

Fresh 콘크리트의 초기 강도 증가를 고려한 진동규준치 제안

Suggestion of Vibration Criteria for Fresh Concrete Considering Early Strength Increase

박 선 준* · 박 연 수* · 강 성 후** · 김 홍 기*** · 김 응 록****
Sun-Joon Park, Yeon-Soo Park, Sung-Hoo Kang, Hong-Ki Kim
and Eung-Rok Kim

(2002년 2월 20일 접수 ; 2002년 4월 26일 심사완료)

Key Words : Vibration Criteria(진동규준), Fresh Concrete(fresh콘크리트), Curing(양생), Vibration Velocity(진동속도), Reliability Index(신뢰성지수)

ABSTRACT

In this paper, vibration criteria for fresh concrete are suggested considering relationship of strength and ages of concrete. Vibration criteria of fresh concrete subjected to construction vibration are not to be certain in abroad countries without question within a country. Before 12 hours cured, vibration criterion is suggested 0.25 cm/s. Used 4.0 cm/s by vibration criterion after 28 days. And the interval extent used relation with strength and ages of concrete. Vibration criteria proposed in this paper are thought may satisfy properties of fresh concrete as well as generally used those in domestic. Also, the actual ground vibrations due to pile driving have been measured, and data are analyze using the vibration equation applying to reliability index.

1. 서 론

현재 국내는 물론 국외에서도 지반의 진동으로 인한 fresh 콘크리트의 역학적 특성 규명이 명확하게 정립되지 못하고 있는 상황이며 이에 대한 연구가 진행 중에 있다. 본 연구에서 fresh 콘크리트라 함은 콘크리트 타설 직후부터 설계기준강도를 발휘하는데 필요한 28일 동안의 양생 중에 있는 콘크리트를 의미한다. 건설공사 현장의 특성상 fresh 콘크리트의 인접한 곳에서 다양한 형태의 지반진동이 발생할 가능성은 항상 내재되어 있으며, 이러한 조건 하에서 fresh 콘

크리트의 품질을 확보하기 위해서는 신뢰성 있는 진동규준치의 정립이 필요한 실정이다.

사용 중에 있는 일반 구조물에 대한 진동규준치는 나라마다 차이가 있긴 하지만 나름대로 그 기준을 규정하고 있는데 비하여 fresh 콘크리트에 대한 진동규준은 그 특수성 때문에 일반화되지 못하는 문제점을 안고 있다. 즉, 콘크리트의 배합방법, 시멘트의 종류, 양생온도 등 콘크리트의 강도 발현에 직접적으로 영향을 미치는 수많은 변수들을 고려하는데 문제가 있기 때문이다.

본 연구에서는 현재 사용 중에 있는 일반 구조물의 진동규준치가 구조물의 강도와 직접적인 상관관계가 있다는 점을 고려하여 보통 콘크리트의 초기재령에 따른 강도 발현정도를 분석하여 fresh 콘크리트에 대한 진동규준치를 제안하고자 한다. 또한 본 연구에서 제안한 진동 규준치를 적용하여 실제 대형 구조물의 기초 공사 시 파일 항타로 인한 지반 진동에 영향받는 fresh 콘크리트의 진동 영향 평가 방법을 제시하

† 정회원, 동신대학교 공업기술연구소

E-mail : parksj@black.dongshinu.ac.kr

Tel : (061) 330-3137, Fax : (061) 330-2830

* 정회원, 전남대학교 건설지구환경공학부

** 동신대학교 토목공학과

*** 광주광역시 지하철건설본부 공사계획과

**** 송원대학 철도시설토목계열

고자 한다. 이를 위하여 진동 발생원과 fresh 콘크리트 사이의 허용이격거리와 진동추정식을 신뢰성지수를 사용하여 신뢰도 정도에 따라 3가지로 구분하여 사용하였다.

