

진동제어 콘크리트 보의 동적특성에 관한 연구

Experimental Study on Dynamic Property of Vibration-Controlled Concrete Beam

최우성*
Choi, Woo Sung

정영수**
Chung, Young Soo

김현호***
Kim, Hyun Ho

이상형****
Lee, Sang Hyong

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.

Vibration-controlled mixtures are latex, rubber powder and plastic resin, which have been determined to reduce vibration by and large reduce vibration. KS F2437 and travel time method have been used to figure out 1st natural frequency and dynamic elastic moduli. Dynamic damping ratios have been computed by adopting the polynomial curvefitting method and the geometric analysis method on the frequency spectrum curve, of which results have been compared and analyzed hereon.

1. 서 론

최근의 각종 사회시설의 확충에 따른 건설공사 및 교통시설등은 많은 진동을 유발하여 사회적인 문제를 야기하고 있는 실정이다. 본 연구는 각종 제진재료를 이용하여 진동을 억제할 수 있는 콘크리트를 개발하여 각종 건설공사에서 흔히 발생할 수 있는 진동공해문제를 억제하고자 한다. 선정된 적정배합비에 따른 진동시험체를 제작하여 재료의 동적특성 즉 1차공명진동수와 동탄성계수 및 감쇄비를 측정하여 제진효과를 조사하였다. 제진재료로서는 Latex, Rubber Powder 그리고 Plastic Resin을

-
- * 정회원, 중앙대 토목공학과 석사과정
 - ** 편집이사, 토목공학과 부교수, 공학박사
 - *** 중앙대 토목공학과 석사과정
 - **** 중앙대 토목공학과 석사과정

사용하였으며 진동의 구조적 감쇄효과를 파악하고자 제진재료를 이용한 콘크리트보를 제작하여 실험을 실시하였다. 실험방법으로는 KS F2437 규정과 진동과의 속도법을 사용하였으며, 감쇄비 측정은 Frequency Spectrum곡선에 대한 Polynomial Curvefitting방법과 기하학적 해석방법을 이용하여 각각의 결과를 비교·분석하였다.

2. 연구수행범위

제진재료를 이용한 콘크리트보를 제작하여 시험편의 동적특성을 파악하였다. 제진콘크리트보의 제원은 다음 그림 1과 같으며 사용한 재료들은 다음과 같다.

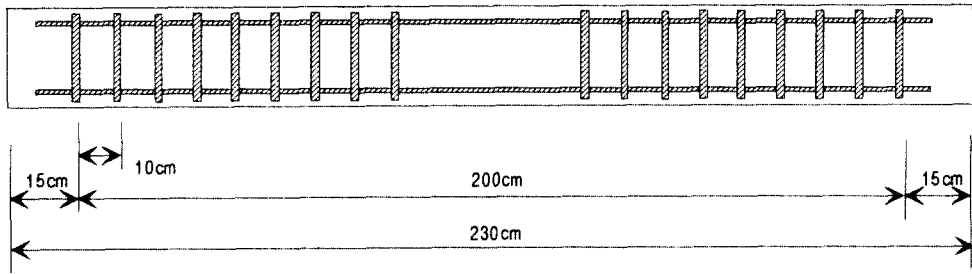


그림 1 시험체의 제원

본 연구에서는 기포제에 의한 제진콘크리트 시험편은 골재와의 배합에 의해 기포가 소멸됨에 따라 기포콘크리트 시험편은 제작하지 않았다.

2.1 배합 및 압축강도

- 가. 사용재료 ① 사용시멘트 : 1종 포틀랜드 시멘트
 ② 혼화제 : 공기 연행제 (Pozzolit : AEA 303)
 ③ SAND : 일반강사 (錦江砂) 조립율 2.60 수준
 ④ 철근 : D16(주철근), D13(스터럽철근)
 ⑤ 잔골재 및 굵은 골재

나. 강도시험 : 배합은 기존의 제진콘크리트 몰탈의 실험결과에 따라 압축강도가 양호하게 나타난 배합비를 기준으로 하였으며, 압축강도 시험은 KS F2405에 따라 실시하였다. 실험결과는 다음 표 1과 같다.

