

발파진동이 양생 콘크리트의 물성에 미치는 영향

Effects of Blasting Vibrations on Physical Properties of Curing Concrete

정 동 호 ((주)유신코퍼레이션, 특별부, 차장)

ABSTRACT : Effects of blasting vibrations on curing concrete have not been well studied. As a result, unrealistic and costly blasting vibration constraints have been placed on blasting when it occurs in the vicinity of curing concrete.

To study the effects of blasting, concrete blocks of 30×20×20cm were molded and placed on the quarry. Different sets of concrete blocks were subjected to peak vibrations of 0.25, 0.5, 1.0, 5.0, and 10cm/sec. The impulses of blasting vibrations were applied at thirty minutes intervals. Along with unvibrated concrete blocks, the vibrated concrete samples with 60.3mm in diameters were measured for elastic moduli, sonic velocity and uniaxial compressive strength.

Test results can be summarized as follows :

- 1) The blasting vibrations between 6 and 8 hours after pour generally have exerted bad influences on the uniaxial compressive strength of the concrete.
- 2) Under low vibration of 0.25cm/sec,

variations of the uniaxial compressive strength were not shown. As the magnitudes of blasting vibration increased, compressive strength of concrete decreased. But under the vibrations between 5 and 10cm/sec decreases in strength were almost same.

- 3) Physical properties of the p-wave velocity, Young's modulus, and Poisson's ratio appeared to decrease for the concrete blocks subjected to vibration for 6 to 8 hours.

1. 서론

최근 고속철도를 비롯한 서울, 부산, 대구, 광주, 대전 등 대도시에서 활발히 시행되고 있는 각종 건설공사 예를 들면 지하철, 통신구, 전력구 건설공사와 재개발을 위한 도심지에서의 택지조성 공사 등을 실시할 때 경제성과 시공성 때문에 화약류에 의한 암발파 시공이 불가피한 경우가 많아지고 있다.

대부분의 건설공사는 굴착과 동시에 인접지역에서 콘크리트의 타설작업이 실시됨에도 불구하고, 양생중인 콘크리트를 보호하여 설계강도를 발현시키기 위한 구체적인 허용 진동치의 기준이 설정되

어 있지 않고 또 이에 관한 연구가 거의 없어 콘크리트의 품질관리에 어려움을 겪고 있는 실정이다. 다만 지금까지 경화된 콘크리트 등을 포함한 시설물의 유지관리를 위하여 허용진동치 기준은 몇가지 발표되고 있으나 양생중인 콘크리트 보호를 위한 허용 기준치는 설정되지 않고 있다. 또한 최근 건축재료로서 콘크리트의 용도가 다양화 됨에 따라 고 품질의 제품이 요구되는 시점이므로 양생중인 콘크리트가 설계 강도를 발휘하기 위해서는 각종 발파 및 건설진동의 작용을 적극적으로 제어해야 한다는 견해가 많다.

2. 발파진동의 이론적 고찰

발파를 통한 굴착에는 화약의 폭발시 발생하는 충격압과 가스압을 이용하여 굴착 대상의 암석을 제거하게 된다. 즉 폭약이 장약공내에서 폭발하면 수만에서 수십만 기압에 달하는 강력한 충격압과 연소된 화약에 의한 가스압 그리고 3000°C 이상의 고온이 발생한다. 이 때 충격압과 고온에 의해 발파공에서 수mm~수십mm 이내에 인접한 암반은 녹아내리거나 잘게 파쇄되어 파쇄대를 형성하고 연속되는 가스압과 충격파의 전달로 인해 파쇄대 외부의 암반에는 균열이 발생 전파되어 균열대를 형성하게 된다. 이렇게 폭원으로부터 3차원적으로 전파되어온 충격압에 의한 충격파는 거리에 따라 현저히 감소되어 발파에 의한 에너지의 0.5~20%가 진동의 형태로 균열대 외부의 암반중에 전

파되어 가는 것으로 알려지고 있다.

이 진동치의 예측을 위한 실험적인 연구와 관련된 변수의 차원해석 등 측정 경험을 토대로 한 몇 가지 발파진동식은 Table 2-1과 같다.

