상태를 거꾸로 놓고 고유동성 콘크리트를 타설하였으며, 중립축 이하 및 인장철근 이하 부분에 대해서는 불량콘크리트를 채워 넣었다. 여기서 불량콘크리트는 뚜렷한 배합비 없이 임의로 만들었으며 배합강도 100kgf/cm² 이하를 목표로 하였다.

2.2 재료강도 특성

압축강도 및 활렬인장강도는 $\phi 10\text{cm} \times 20\text{cm}$ 의 원주형 공시체를, 휨인장강도는 $15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 55\text{cm}$ 의 각주형 공시체를 사용하였으며, 부착강도는 $15\text{cm} \times 15\text{cm} \times 15\text{cm}$ 의 공시체에 D22철근을 매입한 것을 사용하였다. 강도시험 재하는 100ton 만능 시험기를 사용하였으며, 하중과 중립방향 변형률을 로드셀과 정적 변형률 측정 장치를 이용하여 동시에 측정하였다.

Table 2에 압축강도(f'_c), 휨인장강도(f'_t), 활렬인장강도(f'_t) 및 최대부착강도(τ_{\max}) 시험결과와 평균치를 나타낸다.

배합강도 400kgf/cm²로 배합 설계를 한 본실험에서의 평균 압축강도는 399kgf/cm²으로서 배

합강도에 거의 근접한 결과를 나타냈으며, 최대하중시의 증변형율은 0.0035정도이고 초기탄성계수는 $4.0 \times 10^5 \text{kgf/cm}^2$ 정도의 값을 얻었다.

그리고 불량콘크리트의 평균압축강도는 98kgf/cm^2 정도였다.

실험 결과 압축강도 400kgf/cm^2 의 고유동성 콘크리트의 평균휨인장강도는 33.3kgf/cm^2 정도로 나타났고 불량콘크리트에 대해서는 26.7kgf/cm^2 정도로 나타났다. 평균할렬인장강도는 46.7kgf/cm^2 정도이고 불량콘크리트에 대해서는 13.2kgf/cm^2 정도로 나타났다. 위 실험 결과를 ACI 363에서 제안된 식들과 비교하면^{3),4)} 본실험의 고유동성 콘크리트의 휨인장강도는 다소 낮게 나타났고 할렬인장강도는 비슷한 결과를 가져왔다.

부착강도 시험결과 콘크리트 압축강도 400kgf/cm^2 에 대해서는 평균최대부착강도가 53kgf/cm^2 정도이고 불량콘크리트에 대해서는 평균최대부착강도가 30kgf/cm^2 정도로 크게 나타났는데 슬립량은 400kgf/cm^2 에 비해 10배정도 크게 나오므로써 실제적으로 부착강도가 매우 낮은 것으로 평가된다.

3. 휨재하 실험 개요

철근콘크리트 보부재시험체의 형상, 크기 및 배근의 일례를 Fig.2에 나타내며, 시험체 제원 및 변동 인자를 Table 3에 나타낸다. 보 시험체의 제원은 단면높이 26cm(유효높이 21cm), 폭 14cm, 스펠 170cm(전단스펠비 4.0)로 시험체 수는 총 3개이다. 그리고 전단 구간에는 전단 파괴가 일어나지 않도록 스테럽을 충분히 배근하였다.

변동인자는 Table 4에 나타낸 것과 같이 콘크리트 충전상황별로 하였다. No.1시험체는 고유동성콘크리트로서 완전히 충전된 상태의 보부재이며, No.2시험체는 인장철근부의 골재 패쇄현상 등으로 인해 인장철근 이하면부터 불량콘크리트가 충전된상태의 부재를 말한다.

