

진동제어 콘크리트 보의 하중단계에 따른 동적특성에 관한 실험적 연구

Experimental Study on Dynamic Characteristics of Damage-Controlled Concrete Beam

최우성* 이대형** 전환석*** 정영수****
Choi, Woo Sung Lee, Dae Hyoung Chun, Hwan Suk Chung, Young Soo

Abstract

Recently, the construction of infrastructures has been booming and accelerating to keep up with rapid economic growth. Construction activities and operation of transportation facilities cause unfavorable effects such as civil petitions associated with vibration-induced damages or nuisances. The objective of this study is to develop vibration-controlled concrete using various vibration-controlling materials, and also to investigate dynamic properties of concrete beam depending on damage level. Vibration -controlled mixtures are latex, rubber powder and plastic resin, which have been determined to by and large reduce vibration. KS F2437 has been used to figure out 1st natural frequency and dynamic flexural rigidity. Dynamic damping ratios have been computed by adopting the polynomial curvefitting method on the frequency spectrum curve, of which results have been compared and analyzed hereon.

1. 서 론

오늘날 과학기술의 발달은 긴 교량, 고층건물, 우주선, 선박과 같은 거대한 구조물이나 자동차, 철도 차량, 비행기와 같은 운송수단의 발달과 더불어 최근의 각종 사회시설의 확충에 따른 건설공사 및 교통시설 등의 변천과정에서 진동에 대한 지식의 중요성이 날로 커지고 있다. 진동이론의 발달은 물리학

* 정회원, 중앙대 대학원 토목공학과 석사과정
** 정회원, 중앙대 대학원 토목공학과 박사과정
*** 정회원, 중앙대 대학원 토목공학과 석사과정
**** 정회원, 중앙대학교 토목공학과 부교수

의 역학분야의 발전과 수학의 도움으로 이룩되었고 전산기기의 급속한 발전과 더불어 근사해를 얻을 수 있어 설계분야에 적용할 수 있게 되었다.

본 연구는 각종 제진재료를 이용하여 진동을 억제할 수 있는 콘크리트를 개발하여 각종 건설공사에서 흔히 발생할 수 있는 진동공해문제를 억제하고자 하며 비파괴 진동실험을 통하여 구조물의 손상정도를 파악할 수 있는 방법을 모색하고자 한다.

즉, 콘크리트 구조물의 균열에 따른 진동수의 추이를 평가하여 대상구조물의 사용성을 평가하고자 하는데 그 의의가 있다. 우선, 제진재료를 이용한 배합비를 찾고, 선정된 적정배합비에 따른 진동시험체를 제작하여 재료의 동적특성 즉 1차공명진동수와 감쇠비를 측정하여 제진효과를 조사하였다. 제진재료로서는 Latex, Rubber Powder 그리고 Plastic Resin을 사용하였으며 진동의 구조적 감쇠효과를 파악하고자 제진재료를 이용한 콘크리트보를 제작하여 실험을 실시하였다. 실험방법으로는 KS F2437 규정을 사용하였으며, 감쇠비 측정은 Frequency Spectrum곡선에 대한 Polynomial Curvefitting방법을 이용하여 결과를 비교·분석하였다.

2. 배합실험

2.1 사용재료

각종의 제진재료를 이용한 콘크리트보를 제작하여 시험편의 동적특성을 파악하였다. 사용된 주요 재료는 S사의 1종 보통포틀랜드 시멘트, 단위중량이고 조립율 2.60 수준인 안성지역 표준사를 이용하였다. 한편, 강도를 증진시키기 위하여 S사의 고성능감수제(멜라민계)를 사용하였으며 슬럼프 값(콘크리트의 슬럼프 시험방법 KS F 2402에 의한 결과)을 일정하게 하기 위하여 감수제의 양을 조절하였다.