2. 문헌연구 및 고찰

2.1 진동기준에 대한 문헌 연구

다음의 Fig. 1은 각국에서 현재 적용하고 있거나, 연구결과로 제시된 fresh 콘크리트에 대한 진동 기준치를 비교 정리한 것이다.⁽¹⁾ Table 1은 국내에서 통상적으로 일반구조물에 적용되고 있는 진동 기준치이다.⁽²⁾ Fig. 1과 Table 1을 비교해보면 국내의 경우 가장 건전한 상태의 구조물에 적용될 수 있는 진동 기준치가 최대 4.0 cm/s 인데 비하여 미국토목학회(ASCE) 규정에서는 콘크리트 양생 5일 이상이 되면 5.0 cm/s의 진동 기준치 적용을 제시하고 있다. 또한 Law Engineering Testing사에서는 양생이후 12시간이 되면 5.0 cm/s의 진동기준치를 적용하도록 하고 있어 국내에서 건전한 상태의 구조물에 적용되는 4.0 cm/s의 진동 기준치를 기준 할 때 이러한 진동기준

의 적용은 부적절함을 알 수 있다. 뿐만 아니라 미광무국(USBM)과 미국노천채광청(OSM)에서 진동수성분을 고려하여 적용하고 있는 건전한 상태의 구조물에 대한 최대 진동 기준치가 5.0 cm/s임을 감안한다면 같은 미국 내에서도 fresh 콘크리트에 대한 진동 기준치를 실제로 적용하는 것은 문제가 있음을 의미하고 있다.

국내의 경우 대한 주택공사 연구소에서는 fresh 콘크리트에 진동속도를 변화시켜 가면서 진동을 가한후 재령 28일 콘크리트 압축강도를 측정한 결과 타설 후 3~5시간에 작용하는 진동은 콘크리트의 강도를 떨어 뜨리고 진동속도의 크기보다는 진동 가력시점이 보다 큰 영향을 미친다는 연구결과를 보여주었다.⁽³⁾ 오병환은 실험을 통해 재령 12시간 이내의 콘크리트에 대하여 진동 기준치를 약 0.3 cm/s 정도로 하는 것이 바람직하다는 것을 제안한 바 있으며,⁽⁴⁾ 장희석은 수평 진동의 크기와 가력시간에 관계없이 fresh 콘크리트의 강도 감소는 거의 발생하지 않았다고 밝힌바 있다.⁽⁵⁾

fresh 콘크리트에 대한 국내의 진동 기준은 아직 정립되어 있지 않은 상태이며, 콘크리트 표준시방서에

Table 1 Generally used vibration criteria in domestic

Degree of Class	Class I	Class II	Class III	Class VI
Type of structure	Cultural assert & computer equipment surrounding	House & apartment (with small crack)	Store structures (with crack)	R.C. building & factory
Allowable vibration valus(cm/s)	0.2	0.5	1.0	1.0~4.0

Age of concrete (days)	0.1	0.2	0.4	0.6	0.8	1	2	4	6	8	10	20	30
ASCE	0.25 (0~12 hrs)		1.27		1.27~5.0			5.0					
U.S.Department of transportation(1991)	5.0 (0~4 hrs)	0.63			2.5		5.0	12.7	25.0				
Hulshizer & Desal(1979)	10.0 (0~3 hrs)	3.8 (3~11 hrs)		5.1		10.0		17.8					
Akins & Dixon(1979)	0.4			2.0			4.0						
Law Eng. Testing Co.	0.25 (0~12 hrs)		5.0										

(unit : cm/s)