발파진동의 크기 즉, 속도성분을 표시하는 방법은 Table 2-1과 같이 연구자별로 조금씩 다르기 때문에 아직 이론적 전개가 완전하다고 보기는 어렵다. 현재 국내·외로 가장 많이 적용하고 있는 경험식은 미광무국(USBM)에서 발표한 2-1식으로 표시할 수 있다.

$$V = K \left(\frac{D}{W^b} \right)^n \quad (2-1)$$

여기서

V : 발파진동속도(cm/sec)

D : 폭원으로부터의 거리(m)

W : 지발당 장약량(kg)

K : 자유면의 상태, 화약의 종류, 암질 등에 따른 상수

n : 감쇠지수

b : 장약지수

지금까지 연구된 바에 의하면 발파진동은 주로 지발당 장약량과 거리에 의해 결정되고 기타의 요인들은 지반의 성질이나 발파조건에 의해 결정된다. 따라서 발파설계를 위해서는 대상지역에서의 시험발파를 통한 자유면의 상태, 화약의 종류, 암질 등에 따른 상수 K값과 감쇠지수 n값을 설정한다.

Table 2-1. Comparison of blasting vibration equations proposed by some researchers

Researchers	Predictive Equations
Langefors	$V = K W^{2/3} D^{-2}$
日本 油脂	$V = K W^{3/4} D^{-1.5}$
日本 火藥	$V = K W^{3/4} D^{-2}$
伊藤	$V = K W^{2/3} D^{-2}$
吉川	$V = K W^{3/4} D^{-2}$
USBM	$V = K (D W^b)^{-n}$

3. 시험편 제작 및 실험방법

3-1 시험편의 제작

콘크리트의 물성 시험방법에서 시멘트와 잔골재 및 굵은골재의 배합은 1:1.72:3.25의 무게비로 혼합하였다. 시멘트는 S사 제품인 보통 포트랜드 시멘트를 사용하였으며 굵은골재는 경기도 김포지역에서 생산되는 화강암 쇄석이었고 잔골재는 그 지

역 한강에서 채취된 자연모래를 사용하였다. 굵은 골재의 물리적 특성은 크기가 모두 19mm이하였고 13mm이하가 94.15%, 10mm이하가 62.85%, 4.76mm이하가 11.25%, 2.34mm이하가 3.65%의 범위를 이루고 있는 골재를 사용하였다. 비중은 20°C에서 2.63, 흡수율은 0.53%를 나타내고 있다. 잔골재는 비중이 2.61, 흡수율은 0.68%를 보여주는 시료를 사용하였다. 이 때 잔골재 및 굵은골재의 입도분포는 KSF 2526 규정을 준수하였다.

거푸집의 제작은 가로 30cm 세로 20cm 높이 20cm의 크기로 하였다. 그리고 Fig. 3-1과 같이 양생콘크리트를 양생시킬 자리에 표토를 완전히 제거하고 암반위에 직접 콘크리트 블럭을 밀착시켰으며 누수 및 지면에 부착을 방지하기 위하여 거푸집 바닥 부분에 비닐을 깔 다음 콘크리트를 타설하였다. 콘크리트 블럭은 총 86블럭으로 제작된 시험편은 510개 정도이다.

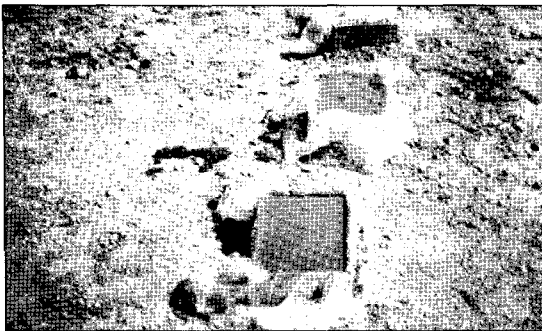


Fig.3-1 Cubic concrete block

3-2. 실험방법

발파진동이 타설된 양생콘크리트의 강도 및 물성(탄성과 전파속도, 탄성계수, 포아송비)에 미치는 영향을 검토하기 위하여 영신석산을 선정하였다. 이석산에서 폭원으로 부터 일정한 간격으로 떨어진 암반위에 설치된 일정 크기의 블럭에 콘크리트를 타설한 후 시험조건에 맞춰 기폭시킴으로써 발생된 진동이 양생중인 콘크리트에 전파되도록

하면서 실험을 실시하였다.

실험방법은 크게 두가지 방법으로 분류할 수 있다. 하나는 콘크리트를 타설한 후 일정한 시간간격으로 반복진동을 작용시키는 경우이고 다른 하나는 타설 후 일정한 크기로 단일 발파진동을 작용시킨 경우이다. 이때의 발파조건은 Table 3-1과 같다.