한편, 동적하중의 재하시 발생하는 진동의 크기를 억제하는 효과를 위해 사용된 Latex는 국내 K사의 KSL203제품을 사용하였으며 성분은 표1과 같다. 그리고, 국내 K사의 Rubber Powder 및 국내 Y사의 Plastic Resin의 주요한 성분은 표2 및 표3에 기술하였고, 철근은 D16(주철근), D13(스터립철근)을 배근하였다. 실험에 사용된 제진 콘크리트시험체의 제원은 230×20×20cm으로 그림 1과 같다.

표 1 Chemical Properties of Latex KSL203

Solidity ingredient (%)	50
pH (25 °C)	8.5
Surface tension (20 °C) (dyn/cm)	50
BF Viscosity (BM, 25 °C) (cps)	70
Gravity (25 °C)	1.04
Mechanical Stability	양호
Chemical Stability	양호

표 2 Chemical Properties of Rubber Powder KTR101

Styrene Content(%)	30
Volatile Matter(%)	Max 1
Ash Content(%)	Max 0.6
Solution Viscosity(cps)	4500
Melt Flow Rate, 200°C/5kg (g/10min)	< 1
Specific Gravity	0.94
Hardness	78
Tensile Strength (Mpa)	25
Tensile Modulus (Mpa)	2.5
Elongation (%)	750

표 3 Chemical Properties of Plastic Resin B360F

Chemical Properties		Testing method	Unit	Value
MI		ASTM D1238	g/10min	16.0
Density		ASTM D792	g/cm ³	0.90
Formative Contraction		YUKONG	%	1.6
Du Pont Impact	23℃	Du Pont	kg · cm	63
	-10℃			50
Flexural Modulus		ASTM D790	kg/cm ²	14,000
Rockwell Hardness		ASTM D795	R scale	89
Tensile Strength (yield)		ASTM D638	kg/cm ²	260
Elongation (Break)		ASTM D638	%	130
Heat deformation temperature		ASTM D648	℃	98
Vicat Softening Point		ASTM D1525	℃	150

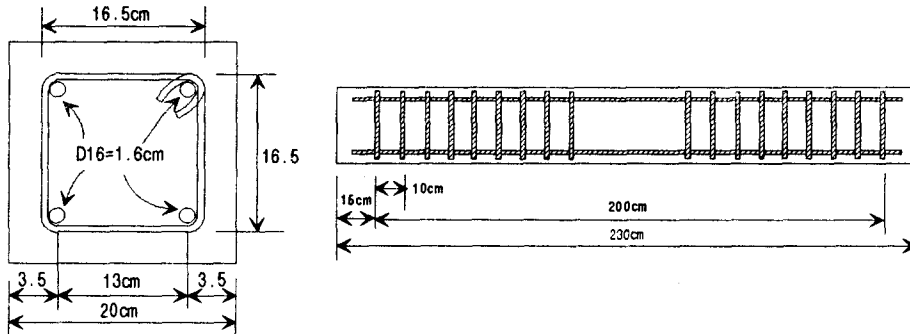


그림 1 시험체의 제원

2.2 압축강도 시험

배합은 기존의 제진콘크리트 몰탈의 실험결과에 따라 압축강도가 양호하게 나타난 배합비를 기준으로

표 4 배합표 및 압축강도 실험결과

구분	G_{max} (mm)	Slump (cm)	V_o (%)	단위량 (kg/m^3)						7일 강도	28일 강도
				물	시멘트	제진재 및 혼입물	잔골재	굵은골재	고성능 감수제		
기준콘크리트	19	13	2.0	168	350	-	717	1.144	5.25	244	280
고무분말		11	2.2		332.5	17.5 (5%)	704	1.119	6.98	165	272
		12	2.1		315	35 (10%)	689	1.100	15.63	72	133
레진		13	2.0		332.5	17.5 (5%)	704	1.125	4.90	205	347
		13.7	2.0		315	35 (10%)	694	1.103	4.90	167	273
라텍스 (액상)		11	1.8		332.5	17.5 (5%)	704	1.125	4.55	198	379
	11	2.0	315	35 (10%)	694	1.106	4.20	185	276		