Fig. 1 Vibration criteria for fresh concrete

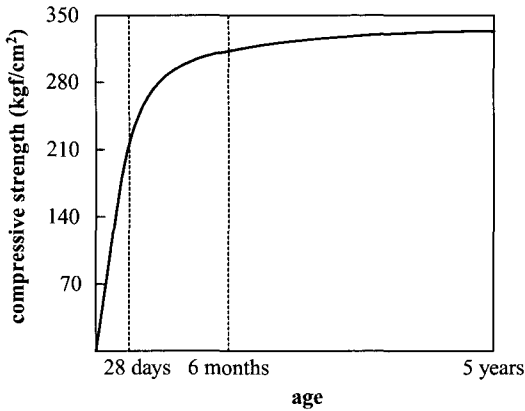


Fig. 2 Relation with strength and ages of concrete

서는 “콘크리트 양생기간 중에 예상되는 진동, 충격, 하중 등의 유해한 작용으로부터 보호해야 한다” 라고 정의되어 있을 뿐이다.⁽⁶⁾

2.2 콘크리트 압축강도와 재령과의 상관관계

본 연구에서는 보통 콘크리트의 초기재령에 따라 강도가 증가하는 상관관계 즉, 타설 후 처음 1주일 동안에 28일 강도의 70 % 정도의 강도를 나타내며, 2 주일 후에는 85~90 %의 강도를 나타내는 관계⁽⁷⁾를 분석하여 초기재령에 따른 보통 콘크리트의 강도증가 정도에 따라 진동규준치를 산정하는 새로운 방법을 사용하였다. 콘크리트의 설계기준 강도는 재령 28일을 기준으로 하고 있다. 일반적으로 재령 28일 이후의 강도 증진은 완만하게 변화하게 되어 안정적이 되는데 이러한 원인은 수화작용이 초기재령에서 활발히 일어나며, 응결과 경화의 과정을 거치면서 수화작용이 완만해지기 때문이다. Fig. 2는 일반적인 보통 콘크리트의 재령에 따른 강도 증가 정도를 그래프로 나타낸 것이다.⁽⁷⁾

2.3 지반진동 추정식

진동발생원터 여러 거리에서 지반진동의 크기를 예측하기 위해서는 진동발생원으로부터 방출되는 에너지가 여러 가지 형태의 실체파와 표면파로 주변지반으로 전파된다고 가정하는 것이 바람직하다. 이렇게 전파되는 진동의 크기는 전달 지반 내의 흡입자들 사이의 마찰과 방사면의 증가 등의 요인으로 인해 점차 감소하게 된다. 지반진동속도의 추정식은 다음 식 (1)과 같다.⁽⁸⁾

$$V = K(D/E^b)^n \quad (1)$$

V : 지반의 진동속도(cm/s)

D : 진동 발생원에서 진동 측정지점까지의 거리(m)

E : 진동에너지

K : 진동상수

n : 지반감쇠지수

b : scaling 지수(1/2 혹은 1/3)

D/E^b : 환산거리(scaled distance : SD)

2.4 신뢰성지수(β)

신뢰성지수(β)는 공사장 주변상황에 따라 일정한 값으로 선택함으로써 진동규준치(저항력)와 하중(지반진동)의 가변성에 상관없이 요구되는 신뢰도(파괴 확률)를 갖도록 하기 위하여 사용하였다. 신뢰성지수(β)는 다음 식 (2)와 같이 정의되며, 진동측정치의 분포는 가우스의 정규분포로 가정하였다.⁽⁹⁾ Fig. 3은 하중 분포와 저항분포, 신뢰성 지수를 설명하고 있다.⁽¹⁰⁾

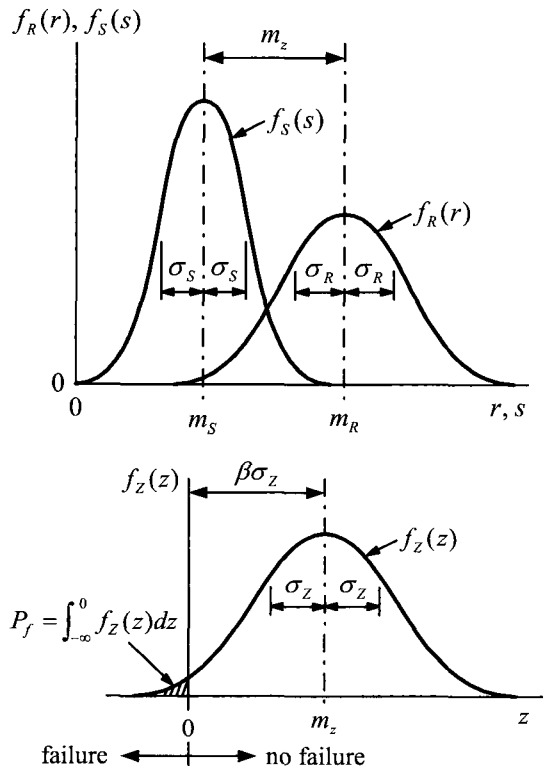


Fig. 3 Distribution of load vs resistance and reliability index

$$\beta = \frac{m_z}{\sigma_z} = \frac{m_R - m_S}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}} \quad (2)$$

β : 신뢰성 지수

m_R, σ_R : 구조물 진동규준치와 표준편차

m_S, σ_S : 하중분포의 중앙값과 표준편차

2.5 안전성상태, 사용한계상태, 극한한계상태에 대한 정의

본 연구에서는 신뢰성지수(β)를 3, 1.28, 0으로 구분하였다. 각각의 신뢰성지수(β)에 대한 진동치와 진동식은 안전성 상태($\beta = 3$), 사용한계 상태($\beta = 1.28$), 극한한계 상태($\beta = 0$)로 새롭게 정의하였으며, 본 연구에서 규정하는 각각의 상태에 대한 정의는 다음과 같다.