다. 실험결과에 대한 평가

제진재료를 이용한 제진콘크리트의 압축강도실험을 실시한 결과 Plastic Resin과 Latex콘크리트의 경우 배합비(시멘트 량에 대한 제진재료의 중량비)가 5%인 경우 7일강도는 약간 떨어졌으나 28일 강도의 경우 일반콘크리트에 비해 27%정도 크게 나타났으며 배합비 10%인 경우 일반콘크리트와 거의 비슷한 강도를 보이고 있다. 이는 시멘트 몰탈에 의한 실험결과와 상이한 것으로 제진재료를 혼입

한 경우가 일반콘크리트에 비해서 압축강도의 저하가 나타났으나 골재의 배합여부에 따라 강도가 증가하는 경향으로 상반되게 나타났다.

표 1 배합표 및 압축강도 실험결과

구분	G_{max} (mm)	$Skomp$ (cm)	V_o (%)	단위량 (kg/m^3)					7일 강도	28일 강도	
				물	시멘트	제진재 및 혼입물	잔골재	굵은 골재			고성능 감수제
기준콘크리트	19	13	2.0	168	350	-	717	1.144	5.25	244	280
고무 분말		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

3. 진동실험

동탄성계수, 감쇄비를 파악하기 위하여 도달시간실험과 공명진동실험을 수행하였다. 이는 초음파속도법에 의한 콘크리트의 동탄성계수 시험방법에 의한 실험을 수행하였으며 ASTM표준시험방법과 같다. 공명진동실험은 종진동 및 비틀림진동에 의한 공명진동수를 구한 후 이 진동수를 이용하여 동탄성계수를 구한다. 도달시간실험, 공명진동수 실험환경은 그림2와 같다. 그리고 보시험체에 가진해머에 의해 진동을 유발하여 시험체 아래 5군데에 가속도계를 부착하여 진동수와 감쇄비를 구하였고 실험환경은 그림3과 같다.

3.1 구속탄성계수 및 동탄성계수의 산출

가. 도달시간법

도달시간법에 의한 실험결과는 다음 표2와 같으며 실험에 있어서 파의 속도에 비하여 시험체의 길이가 짧기 때문에 배합에 관계없이 같은 실험결과를 나타내는 경우가 발생하였다. 따라서 시험체에 있어서 구속탄성계수를 파악하기 위하여 파의 전달속도를 구하여 구속탄성계수를 구하는 방법은 상당히 정도가 높은 실험기를 이용하여야 할 것으로 사료된다. 동탄성계수는 시방서에 의한 정탄성계수에 비해 약 25%크게 나타났다. 종파의 전달속도는 $v_c = L/t$ 로서 v_c 는 종파의 속도, L 은 시험체의 길이, t 는 도달시간(Travel Time)이다. 종파의 전달속도를 구속탄성계수의 함수로 나타내면 $v_p = \left(\frac{E_p}{\rho}\right)^{\frac{1}{2}}$ 이며, E_p 는 구속탄성계수(Confined Modulus), ρ 는 시험체의 밀도로서 $\rho = \frac{r}{g}$ 로 쓸 수 있다. 따라서, $E_p = \rho v_p^2$ 식을 이용하여 재료의 동적특성 즉, 구속탄성계수(E_p)를 계산할 수 있으며 도달시간법에 의한 재령 28일 이상 시험체의 동적특성실험결과는 표2에 정리하였다.

나. 공명진동실험법

공명진동실험법에 의한 진동특성을 파악하기 위하여 1차공명진동수를 측정하였으며 이는 종진동에

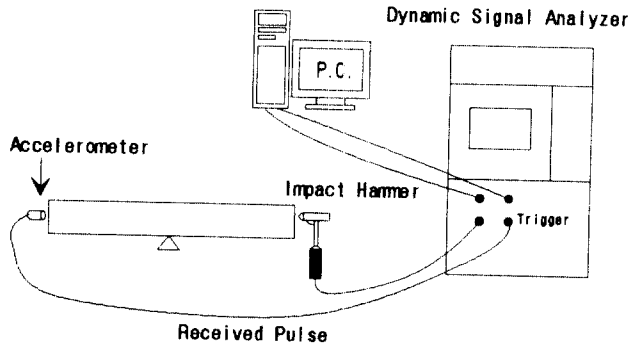


그림 2 진동 실험 광경

의한 진동실험을 실시하였다. 실험방법은 KS F 2437에 따라 실시하였다. 측정된 진동수에 따라 동탄성계수를 산출하였으며 각 배합에 따른 1차공명진동수와 동탄성계수는 다음 표3과 같다. 종파에 의한 탄성계수($E_{종}$)는 아래식과 같이 측정된 1차 공명진동수값을 이용하여 산출하였으며, 지점조건을 변화시키면서 즉 시험체를 중앙지지점과 양단지지점으로 하여 실험을 수행하였다. 한편, 휨진동에 의한 동탄성계수($E_{휨}$)는 마찬가지로 1차 공명진동수로부터 구