로 하였으며, 압축강도 시험은 KS F2405에 따라 실시하였다. 실험결과는 다음 표4와 같다. 제진재료를 이용한 제진콘크리트의 압축강도실험을 실시한 결과 Plastic Resin과 Latex콘크리트의 경우 배합비(시멘트 량에 대한 제진재료의 중량비)가 5%인 경우 7일강도는 약간 떨어졌으나 28일강도의 경우 일반콘크리트에 비해 27%정도 크게 나타났으며 배합비 10%인 경우 일반콘크리트와 거의 비슷한 강도를 보이고 있다. 이는 시멘트 물탈에 의한 실험결과와 상이한 것으로 제진재료를 혼입한 경우가 일반콘크리트에 비해서 압축강도의 저하가 나타났으나 골재의 배합여부에 따라 강도가 증가하는 경향으로 상반되게 나타났다.

3. 진동실험

감쇠비를 파악하기 위하여 보시험체에 가진해머에 의해 진동을 유발하여 공명진동실험을 수행하였다. 공명진동실험은 휨진동에 의한 공명진동수를 구한 후 이 진동수를 이용하여 휨강성(Flexural Rigidity) 과 감쇠비(Damping Ratio)를 구한다. 시험체를 양단힌지상태에서 하단부를 4등분하여 각 하단부 아래 5군데에 가속도계를 부착하여 저 주파수특성을 잘 나타내는

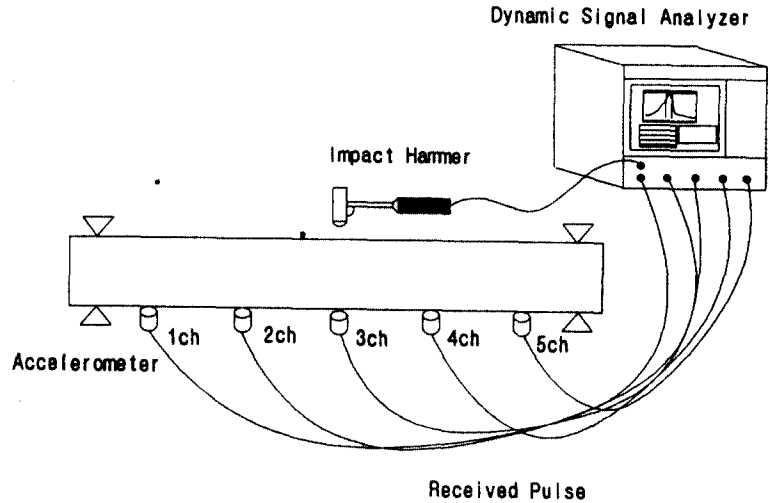


그림 2 진동실험 광경

고무 tip을 이용한 가진해머로 진동을 유발시켜 FFT Analyzer에서 각 지점에서의 진동수와 감쇠비를 구하였고 진동실험개략도는 그림2와 같다. 이는 동일한 시험체내에서 각 절점에서의 진동수와 감쇠비의 차이를 조사하였다. 일반 콘크리트에 대해 균열을 가하여 거동양상, 1차공명진동수, 감쇠비의 차이를 조사하였으며, 아울러 추후에 단계적인 하중을 가하여 균열을 발생시킨 후 진동수와 감쇠비의 변화를 비교 분석하고자 한다. 이러한 연구결과를 바탕으로 균열의 진행에 따라 시험체의 사용연한을 추정하며 이에 따라 기존의 구조물에 대한 내구성에 대한 판단을 비파괴 실험을 통하여 손쉽게 파악하고자 하였다.