(1) 안전성상태 : 강도설계법에서는 설계하중을 초과하는 하중이 구조물에 재하될 확률을 0.1%(신뢰도 99.9%)를 목표로 하고 있다. 발파로 인한 지반진동을 구조물에 작용하는 하중의 개념으로 본다면 신뢰성지수(β) 3을 사용하여 제시한 진동식에 기준하여 발파를 실시할 경우 진동규준치를 초과하는 확률이 0.1%에 해당한다. 즉 모든 측정치를 포함하는 진동 추정식이라 할 수 있다.

(2) 사용한계상태 : 한계상태 설계법(BS8110)에서는 설계 시에 포함되는 변동 요인들을 적절히 고려하기 위한 개념에서 강도의 시험치가 특성강도(characteristic strength)에 미치지 못할 확률 5%, 특성하중(characteristic load)보다 큰 하중이 작용할 확률 5%를 각각 사용하고 있다. 본 연구에서는 위의 두 가지 변동요인을 규합하여 불확실량 10%를 목표로 규정한 상태를 사용한계 상태로 정의하고 이에 해당하는 신뢰성지수(β)를 선택하였다. 이러한 구조설계시의 사용한계상태 개념을 도입하여 사용한계상태의 신뢰성지수(β)를 1.28로 제시하였으며 여기에 해당하는 신뢰도는 90%를 갖게 된다.

(3) 극한한계상태 : 진동추정치 2회중 1회가 진동 추정식에 의한 진동치를 초과하는 신뢰도 50%의 확률을 갖는 상태를 의미한다. 따라서 단순히 진동추정치들을 회귀분석하여 얻은 진동추정식을 사용하여 진동을 추정할 경우 진동규준치를 초과할 확률이 50%에 해당한다고 볼 수 있다.

3. Fresh 콘크리트에 대한 진동규준치 제안

3.1 기존의 연구방법에 대한 고찰

기존의 연구결과들로부터 fresh 콘크리트와 진동과의 상관관계가 상당부분 규명되었지만 아직 그 영향범위를 정량적으로 규정짓기 위해서는 많은 연구가 필요한 것이 사실이다. 특히, 이제까지의 연구에서 고려되지 않았던 다양한 실험변수와 영향인자에 대한 적절한 고려가 필요하다. 이를 위하여 fresh 콘크리트를 단지 콘크리트 자체로 평가하기보다는 시공 중인 콘크리트 구조물의 측면에서 접근하는 것이 필요하다.

Fresh 콘크리트를 시공 중인 콘크리트 구조물의 측면에서 보면 콘크리트의 수화, 응결, 경화의 과정에 가장 큰 영향을 미치는 배합조건, 혼화제 사용여부는 물론이고, 거푸집의 강도, 철근의 배근 상태, 진동응답증폭 현상을 고려할 수 있어야 하며, 단지 공시체의 실험결과를 시공 중인 콘크리트 구조물의 동적 응답 결과라 하기에는 무리가 있다. 지반진동은 동적인 하중이므로 동적인 하중 F는 질량과 가속도의 곱($F = ma$)으로 결정되기 때문에 질량을 작게 설정하여 실제 시공 중인 콘크리트 구조물을 표현한다는 것은 문제가 있기 때문이다. 질량이 작으면 구조물의 고유주기, 동적응답이 달라지게 된다. 또한 현재 실험실에서 진동을 재현하는 경우 한 방향 성분의 정현파 특성만을 재현하고 있으나 진동 영향을 받는 콘크리트 구조물과 진동 발생원 사이가 근거리라는 점을 감안한다면 3방향 진동 성분을 충격파의 형태로 재현하는 것이 보다 바람직 할 것이다. 그러나 현재의 연구들은 실험과정에서 중요인자를 너무 간략화 시켜 일반화된 결과를 도출하지 못하는 문제점을 안고 있다. 본 연구에서는 이렇게 다양한 설계변수와 영향인자를 효과적으로 고려하기 위한 방법으로 적정수준의 안전율을 도입하는 개념의 방법을 이용하였다.