할 수 있으며 양단지지점조건으로 동탄성계수를 구하였다.

$$E_{종} = C_1 W f_1^2,$$

$$E_{휨} = C_2 W f_2^2$$

상기 식에서 f_1, f_2 는 각각 종파, 휨진동과의 가속도곡선의 1차공명진동수값을 나타내며, W 는 시험체의 중량을 나타낸다. 그리고 $C_1 = 408 \times 10^5 \frac{L}{A} (s^2/cm^2)$, $C_2 = 960 \times 10^6 \times \frac{L^3 T}{bt^3} (s^2/cm^2)$ 로서 L 은 시험체의 길이, A 는 시험체의 단면적, T 는 수정계수로서 본 실험에서는 2.165를 사용하였다.

3.2 감쇄비의 측정

본 연구의 최종적인 목표인 제진콘크리트의 감쇄비를 측정하기 위하여 Polynomial Curvefitting Method와 기하학적인 해석방법을 이용하여 감쇄비를 측정하였다.

표 2 도달시간법에 의한 실험결과

공시 체명	시 간			J	$V_c=2,$	E_p	E
	T_1	T_2	ΔT				
N1	1.159E-3	1.647E-3	0.488E-3	888	410320	411816	250998
N2	1.098E-3	1.586E-3	0.488E-3	880	406560	404301	250998
N3	1.098E-3	1.647E-3	0.549E-3	904	417648	426655	250998
N4	1.159E-3	1.647E-3	0.488E-3	880	406560	404301	250998
L5	1.098E-3	1.647E-3	0.549E-3	832	384384	361399	292018
L10	1.098E-3	1.647E-3	0.549E-3	824	380688	354482	249198
R.P5	1.037E-3	1.586E-3	0.549E-3	856	395472	382549	247386
R.P10	1.037E-3	1.647E-3	0.610E-3	864	399168	389733	172988
P.R5	1.159E-3	1.709E-3	0.549E-3	856	395532	382665	279419
P.R10	1.159E-3	1.709E-3	0.549E-3	864	399232	389859	247840

표 3 공명진동수실험법에 의한 실험결과

frequency			$E_{종}$	$E_{휨}$	$G_{전단}$
종진동	전단	휨진동			
888	432	736	412117	9403987	115342
880	504	745	404598	9619720	156993
904	440	840	426968	10247296	119653
880	440	763	404598	10092060	119691
832	384	760	361663	8588195	91134
824	424	920	354742	9300668	111109
856	480	800	382830	9607845	142397
864	1010	688	390019	7921440	63046
856	392	760	382946	9669362	94971
864	400	742	390145	9549097	98887

가. Polynomial Curvefitting Method

휨 진동실험은 양단지지시험체의 중앙부 상부에 충격햄머로서 가진하여 시험체 중앙부 하단에 부착

된 가속도 감지기로부터 가속도 곡선을 측정하였다. 측정된 가속도 곡선은 B&K2035 FFT Analyzer로 Fourier 변환된 Frequency Spectrum곡선의 Real Part로부터 1차공명진동곡선을 구하여 Fig 3과 같이 시험체의 감쇄비를 계산하였다. 감쇄비 계산을 위한 Curve Fitting Model은 다음과 같다.

$$H(i\omega) = \frac{(r_{2,k}\sigma_k + r_{1,k}\omega_k + ir_{2,k}\omega)}{(\sigma_k^2 + \omega_k^2 - \omega^2 + 2i\sigma_k\omega)} + A_0 + A_1(i\omega) + A_2(-\omega^2)$$

여기서, A₀, A₁, A₂는 Residual function coefficients를 나타내며 σ_k 는 K번째 모드의 감쇄비, ω_k 는 Modal Frequency이다. 또한, Dual Channel Analysis에서 Frequency Response Function은 $H_{ok} = \sum_{k=1}^n \left[\frac{r_{ik}}{s - p_k} + \frac{r_{ik}^*}{s - p_k^*} \right]$ 이고 여기에서 $p_k = -\sigma_k + j\omega_k$, i 는 각각 Response 및 Input를 나타내며 k 는 DOF, s 는 Laplace Variable을 의미한다.