3.1 휨 강성의 산출

공명진동실험법에 의한 진동특성 즉, 휨 강성을 파악하기 위하여 1차공명진동수를 측정하였으며 이는 변형진동에 의한 진동실험을 실시하였다. 실험방법은 KS F 2437에 따라 실시하였다. 측정된 진동수에 따라 휨 강성을 산출하였으며 각 배합에 따른 1차 공명진동수와 휨 강성은 다음 표5와 같다. 휨 강성 $(EI)_d$ 은 아래식과 같이 측정된 1차 공명진동수값을 이용하여 산출하였다.

$$(EI)_d = \frac{4}{\pi^2} \mu l^4 f_n^2 \quad (1)$$

표 5 휨 강성 실험결과

공시체명	채널	$\mu (t/m)$	L(m)	$f_n(Hz)$	$(EI)_d (t m^2)$	압축강도(27일) (kg/cm^2)
N1	1ch	0.10087	2.30	80.22	349.87	280
	2ch	0.10087		80.12	348.99	
	3ch	0.10087		80.36	351.09	
	4ch	0.10087		80.56	352.84	
	5ch	0.10087		80.25	350.13	
N2	1ch	0.10066		53.3	154.13	279
	2ch	0.10066		52.97	152.23	
	3ch	0.10066		53.07	152.80	
	4ch	0.10066		53.11	153.03	
	5ch	0.10066		53.4	154.71	
L5	1ch	0.09997		70.84	270.40	272
	2ch	0.09997		70.83	270.32	
	3ch	0.09997		70.76	269.79	
	4ch	0.09997		70.8	270.09	
	5ch	0.09997		70.73	269.56	
L10	1ch	0.09931		74.59	297.80	133
	2ch	0.09931		74.54	297.40	
	3ch	0.09931		74.38	296.13	
	4ch	0.09931		75.27	303.26	
	5ch	0.09931		74.65	298.28	
RP5	1ch	0.09876		83.34	369.71	347
	2ch	0.09876		83.31	369.44	
	3ch	0.09876		83.28	369.18	
	4ch	0.09876		83.08	367.41	
	5ch	0.09876		83.43	370.51	
RP10	1ch	0.09786	71.69	271.08	273	
	2ch	0.09786	69.99	258.38		
	3ch	0.09786	70.29	260.60		
	4ch	0.09786	70.84	264.69		
	5ch	0.09786	73.51	285.02		
PR5	1ch	0.09873	78.02	323.92	379	
	2ch	0.09873	77.88	322.76		
	3ch	0.09873	77.75	321.68		
	4ch	0.09873	77.73	321.51		
	5ch	0.09873	77.96	323.42		
PR10	1ch	0.09811	75.73	303.27	276	
	2ch	0.09811	75.94	304.95		
	3ch	0.09811	76.81	311.98		
	4ch	0.09811	76.91	312.79		
	5ch	0.09811	76.7	311.08		

식 1에서 μ 는 단위 길이당 질량, l 은 유효길이, f_n 은 1차공명진동수값을 나타낸다.

아래 표에서 N1(비균열), N2(균열)은 일반콘크리트이며 L은 Latex, RP는 Rubber Powder, PR은 Plastic Rasin을 나타낸다.

3.2 감쇠비의 측정

제진콘크리트의 하단부에서 각 지점에서의 감쇠비를 측정하기 위하여 Polynomial Curvefitting Method를 이용하여 감쇠비를 측정하였다.

가. Polynomial Curvefitting Method

휨 진동실험은 양단힌지 상태의 시험체의 중앙부 상부에 충격해머로서 가진하여 시험체 중앙부 하단에 부착된 5ch 가속도 감지기로부터 가속도 곡선을 측정하였다. 측정된 가속도 곡선은 SA390 FFT Analyzer로 Fourier 변환된 Frequency Spectrum곡선의 Real Part로부터 1차공명진동곡선을 구하여 그림3과 같이 시험체의 감쇠비를 계산하였다. 감쇠비 계산을 위한 Curve Fitting Model은 다음과 같다.

$$H(iw) = \frac{(r_2 \sigma_k r_{1,k} w_k + i r_{2,k} w)}{(\sigma_k^2 + w_k^2 - w^2 + 2i \sigma_k w)} + A_0 + A_1(iw) + A_2(-w^2)$$

여기서, A_0, A_1, A_2 는 Residual function coefficients를 나타내며 σ_k 는 k 번째 모드의 감쇠비, W_k 는 Modal Frequency이다. 또한, Dual Channel Analysis에서 Frequency Response Function은

$$H_{ijk} = \sum_{k=1}^n \left[\frac{r_{ijk}}{s - p_k} + \frac{r_{ijk}^*}{s - p_k^*} \right]$$

이고 여기에서,

$p_k = -\sigma_k + jw_k$ i 및 j 는 각각 Response 및 Input를 나타내며 k 는 DOF, s 는 Laplace Variable을 의미한다.