3.2 Fresh 콘크리트에 대한 진동규준치 제안

Fresh 콘크리트의 진동규준치 산정 시 기준은 콘크리트 양생 12시간 이전에는 0.25 cm/s를 적용하였으며(ASCE 및 Law Engineering Testing사 제안기준) 최대치는 재령 28일 이후 4.0 cm/s로 결정하였다. 4.0 cm/s는 국내에서 건전한 상태의 철근콘크리트 구조물에 적용되고 있는 진동 규준치로서 28일 재령을

갖는 콘크리트의 압축강도는 구조물 설계 시 목적으로 하는 설계기준강도에 도달하였다고 판단하여 4.0 cm/s를 적용하였다. Fig. 4는 보통 콘크리트의 초기 재령에 따른 강도발현 정도를 나타내는 Fig. 2를 기준으로 결정된 것이다. 콘크리트 양생 12시간 이후부터 28일 동안 시간이 지남에 따라 강도가 점차 발현되는 정도를 8단계로 세분화하여 28일 강도에 대한 비율을 구하고, 여기에서 얻어진 비율을 4.0 cm/s와 비교하여 재령에 따른 진동규준치를 구하였다. 그 결과가 Table 2에 정리되어 있다.

Table 2의 값을 회귀분석하여 재령과 진동규준치 사이의 일반화된 식을 도출한 결과가 Fig. 4이다.

Table 2 Vibration criteria by step of ages of concrete

Ages (days)	Ratio (strength by ages/ strength in 28 days)	Vibration criteria by ages (cm/s)
1	0.22	0.88
2	0.35	1.40
3	0.45	1.80
4	0.53	2.12
7	0.70	2.80
9	0.78	3.10
14	0.90	3.60
28	1.00	4.00

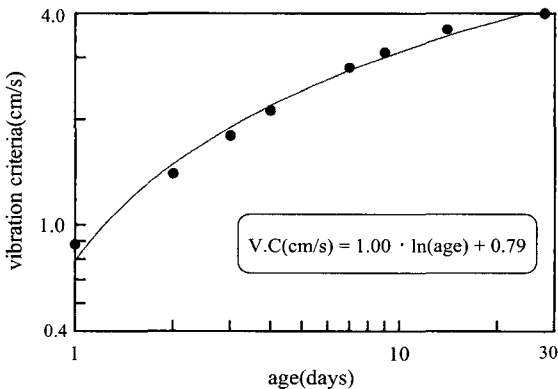


Fig. 4 Relation with vibration criteria and ages of concrete

진동속도 규준치를 산정하기 위한 계산식은 다음 식 (3)과 같다. 분석결과 상관계수(r)는 0.99로 얻어졌다.

Table 3 Suggestion of vibration criteria for fresh concrete

Ages of concrete	Vibration criteria(cm/s)
Before 12 hours	0.25
12 hours - 2 days	0.8
3 days - 6 days	1.9
7 days - 13 days	2.7
14 days - 20 days	3.4
21 days - 27 days	3.8
After 28 days	4.0

이 식을 기준으로 만 24시간(1일) 이후부터의 진동규준치를 7일 단위로 구분하여 제안하였으며, 일반적으로 보통 콘크리트의 강도발현에 민감한 영향을 미치는 양생 초기 1주일동안에는 진동 규준치의 설정을 세분화하여 Table 3에 제안하였다. 제안된 기준치는 fresh 콘크리트의 특성과 현재 국내에서 적용되고 있는 진동규준을 모두 만족할 수 있을 것으로 판단된다.

$$V.C = 1.00 \cdot \ln(\text{재령}) + 0.79 \quad (3)$$

V.C : 진동속도 규준(cm/s, 단 양생 1일 이후)

재령 : 콘크리트 양생 일수

4. 초기 강도를 고려한 Fresh 콘크리트의 진동 영향 평가

기초파일 항타와 옹벽구조물의 콘크리트 타설 공정이 동시에 진행되는 ○○공사현장을 대상으로 본 연구에서 제안한 fresh 콘크리트의 진동규준치의 적용 및 일련의 진동 영향 평가 방법을 다음에 예시하였다.