No.3시험체는 중립축이하(중국내력계산결과)에서 재료분리 등 기파괴 원인으로 불량콘크리트로 충전된 상태의 부재를 말한다. 휨 재하하는 유압잭을 이용한 하중제어방식과 시험체에 설치된 변위계를 이용한 변위 조절 방식을 병행한 방식으로서 1점재하를 실시하였다. 하중 측정은 로드셀을 이용하였으며 변위계를 보중앙점과 지점에서 35cm되는 지점의 3개소에 설치하여 변위분포를 측정하였다. 콘크리트 표면(압축부 및 인장부에 6개소) 및 인장주철근(중앙점을 중심으로 14개소)에는 스트레인게이지를 붙여서 변형률을 측정하였으며 스테럽의 변형율을 측정하기 위하여 전단에 대해 가장 위험 단면인, 지점에서 유효높이(21cm)만큼 떨어진 지점의 스테럽(2개소)에 스트레인게이지를 부착하였다. 전체 측정점은 정적변형율측정장치와 컴퓨터를 이용하여 5초 간격으로 동시에 기록하였다.

인장주철근에 쓰인 D22와 전단보강근으로 쓰인 D10의 인장시험결과를 Table 4에 나타낸다.

4. 휨거동 결과 및 분석

4.1 파괴형태 및 균열 발생상황

Table 5에 휨거동 실험 결과를 나타낸다.

균열 발생 상황은 부재 중앙으로부터 균열이 발생, 초기 하중 단계에서 1차균열 안정상태가 되며 하중이 더커지면서 2차균열이 발생하였다. 부재 항복후 내력이 증가하면서 하부단에서 2차균열이 1차균열에 결합되는 현상이 보였다. 균열 간격은 충전성이 불량할 수록 평균 균열 간격이 크게 나타났다. 하중증가시 충전양호일 때는 균열의 진척이 중립축까지 계속적으로 이어지나, 인장철근 이하 충전불량보(No.2)에서 인장단 초기균열은 일찍 발생하지만, 하중 증가에도 불구하고 균열의 진척이 인장철근 부분에서 콘크리트의 강도차로 인해 두 종류의 이질적인 콘크리트 접합부로 균열

이 진척되면서 대부분의 용력이 철근으로 분산되는 경향도 관측되었다. 전반적인 파괴양상은 취성적인 압축파괴 거동을 하였으며, No.1시험체(4GF)는 1.48ton에서 초기균열이 발생하여 3.22ton에서 균열의 분기현상이 관찰되었다. 12.5ton에서 보의 지점부에서 국부적인 지압파괴현상이 발생하였고 12.6ton에서는 모든 균열이 0.4mm정도의 균열폭 확대현상이 발생하였다. 최종적인 파괴양상은 압축부의 압축파괴로 파괴되었다. No.2시험체(4NFT)는 0.68ton에서 초기균열이 발생하여 인장철근주변의 콘크리트 신구접촉면에서 균열의 진전이 멈춤상태를 유지하였다. 이것은 일시적인 현상으로 하중이 증가하면서 No.1시험체와 비슷한 양상의 균열진전 및 파괴상태를 보였다.

최종적인 파괴양상으로 지점부의 인장철근 부분에서 부재 전장에 걸쳐 활열파괴현상이 관찰되었으나 주로 압축파괴의 현상으로 파괴되었다. No.3시험체(4NFN)는 No.1과 No.2공시체에 비해서 전반적으로 항복, 최대 파괴시의 내력이 낮았으며 부재 전반에 걸쳐 사인장균열의 발달이, 눈에 띄었다. 파괴시의 양상도 사인장균열 및 압축부의 압축파괴가 병행되어 급격한 취성파괴를 나타내었다.

4.2 하중-변위 관계

Fig.3은 전 시험체의 하중-변위 관계를 나타낸다.

고유동성 콘크리트를 이용하여 충전 상황별 휨거동을 고려한 본 실험의 경우 전반적인 경향은 충전성이 양호할수록 아주 연성적으로 나타났고 휨내력은 대체로 증가하는 것을 볼 수 있다. 연성적인 면에서도 완전충전한 No.1 시험체가 연성적으로 나타났으며 충전성이 불량할수록 취성적으로 나타났고 충전성이 가장 불량한 No.3시험체(중립축이하 충전불량)의 경우는 최대내력 도달직후 급격한 압축파괴 양상을 나타냈다.