Table 3-1 Drilling and charging conditions for test blast at Young Sin

Description	Contents
Number of Holes	18holes
Diameter of Hole	76mm
Hole Spacing	1.0m
Drilling Depth	2.0m
Explosive	Himite 50mm
Charge per Hole	200~360g
Distance	1.8~28.4m
Detonator	MS
Stemming Materials	Sand+Clay
Vibrometer	DS-677, VMS-500

일반적으로 발파진동의 크기는 지형, 암반의 조건, 암반내 불연속면의 발달상태와 그 정도, 폭원에서 측정점까지의 거리, 지발당 장약량 등 여러가지 요인에 의하여 변화하는 것으로 알려지고 있다. 그러나 본 실험에서는 동일한 조건에서 진동측정 및 실험을 실시하였기 때문에 진동의 크기는 폭원으로 부터 거리에만 관계되도록 단순화 시켰다.

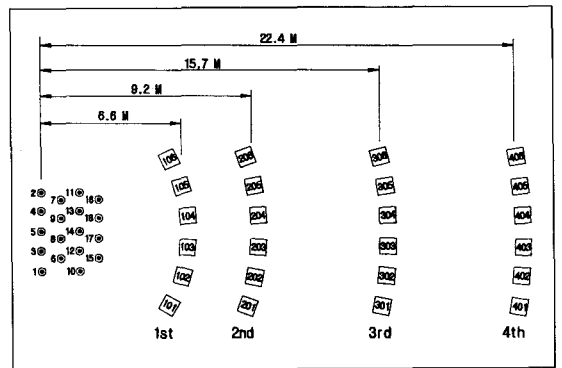


Fig 3-2 Drill hole distribution in case of I

반복진동을 작용시키는 경우는 예비 시험발파 자료에 근거하여 Fig. 3-2와 같이 1.0m의 간격으로 장약공 18공을 2.0m 깊이로 천공한 후 제 5공을 중심으로 4단계별 거리에 따라 각각의 열에 6개의 불력을 설치하고 콘크리트를 타설하였다. 그 위치를 예로 들면 1열의 경우 101, 102, 103, 104, 105, 106으로 명명하고 제 4열의 경우는 401, 402, 406 으로 표기하였다. 이와 같이 폭원과 축점(이 때 축점에 콘크리트 불력을 설치함)과의 거리를 달리 하면서 일정한 시간 간격으로 콘크리트를 타설한 후 양생시키면서 진동을 계측 하였는데 진동속도와 환산거리의 log-log 상관관계는 Fig. 3-3과 같다

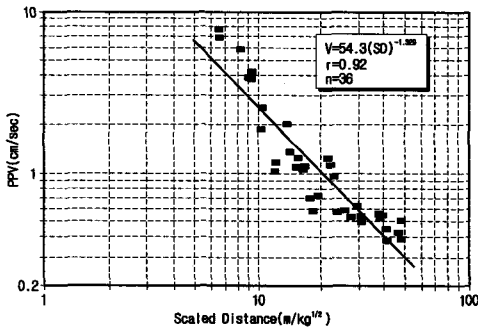


Fig. 3-3 Relationship between peak particle velocity and square root scaled distance at Young Sin

이 때 진동속도의 크기는 종방향, 횡방향 및 수직방향의 성분을 종합한 백터값을 적용하였으며 회귀분석하여 이 실험지역에 적합한 3-1의 실험식을 구하였다.

$$V = 54.3 \left(\frac{D}{\sqrt{W}} \right)^{-1.329} \quad (3-1)$$

이 3-1의 실험식을 역산하여 Fig.3-4와 같이 단일 발파진동의 크기가 시간대별 양생콘크리트에 미치는 영향을 검토하는데 사용하였다. 일정한 폭약량으로 동일 지역에서 진동치의 크기 10.0cm/sec를 예측할 수 있는 거리는 1.8m, 5.0cm/sec는 3.0m,

1.0cm/sec는 10.0m, 0.5cm/sec는 17.7m 그리고 진동치의 크기 0.25cm/sec를 얻기위하여 28.4m의 지점에 각각 양생콘크리트를 타설한 후 진동작용 회수를 단 1회, 즉 단일 발파진동을 작용시키는 실험을 실시하였다.