그림 3은 라텍스10%의 1ch에 대한 감쇠비분석 그림이며 전체 시험시편에 대한 1차공명진동수 및 감쇠비 결과는 표 6과 같다.

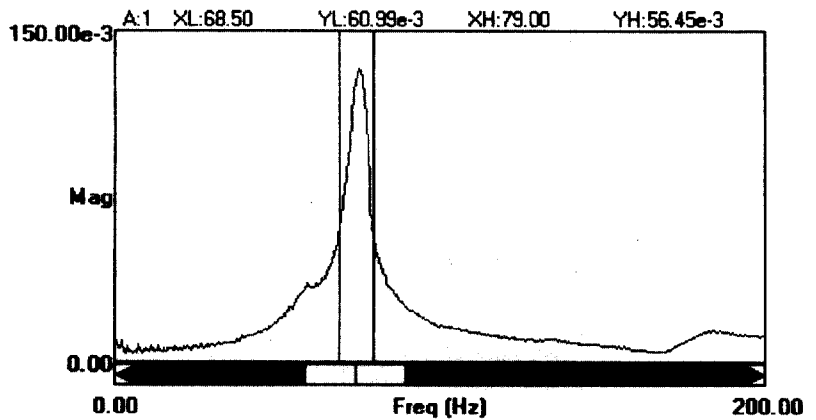


그림 3 라텍스10%(L10) 1CH

4. 연구수행 종합평가

4.1 휨 강성

공명진동실험법에 의해 1차공명진동수를 구하고 이를 이용하여 휨 강성을 구한결과 제진콘크리트의 휨강성 $((EI)_d (tm^2))$ 의 범위는 $156t \cdot m^2 \sim 369t \cdot m^2$ 정도로 나타났고 1차 공명진동수가 상대적으로 크게 나타난 Rubber Powder계열에서 크게 나타났다.

표 6 제진콘크리트의 감쇠비 측정결과

공시체명		1st. mode				
		1Ch.	2Ch.	3Ch.	4Ch.	5Ch.
N1	f (Hz)	80.22	80.12	80.36	80.56	80.25
	D(%)	2.84	2.65	2.66	2.75	2.56
N2	f (Hz)	53.3	52.97	53.07	53.11	53.4
	D(%)	1.47	1.73	1.51	1.64	1.49
L5%	f (Hz)	70.84	70.83	70.76	70.80	70.73
	D(%)	1.69	1.65	1.7	1.77	1.70
L10%	f (Hz)	74.59	74.54	74.38	75.27	74.65
	D(%)	5.6	4.06	4.31	4.01	3.33
R.P5%	f (Hz)	83.34	83.31	83.28	83.08	83.43
	D(%)	2.13	2.20	2.72	2.57	2.20
R.P10%	f (Hz)	71.69	69.99	70.29	70.84	73.51
	D(%)	4.32	3.95	2.96	2.85	3.56
P.R5%	f (Hz)	78.02	77.88	77.75	77.73	77.96
	D(%)	3.03	3.01	3.02	3.06	3.19
P.R10%	f (Hz)	75.73	75.94	76.81	76.91	76.7
	D(%)	4.81	5.15	4.42	4.34	4.76

4.2 감쇠비

가. 균열 전

Polynomial Curvefitting Method에 의한 감쇠비 측정결과는 표 6에 나타내었다. 이러한 결과로부터 PR10%와 L10%에서 가장 높은 감쇠비를 얻을 수 있었으며 모든 시험체에서 각 절점에서의 감