5. 결론

(1) 본실험에서 사용한 고유동성 콘크리트의 배합설계는 거의 목표강도에 근접한 압축강도를 나타냈으며, 유동성과 충전성도 양호하게 나타났다. 따라서 본 실험에 사용한 배합 설계는 향후 고유동성 콘크리트의 배합설계로서 유용할 것으로 사료된다.

(2) 고유동 콘크리트의 충전상태의 정도가 불량해지는 순으로 (충전양호→인장철근이하 충전불량→중립축이하 충전불량) 취성적 파괴양상을 나타냈고, 인성비(δ_u/δ_y) 및 종국상태의 강도도 감소하는 경향을 나타냈다.

(3) 콘크리트의 충전 상황별 균열 진전 상황은 대체로 비슷한 양상을 보였으나, 중립축이하 충전불량의 시험체는 사인장균열인 복부전단 균열이 뚜렷이 발생하였다. 따라서 고유동 콘크리트의 충전 불량 상태가 심각한 전단파괴를 초래할 수 있으므로 타설시 주의해야 한다.

감사의 글

본연구는 건설교통부의 95년 건설기술연구개발사업 일환으로 실행된 연구이며, 실험을 도와준 금오공대 구조공학연구실 대학원생 그리고 각종실험재료를 공급해주신 구미레미콘, 경기화학 및 삼성건설 시험실의 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) 장일영, 박희민, “하이퍼포먼스 콘크리트의 가능성”, 콘크리트 학회지 제4권 2호, pp. 45-50, 1992. 6.
- (2) 윤영수, 신성우, 장일영, “국내의 고성능 콘크리트에 대한 최근의 연구동향”, 콘크리트 학회지, 제7권 5호, pp.51-57, 1995.10.
- (3) 장일영, 이호범, 변근주, “초고강도 콘크리트의 재료특성 및 휨 거동에 관한 실험적

연구”, 콘크리트 학회지 제4권 2호,
pp.111-118, 1992. 6.

(4) ACI-363, "State of the Art Report on
High-Strength Concrete", ACI Journal, Vol.81,
No.4, pp.1009-1056, July-Aug. 1984.

Table.1 Mix proportions of High performance concrete

Comp. Strength (kgf/cm ²)	W/C (%)	S/a (%)	(Fl+Sl) /B (%)	Max. Agg. (mm)	Unit Weight (kgf/m ³)							Slump Range (cm)	Flow Range (cm)
					W	C	Fl	Sl	G	S	Admix. (%)		
400	43	54	10	19	185	387.0	21.5	21.5	720	860	0.70	20±2	44±10

※ B = C(Cement) + Fl(Fly Ash) + Sl(Slag)

Table.2 Strength property of concrete

Type	f _c ' (kgf/cm ²)	f _t ' (kgf/cm ²)	f _r (kgf/cm ²)	τ _{max} (kgf/cm ²)
High-pe. Con.	399	46.7	33.3	53
Bad Con.	98	13.2	26.7	30

Table.3 Properties of specimens

No.	Tensile rebar		Stirrup			b×d	σ _{ck} kgf/cm ²	Filling Condition	ρ _b (%)	ρ _v ρ _b (%)	Shape of bar
	No. of bar	ρ _t (%)	No. of bar	Spacing (cm)	ρ _w (%)						
1	2D22	2.63	D10	10	1.02	14×21	400	완전충전	3.93	66.9	Def.
2	2D22	2.63	D10	10	1.02	14×21	400	인장철근 이하불량	3.93	66.9	Def.
3	2D22	2.63	D10	10	1.02	14×21	400	중립축 이하불량	3.93	66.9	Def.