이와 같이 단일 발파진동을 작용시킨 경우의 실험방법은 비교적 강도 및 물성의 변화에 큰 영향을 미친다고 생각되어지는 시점 즉 타설 후 초기 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4시간까지는 30분간격의 시차를 두어 실험을 하였다. 그러나 그 이후에는 타설 후 6, 8, 10, 12, 24시간대에 단일 발파진동이 작용하는 경우 그 영향을 분석하였다. 또한 이의 정확도를 검산하기 위하여 실제 계측한 값과 이론적으로 계산한 값을 Table 3-2에 나타내었다. 이 결과는 현장실험 조건임을 고려할 때 잘 부합한 것으로 생각된다.

Table 3-2 Comparison of measured and calculated peak particle velocity

Position of hole	Distance (m)	Calculated velocity (cm/sec)	Measured velocity (cm/sec)	Remarks
1st row	1.8	10.0	9.72 (9.02~10.3)	V=54.3 (SD) ^{-1.329} r=0.92 n=36
2nd row	3.0	5.0	4.94 (4.82~5.01)	
3rd row	10.0	1.0	1.01 (0.98~1.21)	
4th row	17.0	0.5	0.52 (0.48~0.53)	
5th row	28.4	0.25	-	

진동의 측정은 InstanTel사 DS-677기종 2대와 Thomas사 VMS-500기종 1대 등 총 3대로 진동을 측정하였다. 물론 각 진동계의 특성상 약간에 오차가 있을 수 있으므로 동일조건에서 비교 실험을 통해 보정한 후 사용하였다.

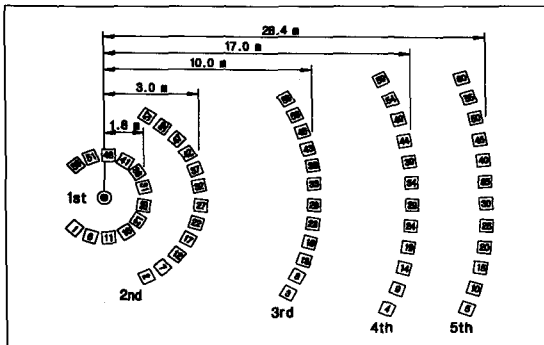


Fig.3-4 Drill hole distribution in case of II

4. 실험결과 및 고찰

4-1 발파진동의 반복에 의한 영향

발파진동의 크기와 발파진동이 반복되는 회수를 변화시키면서 실시한 실험이다. 즉 콘크리트를 타설한 후 30분 간격으로 각각 3회, 6회, 9회, 12회, 15회 및 18회씩, 또 진동의 크기를 각각 0.43, 0.61, 1.35, 2.61cm/sec로 변화시켰을 때 압축강도는 Fig.4-1과 같다.

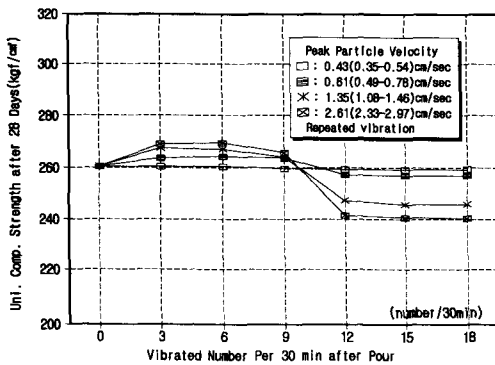


Fig.4-1 Uniaxial compressive strength vs. number of blasting vibrations

여기서 발파진동치의 크기를 0.43cm/sec(0.35~0.54cm/sec)로 작용시킨 경우 진동회수 0은 발파진동을 작용시키지 않은 무진동을, 진동회수 3회는 콘크리트 타설 후 30분 간격으로 3회 발파진

동을 작용시킨 것으로 양생기간 중 1시간 30분 동안에 3회의 진동이 작용되고 그 이후는 전혀 작용되지 않은 예이다. 또 예를 들면 12회는 30분 간격으로 발파진동이 작용되었으므로 6시간 동안 진동이 가해졌음을 알 수 있다. 이하 같은 방법으로 진동의 크기 2.61cm/sec까지 실시하였다.