4.1 지반의 진동 측정 실험

파일항타로 인한 지반의 진동측정은 ○○공사현장에서 총 6본의 파일 항타가 이루어지는 전시간을 실측하였으며, 지반의 진동감쇠를 고려하기 위하여 5 m~42 m까지 진동센서의 설치위치(즉, 지반진동 측정 위치)를 변화시켜 가면서 동시에 6개 채널을 측정하였다. 파일의 심도는 최소 7.3 m에서 최대 19.2 m까지 다양하였으며, 최초 파일 1본의 지반 진동 측정결과 3방향의 진동성분중 연직방향(vertical)의 진동이 가장 크게 발생되는 것으로 밝혀져 연직방향을 중심으로 측정하였다. Fig. 5는 파일 항타로 인해 발생되

는 지반의 진동을 측정하기 위해 사용한 진동 측정 시스템을 나타낸 것이다. 지반의 진동을 측정하기 위하여 sampling rate는 1개의 채널 당 200 Hz로 설정하여 파일 항타로 인한 지반진동의 침두 진동 성분을 충분히 측정할 수 있도록 하였다. Fig. 6은 파일항타가 실제로 이루어지는 모습이다. Fig. 7에는 파일항타로 인한 지반의 진동가속도 시간이력을 6초간 나타내었다.