표 4 제진콘크리트의 감쇄비 측정결과

공시체명	Damping Ratio	f_1	f_2	f_{max}	Damping Ratio
N1	3.08	712.12	760.12	736.678	3.26
N2	2.828	706.67	752.76	745.08	3.09
N3	2.941	744.12	792.12	769	3.12
N4	3.471	736.12	792.12	763.153	3.67
L5%	3.221	680.11	728.11	704	3.41
L10%	2.063	648.10	816.13	732.62	2.23
R.P5%	2.994	720.11	768.12	744.62	3.22
R.P10%	3.038	656	696	676.12	2.96
P.R5%	2.586	728	766	747	2.54
P.R10%	1.814	696.11	808.13	742.34	1.86

나. 기하학적인 해석방법

공명곡선의 기하학적인 해석법은 고전적인 방법의 하나로서 곡선의 상대적인 넓이를 이용하여 감쇄비를 측정하는 방법이다. 따라서 대수감쇄율(Logarithmic Decrement) δ 는

$$\delta = \frac{\pi}{2} \frac{f_2^2 - f_1^2}{f_m^2} \sqrt{\frac{A^2}{A_{max}^2 - A^2} \frac{\sqrt{1 - 2D^2}}{1 - D^2}} \text{ 이다.}$$

윗 식에서 감쇄비 D 가 무시할 정도로 작다면 마지막 항은 1.0과 같다. 또한 A 의 값을 최대값의 0.707배한 값($A = 0.707 A_{max}$)을 취한다면 윗 식은 $\delta = \pi \frac{\Delta f}{f_m}$ 이고 여기에서, $\Delta f = f_2 - f_1$ 이다. 즉, $\delta = 2\pi \frac{D}{\sqrt{1 - D^2}}$ 이고, $D \approx 0$ 이면, $\delta = 2\pi D$ 이므로 $D = \frac{1}{2\pi} \delta$ 이다 따라서, 감쇄비를 진동수에 대한 함수로 나타내면 $D = \frac{1}{2} \frac{\Delta f}{f_m}$ 이다.

감쇄비 측정방법은 Frequency Spectrum곡선의 Real Part에서의 1차공명진동수를 일으키는 곡선에서 최대 진동수와 이에 대응하는 Magnitude를 구하고 이 값에 0.707을 곱한 값에 대응하는 진동수를 찾는다. 이 진동수의 큰 값과 작은 값의 차이를 이용하여 감쇄비를 구하였다. 제진콘크리트의 감쇄비 측정결과는 표 4와 같다.

다. 가진해머에 의한 기하학적 해석방법

보시험체를 양단지지 상태에서 하단부에 5군데의 가속도계를 부착시킨 후 고무해머에 의해 진동을 유발시켜 DPM장비와 Tape Recorder에 입력시킨다. 입력된 자료는 AD Converter에 의해 디지털 자료로 치환시킨 후 FFT를 취하여 원하는 진동수와 감쇄비를 얻게 된다. 이 실험에 따른 측정결과는 다음 표 5와 같다.