콘크리트 타설 후 진동의 크기와 진동작용 회수를 달리하면서 실험을 한 결과 진동 작용회수가 서로 다르지만 타설 후 경과시간을 중심으로 검토해보면 6회의 진동 즉 타설 후 3시간 이내에서의 반복된 발파진동에서는 강도가 증가하는 경향을 보여 주고 있으나 6시간 경과 후 즉 30분 간격으로 12회 이상 반복하여 진동이 작용된 경우는 다짐효과가 더욱 양호함에도 불구하고 오히려 압축강도가 감소하는 경향을 보여 주고 있다.

4-2 단일 발파진동의 영향

콘크리트 양생시간대별 단일 발파진동에 미치는 영향을 평가하기 위하여 예비 시험발파와 반복 발파진동에서 얻은 거리별 진동치 자료를 근거하여 구한 실험식을 이용하였다. 진동의 크기는 각각 0.25, 0.5, 1.0, 5.0 및 10.0cm/sec인 진동치를 작용시키기 위하여 5월 28.4, 4월 17.0, 3월 10.0, 2월 3.0, 1월 1.8m의 거리에서 동심원 상태로 시간대별 콘크리트를 타설하였다(Fig.3-4참조).

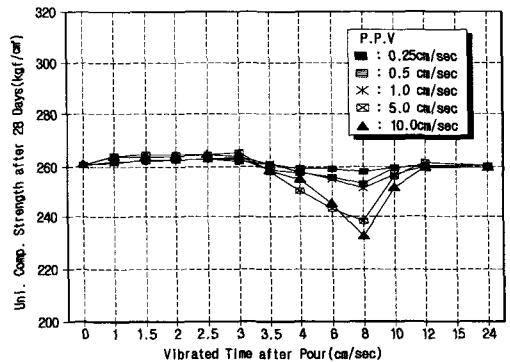


Fig.4-2 Uniaxial compressive strength vs. vibrated time after pour, blasting vibration

양생중인 콘크리트에 단 1회 발파진동을 작용시켰을 때 압축강도의 변화는 Fig.4-2와 같다. 여기서 x좌표상에 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10, 12, 24의 시간은 각각 무진동, 타설 후 1시간, 2시간, 3시간, 4시간대에 발파진동이 작용했음을 의미한다. 이 때에 단일공 발파로 진동 지속시간은 50/1000초 미만의 극히 짧은 시간이다.

발파진동의 크기 0.25에서 10.0cm/sec까지 5단계로 변화시키면서 단 1회의 발파진동을 작용시킨 결과 모두 양생초기 즉 2~3시간 이내의 진동에는 오히려 압축강도가 증가하는 경향을 보이다가 2~3시간 이후에서 부터 12시간 이전의 진동에 대해서는 대체적으로 강도가 감소하는 경향을 보여주고 있다. 그리고 진동의 크기에 따라 저진동인 0.25, 0.5 및 1.0cm/sec에서는 압축강도가 약간씩 감소하지만 5.0 및 10.0cm/sec의 비교적 큰 진동에서는 일축압축강도가 크게 감소하는 경향을 보여주고 있다.

4-3 발파진동이 물성변화에 미치는 영향

콘크리트 타설 후 양생중 발파진동이 콘크리트의 물성 즉, 탄성과 전파속도, 탄성계수, 포아송비 등 주요 물성에 미치는 영향을 검토하기 위하여 가장 압축강도가 감소하는 시점에 발파진동의 크기 5.0cm/sec로 단일진동을 작용시킨 블럭에서 시험편을 채취하여 시험하였다. 그 결과를 종합하면 Table 4-1과 같다.

Table 4-1에서 보는 바와 같이 콘크리트 타설 후 가장 압축강도가 감소하는 시점에 발파진동의 크기 5.0cm/sec로 작용시킨 경우 발파진동을 작용시키지 않은 무진동의 경우에 비하여 탄성과 전파속도, 탄성계수, 포아송비 등이 약간씩 감소하는 경향을 보여주고 있다.