파일항타로 인한 지반의 진동수는 연직방향 12 Hz ~ 31 Hz까지 측정되었으며 최대 진동속도는 측정거

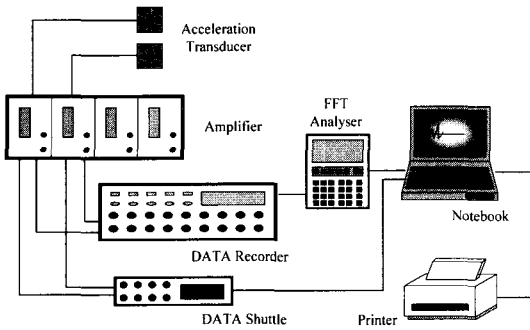


Fig. 5 Pick up system for ground vibration

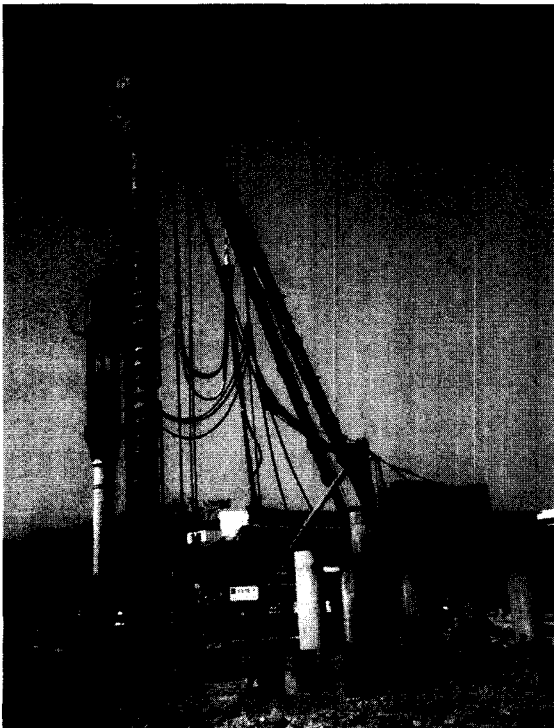


Fig. 6 Complete view of pile driving

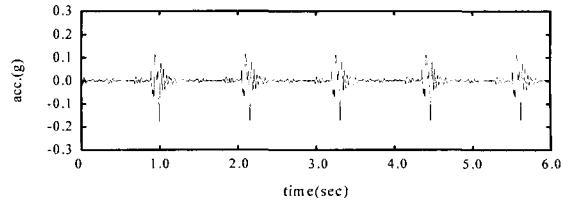


Fig. 7 Time history of acceleration by pile driving

Table 4 Results of ground vibration by pile driving

No	Dis. (m)	Drop height (m)	Energy (kJ · m)	Scaled distance (m/kN ^{0.5})	Acc. (g)	Vel. (cm/s)
1	5.0	0.7	48.07	0.721	0.187	2.156
2	6.0	0.9	61.80	0.763	0.123	1.367
3	7.5	0.9	61.80	0.954	0.342	3.605
4	10.0	0.9	61.80	1.272	0.195	2.085
5	11.0	0.9	61.80	1.399	0.268	0.527
6	12.0	0.9	61.80	1.526	0.142	1.131
7	12.3	0.9	61.80	1.565	0.202	1.975
8	15.0	0.9	61.80	1.908	0.115	1.270
9	16.0	0.9	61.80	2.035	0.043	0.533
10	17.2	0.9	61.80	2.188	0.092	1.015
11	20.0	0.9	61.80	2.544	0.077	0.846
12	21.0	0.9	61.80	2.671	0.057	0.517
13	22.0	0.8	54.94	2.968	0.037	0.342
14	22.2	0.9	61.80	2.824	0.073	1.232
15	25.0	0.9	61.80	3.180	0.078	1.206
16	26.0	0.9	61.80	3.307	0.035	0.444
17	31.0	0.9	61.80	3.943	0.032	0.293
18	32.0	0.9	61.80	4.070	0.013	0.149

리 7.5m에서 3.61 cm/s까지 측정되었다. 측정 및 분석 결과를 Table 4에 정리하여 나타내었다.

4.2 파일항타에 의한 지반의 진동 추정식

진동치의 분석 시에는 디젤해머의 낙하고와 중량을 기준으로 진동에너지를 산정하였으며, 총 6본의 파일에 대해 측정된 자료 중 가속도계의 설치위치와 해머의 낙하높이 등을 고려하여 최대추정치를 선별한 후 이를 회귀분석하여 진동추정식을 제시하였다. 진동속도는 측정된 지반의 진동 가속도 값을 1회 수치 적분하여 얻었다. 여기에는 Strawberry사에서 개발하여 전 세계적으로 널리 사용되고 있는 상용화된 진동 분석 프로그램인 Workbench를 사용하였다. 본 연구에

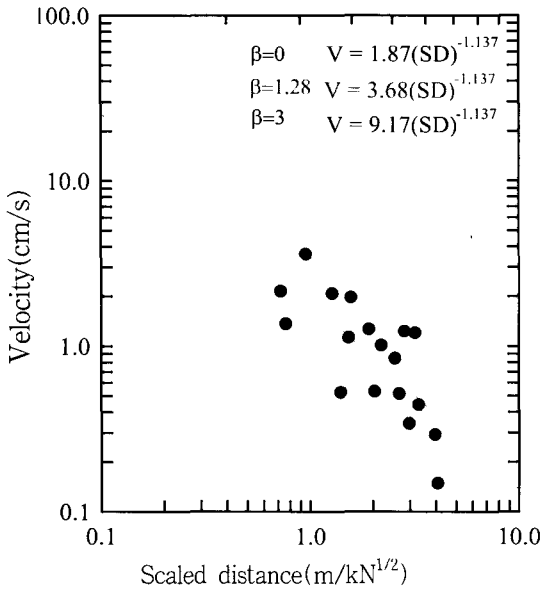


Fig. 8 Peak particle velocity by pile driving

서는 신뢰성 지수를 사용하여 신뢰도 정도에 따른 지반의 진동 추정식을 Fig. 8에 제시하였다. 진동 추정식은 진동에너지(E)의 항을 포함하여 발파로 인한 지반의 진동을 추정하는 것과 동일한 개념에서 얻은 식으로써 Wiss와 Attewell, Famer에 의해 제안된 식을 기본 형식으로 하였다.⁽⁸⁾ Fig. 8과 Table 5에 사용된 SD는 식 (1)에서 제시한 환산거리(scaled distance)를 의미한다.

Table 5에서는 향타위치에 따른 지질의 변동사항과 진동을 전파시키는 매질의 변화, 콘크리트 응결 조건 등이 모두 진동 예측치를 변화시키는 변수로 작용하기 때문에 이에 대한 안전율을 두기 위해 신뢰도 정도에 따른 진동 추정식을 제시하여 현장에서 사용자 의 판단에 따라 선택하여 사용할 수 있도록 하였다. 본 공사현장의 대표지반 조건은 풍화토와 풍화암으로 구성되어 있다.