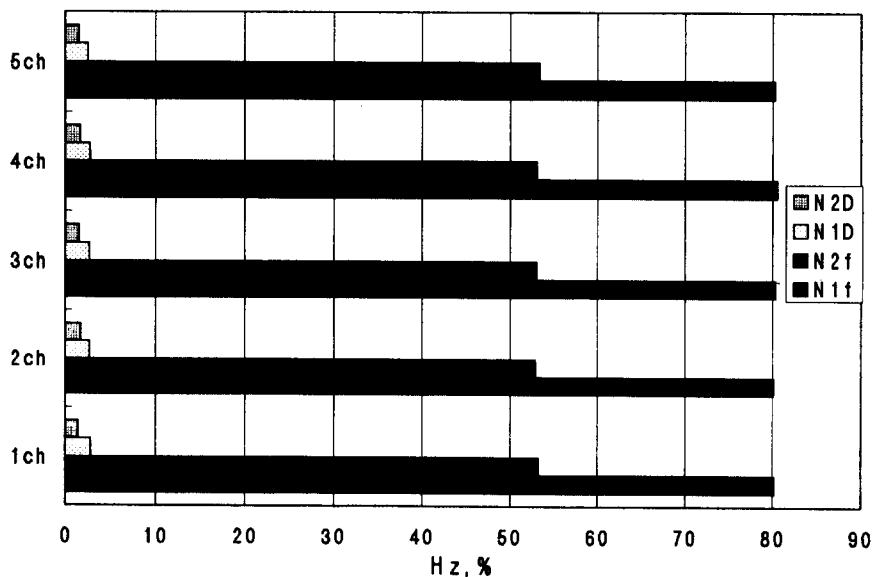


그림 4 Damage에 따른 1차공명진동수와 감쇠비

쇠비는 거의 유사하게 나타났다. 대체적인 1차공명진동수의 범위는 52~83Hz정도로 나타났고, 진동수와 감쇠비와의 관계는 예상했던대로 무관함을 알 수 있었다.

나. 균열 후

제진제가 첨가되지 않은 일반콘크리트에 대해 Pilot Test를 수행한 결과 항복강도는 6.13t 나타났고, 완전한 균열 후 그림 4에서와 같이 1차공명진동수와 감쇠비의 저하현상이 나타났다.

5. 결론 및 추후연구과제

위 실험에서는 철근과 골재배합이 실험결과에 다소나마 영향을 미친 것으로 나타났고 Rubber Powder 10%와 Latex 10% 시험체 경우 가장 일반콘크리트에 근접한 압축강도와 함께 상대적으로 높은 Damping Ratio를 얻어 수 있었다.

비균열 시험체에서는 보전체에서 유사한 진동수 및 감쇠비, 균열 후 진동수와 감쇠비의 저하현상이 추후 균열단면에서의 진동수 및 감쇠비를 측정하고자한다. 이를 위해서 콘크리트의 균열모멘트와 재하하중에 의한 모멘트의 비 즉, (M/M_c) 에 따른 진동수와 감쇠비의 추이를 조사하고자 하며 일반적인 콘크리트에 있어서 비균열단면의 고유진동수와 균열단면의 고유진동수를 비교하여 단면의 손상정도 및 균열정도를 예측하기 위한 지침을 마련하고자 한다.

참 고 문 헌

- 1 박 승범, 문운당 "최신토목재료 실험", 1994
- 2 Richart, Hall and woods "Vibrations of soils and foundations"
- 3 한국공업규격, "콘크리트 공시체의 가로 세로 및 비틀림 1차 주파수 실험방법", 한국공업진흥청, 1990
- 4 日本工業規格, JIS A 1127-1976, 共鳴振動によるコンクリートの剪断弹性係數, 動せん断弹性係數及びポアソン比實驗方法
- 5 ACI, "Designing for Creep and Shrinkage in Concrete Structures, SP-76, 1983
- 6 정 영수, 이 대형, 최 우성 "진동제어 콘크리트 개발에 관한 실험적 연구" 한국콘크리트학회 봄 학술발표회 논문집, 1996
- 7 정 영수, 이 대형 "진동억제 콘크리트의 물성에 관한 실험적 연구" 대한토목학회 학술발표회 논문집, 1995