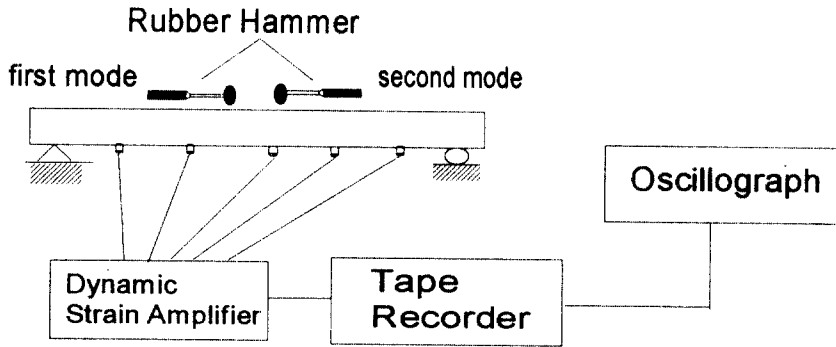


그림 3 진동 실험 광경

표 5 가진해머에 의한 실험결과

공시체명		1st. mode					2nd. mode				
		1Ch.	2Ch.	3Ch.	4Ch.	5Ch.	1Ch.	2Ch.	3Ch.	4Ch.	5Ch.
Normal	J (Hz)	14	14	14	---	14	15	15	15	---	15
	D(%)	2.52	2.38	2.52	---	2.52	2.86	2.38	2.38	---	2.38
L5%	J (Hz)	20	20	20	---	20	19.5	19.4	19.5	---	19.5
	D(%)	2.5	2.13	1.75	---	2.18	4.36	3.48	3.26	---	3.21
L10%	J (Hz)	27.5	27	27	---	27.5	23	22.25	22.2	---	22.1
	D(%)	1.73	2.13	2.59	---	2.13	2.93	2.47	2.55	---	3.28
R.P5%	J (Hz)	21	20	20	---	21	19	19	19	---	19
	D(%)	4.08	5.0	5.0	---	4.76	3.38	3.76	3.76	---	3.01
R.P10%	J (Hz)	35	33.5	33.5	---	34.5	24.5	25	24.5	---	24.5
	D(%)	4.0	3.28	3.28	---	3.48	3.14	2.29	2.33	---	2.51
P.R5%	J (Hz)	21.5	20.5	20.5	---	21.5	19	18	18	---	18.5
	D(%)	3.22	2.79	2.79	---	3.58	3.01	3.97	3.57	---	3.48
P.R10%	J (Hz)	20	20	20	---	20	23.5	23	23	---	23
	D(%)	2.5	2.08	2.08	---	2.08	3.09	1.98	1.98	---	2.37

4. 연구수행 종합평가

본 실험은 필요한 적정배합비를 산출하기 위하여 pilot을 실시하여 얻어진 배합비에 따라 제진콘크리트 보를 제작하여 실험을 실시하였으며 제진콘크리트의 동적 물성을 파악하기 위하여 여러 실험을 통하여 구속탄성계수, 동탄성계수 및 감쇄비를 측정하였다.

4.1 구속탄성계수

제진콘크리트의 구속탄성계수는 도달시간을 측정하기 위하여 시험체의 길이가 길수록 유리하리라 판단되며 본 실험에서는 측정시간의 정도에 따라 같은 결과를 나타내는 보가 많았다. 평균적인 구속탄성계수는 정탄성계수의 약 1.2배정도 나타났다.

4.2 동탄성계수

공명진동실험법에 의해 1차공명진동수를 구하고 이를 이용하여 동탄성계수를 구한결과 정탄성계수에 비해 약 35%정도 크게 나타났다. 보 시험체의 경우 1차공명진동수가 시멘트 몰탈에 비해 약 23% 정도로 작게 나타나 시험체의 부피나 크기에 상당히 영향을 받는 것으로 보인다.

4.3 감쇄비

Polynomial Curvefitting Method와 공명곡선에 의한 기하학적인 해석방법에는 별차이가 없었다. 그리고 배합비에 따른 감쇄비가 시멘트몰탈의 경우 배합비가 증가함에 따라 압축강도는 떨어지고 감쇄비는 증가하는 경향을 보였으나 콘크리트보의 경우 거의 차이가 나타나지 않았다. 이는 골재의 혼입과 철근의 배근으로 인한 불확정요인이 많이 작용하는 것으로 보인다.

5. 결론 및 추후연구과제

위 실험에서는 철근과 골재배합이 실험결과에 다소나마 영향을 미친 것으로 나타났고 Latex 5% 시험체 경우 가장 높은 압축강도와 함께 높은 Dapming Ratio를 얻어 가장 이상적인 제진제로 판단되었다.

Wave Propagation에 의해서 보시험체의 탄성계수, Material Damping Ratio등을 구하는 과정에는 정확성이 부족한 것으로 판단되어 가진해머에 의한 보시험체에 진동을 유발하여 가속도계로부터 진동수 및 Damping Ratio를 얻은 후 보인장 장치에 의해 순간적인 진동을 유발하여 LVDT와 가속도계에 의해 보의 변위와 감쇄효과를 실험할 예정이다. 또 피로하중에 의해 시험체보에 균열이 생기게 한 후 그때의 진동수와 감쇄비, 그리고 균열을 보강한 후의 진동수와 감쇄비 역시 실험해 나아갈 계획이다.

● 참고 문헌 ●

1. 박 승범, 문운당 "최신토목재료 실험", 1994
2. Richart, Hall and woods "Vibrations of soils and foundations"
3. 한국공업규격, "콘크리트 공시체의 가로 세로 및 비틀 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斷彈性係數, 動せん斷彈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