Table 6 Allowable distance to satisfy vibration criteria of fresh concrete

Ages of concrete	Vibration criteria (cm/s)	Allowable distance(m)		
		$\beta=0$	$\beta=1.28$	$\beta=3$
Before 12 hours	0.25	46.0	83.8	186.8
12 hours-2 days	0.8	16.5	30.1	67.2
3 days-6 days	1.9	7.7	14.1	31.4
7 days-13 days	2.7	5.7	10.3	23.0
14 days-20 days	3.4	4.6	8.4	18.8
21 days-27 days	3.8	4.2	7.6	17.1
After 28 days	4.0	4.0	7.3	16.3

4.3 허용이격거리 산정식 제안

Fresh 콘크리트의 진동규준치를 만족하기 위한 허용이격거리 D의 산정식은 식(1)과 Table 5에서 제안한 진동추정식의 기본 형식을 변화시켜 다음 식 (4)와 같이 나타내었다.

$$D = (K\sqrt{E}^n / V.C.)^{1/n} \quad (4)$$

위의 식 (4)와 Table 3을 기준으로 진동 영향 평가 대상의 향타진동에 영향을 받지 않을 fresh 콘크리트의 허용이격거리는 신뢰도 정도에 따라 Table 6과 같이 얻어진다.

5. 결 론

보통 콘크리트의 초기재령에 따른 강도 증가정도를 분석하여 fresh 콘크리트에 대한 진동규준치를 제안하기 위한 본 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) 보통 콘크리트의 초기재령에 따라 강도가 증가하는 상관관계를 분석하여 fresh 콘크리트의 진동규준치를 산정하는 새로운 방법을 도입하였다. 진동규준

Table 5 Vibration equations by pile driving

Reliability index (β)	Equations of vibration velocity (cm/s)	Reliability(%)	State	Coeff. of correlation(r)	Vibration energy (kN · m)
0	$1.865(SD)^{-1.137}$	50	Ultimate limit	-0.74	48.1~61.8
1.28	$3.684(SD)^{-1.137}$	90	Serviceability limit		
3	$9.170(SD)^{-1.137}$	99.9	Safety		

치는 콘크리트 양생 12시간 이전에는 0.25 cm/s, 재령 28일 이후에는 4.0 cm/s로 결정하고, 그 사이의 재령에 따른 진동규준치 $V.C. = 1.00 \cdot \ln(\text{재령}) + 0.79$ 를 기준으로 제안하였다.

(2) 본 연구에서 제안한 진동규준치를 기준으로 진동발생원과 fresh 콘크리트 사이의 허용이격거리 산정방법을 신뢰성 이론을 도입하여 새롭게 제시하였으며, fresh 콘크리트에 대한 일련의 진동영향 평가 과정을 예시하였다.

참 고 문 헌

(1) 대우엔지니어링 기술연구소, 1998, 건설진동의 영향평가 및 대책에 관한 연구, 대우엔지니어링 기술연구소, 연구보고서, DWERI-CE-11.
 (2) 한국소음진동공학회, 1995, 소음·진동편람.
 (3) 대한주택공사 주택연구소, 1990, 진동이 주변 구조물 및 콘크리트 경화에 미치는 영향, 대한주택공사.

(4) 오병환, 송혜금, 조재열, '1998, "진동이 양생초기 콘크리트에 미치는 영향에 관한 연구", 한국콘크리트 학회지, 제 10 권 제 5 호, pp. 81~87.
 (5) 정희석, 김명식, 김종수, 한중기, 2001, "초기 양생중에 수평연속진동을 받은 콘크리트의 강도특성", 한국콘크리트학회논문집, 제 13 권 제 5 호, pp. 423~429.
 (6) 한국콘크리트학회, 2000, 콘크리트 표준시방서 해설, pp. 99~100.
 (7) 변동균, 신현목, 문제길, 2001, 철근콘크리트 공학, 동명사.
 (8) Dowing, C. H. 1996, Construction Vibrations, Prentice Hall.
 (9) 박정식, 윤영선, 1997, 현대통계학, 다산출판사.
 (10) 박연수, 박선준, 강성후, 1998, "신뢰성지수를 이용한 효율적인 발파설계", 한국소음진동공학회지, 제 8 권 제 5 호, pp. 821~831.