Fig.4-1 Experimental results of physical properties of concrete

Classification	Unvibrated Block (average)	Vibrated Block (average)
Uni.Comp. Strength (kgf/cm ²)	244~274 (261)	224~254 (240)
P-Wave Velocity (m/sec)	3,210~3,270 (3,240)	3,200~3,260 (3,230)
Young's Modulus (x10 ⁶ kgf/cm ²)	1.67~1.75 (1.70)	1.66~1.73 (1.67)
Poisson's Ratio	0.14~0.19 (0.17)	0.13~0.19 (0.17)

Test conditions ; vibration level : 5.0cm/sec, No. of specimens : 45ea

5. 결론

콘크리트 타설 후 양생도중에 진동의 회수 즉 단 일진동 및 반복진동, 진동을 가하는 최초의 시간, 진동의 크기 등을 변수로한 실험결과를 종합하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 콘크리트 타설 후 양생시간대별 0.25~10.0cm/sec의 발파진동을 가하면 초기 2~3시간 이내의 진동에는 오히려 강도가 약간씩 증가하는 경향을 보이다가 2~3시간 이후 부터 12시간 이전의 진동에 대해서는 강도가 감소한다. 그러나 12시간 이후는 진동을 작용시키지 않은 무진동의 경우와 거의 유사한 경향을 보인다. 이와 같은 현상은 타설 후 2~3시간 이전에 진동이 작용하면 수화작용 동안 수화작용을 하지 못한 입자까지 물과 접촉할 수 있는 기회를 제공해 주고 나아가 다짐효과를 주기 때문인 것으로 생각된다. 한편 2~3시간

이후 부터 12시간 이전의 진동에 대해서는 시멘트와 잔골재 및 굵은골재 가 서로 응집하는 시기에 진동이 작용되기 때문에 위해적인 영향이 작용한 것으로 판단된다.

2. 콘크리트 타설한 후 30분 간격으로 12회 이상 즉 타설 후 6시간 이상 반복적인 진동을 5.0cm/sec의 크기로 작용시키면 진동을 가하지 않은 경우에 비하여 압축강도가 약 9.2%감소하는 경향을 보인다.
3. 진동의 크기가 양생중인 콘크리트의 강도에 미치는 영향을 검토하기 위하여 발파진동을 각각 0.25, 0.5, 1.0, 5.0 및 10.0cm/sec의 5단계로 단일진동을 작용시킨 결과 0.25cm/sec의 저진동에서는 압축강도의 변화가 적고 점차 진동이 커짐에 따라 강도의 감소 경향도 증가한다. 또한 같은 진동의 크기에 대해서는 진동 지속시간이 길어지면 역시 강도와 감소율이 커진다.
4. 콘크리트의 주요 물성인 P파의 전파속도, 탄성계수 및 포아송비는 진동을 가하지 않고 양생시킨 시험편에 비하여 발파진동의 크기 5.0cm/sec로 작용한 시험편의 경우, 물성의 변화가 약간씩 감소하나 그 경향은 뚜렷하지 않다.

참고 문헌

- 1) 권영웅, 임종석, 박찬국, 한완관 외 5명, "진동이 주변 구조물 및 콘크리트 경화에 미치는 영향," 대한주택공사, 1990.6. pp.15~90.
- 2) 대우 건설기술연구소(주), "건설진동의 영향평가 및 대책에 관한 연구," 1988, pp. 40~60.
- 3) 임한욱, "암발파 설계 기법에 관한 연구," 한국토지개발공사 기술연구 93-3, 1998, pp. 243~344.
- 4) 정동호, 임한욱, "인공진동의 크기가 양생콘크리트의 강도와 물성에 미치는 영향," 한국암반역학회지, 제 4권 제 1호, 1994, pp. 31~37.
- 5) Bollinger G.A., "Blast Vibration Analysis," Southern Illinois University Press, 1980, pp.14~57.
- 6) Double D. D. and Hellowell A., "The Solidification of Cement," Scientific American, July, 1977.
- 7) Dowding C. H., "Response of Buildings to Ground Vibrations Resulting from Construction Blasting," Ph. D. Thesis, University of Illinois, 1971.
- 8) Dowding C. H, Beck W.K. and Atmatzidis D. K., "Blast vibration Implications of Cyclic Shear Behavior of Model plaster Panels," Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, Vol 3, No.2. June. 1980. pp.80~88.
- 9) Esteves, J. M., "Control of Vibrations Caused by Blasting," Laboratorio De Engenharia Civil, Memoria No. 498. Lisbon, Portugal, 1978.
- 10) Ken Gray, "Effects of Blasting Vibrations on Curing Concrete," The 20th U.S Symposium on Rock Mechanics in Austin, Texas, June 4-10, 1979, pp.455-458.
- 11) U.S Department of Transportation, NHI Course No.13211, "Rock Blasting and Overbreak Control", 1991, pp.273~274.
- 12) Vibratex, "Vibration study,Caisson excavation", 1980. 9. pp.259.