Table.4 Strength Properties of steel

Type	Yield Strength (kg/cm ²)	Yield Strain (μ)	Modulus of Elasticity (kg/cm ²)	Max. Strength (kg/cm ²)	Elongation (%)
D10	3155	2186	1.49×10 ⁶	4697	12.5
D22	3874	4912	0.91×10 ⁶	6265	28.4

Table.5 Flexural behavior of beams

No.	Initial crack			Yielding of bar			Max. strength			Ultimate status		δ_u/δ_y	Crack spacing		Failure mode
	Load (tonf)	Dis. (mm)	Comp. strain (μ)	Load (tonf)	Dis. (mm)	Comp. strain (μ)	Load (tonf)	Dis. (mm)	Comp. strain (μ)	Load (tonf)	Dis. (mm)		Max. (cm)	Ave. (cm)	
1	1.48	0.682	104	15.45	8.5	1787	16.75	17.3	3325	14.24	31	3.65	25	8.4	압축
2	0.68	0.292	48	16.20	9.05	2242	17.16	12.0	-	14.59	27	2.98	22	10.9	압축
3	0.89	0.458	54	16.30	13.5	2024	16.64	15.9	-	14.14	22	1.63	19	11.5	압축

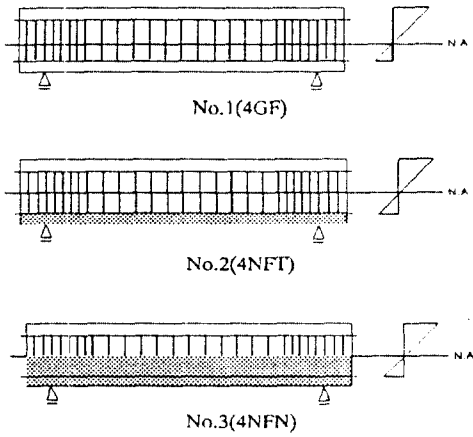


Fig.1 Filling conditions of beam members

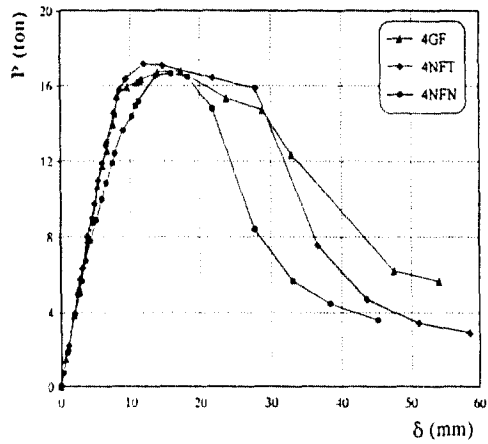


Fig.3 Load-displacement curves

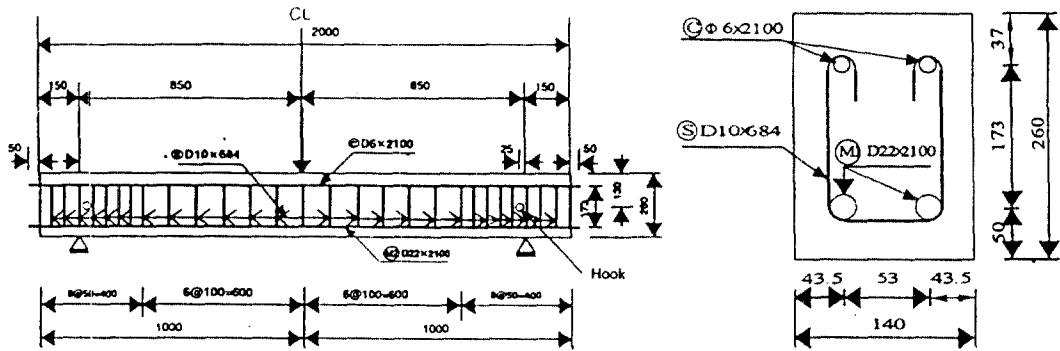


Fig.2 Details of beam specimens