

초기양생중에 수평연속진동을 받은 콘크리트의 강도특성

장희석^{1)*} · 김명식¹⁾ · 김종수¹⁾ · 한중기¹⁾

¹⁾부경대학교 토목공학과

(2001년 1월 19일 원고접수, 2001년 7월 30일 심사완료)

Strength Characteristics of Concrete Subjected to Horizontal Continuous Vibration During Initial Curing

Hee-Suk Jang^{1)*}, Myung-Sik Kim¹⁾, Jong-Soo Kim¹⁾, and Joong-Kee Han¹⁾

¹⁾ Department of Civil Engineering, Pukyong National University, Pusan, 608-739, Korea

(Received on January 19, 2001, Revised on July 30, 2001)

ABSTRACT

In this study, strength characteristics of concrete specimens subjected to horizontal continuous vibration during initial curing were investigated. As experimental variables, vibration velocity(0.25, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0 kine) and vibration time(3, 6, 12, 24 hrs) were used. Density and segregation of the specimens were also investigated. Vibrating was started soon after placing, and strengths investigated consist of compressive strength, splitting tensile strength, and bond strength.

Strengths decrease were hardly occurred at 0.25 kine vibration velocity regardless of vibration times and all strengths were increased for 3 hrs vibration at 0.5 kine vibration velocity. Density was increased for all specimens due to the vibration and there was no serious segregation under even 4 kine vibration velocity.

Keywords : vibration velocity, vibration time, concrete strength, density, segregation

1. 서 론

건설현장에서 초기양생중에 있는 콘크리트는 인접한 공사현장 혹은 다른 진동원으로부터 진동을 받는 경우가 흔히 발생하는데, 이러한 경우에 진동은 양생중인 콘크리트의 강도에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다. 콘크리트 표준시방서¹⁾ 및 도로교 표준시방서²⁾에 따르면 콘크리트는 양생시간 중에 예상되는 진동, 충격, 하중 등의 유해한 작용으로부터 보호되어야 한다고 규정되어 있으나 그 제한치는 명시되어 있지 않다. 따라서 발파 및 파일항타 작업 등은 콘크리트의 양생이 인근에서 행해지는 경우에 제한을 받게되고 그 결과 공기지연으로 이어지게 될 수가 있다^{3,4)}. 그러므로 시공시 발생하는 진동으로 인하여 초기양생중인 콘크리트가 받는 영향에 대하여 정확한 평가가 이루어져야 할 것이며, 이를 통하여 시공기준을 정립할 필요가 있다.

국외에서는 현장타설 콘크리트 말뚝이 초기양생도중 진동을 받는 경우에 진동이 강도에 미치는 영향에 대한 연

구가 이미 1929년부터 이루어졌다⁵⁾. 이들의 연구결과, 초기 양생 중에 발생한 진동은 콘크리트의 강도를 증가시킨다고 보고하였다. 이 후로 기계진동, 발파진동, 교통진동등의 다양한 진동에 대한 현장실험과 실내실험이 이루어졌고^{6~8)}, 그 결과 양생중인 콘크리트에 대한 진동의 제한치를 제시하고 있다⁹⁾.

국내에서도 1980년대 말부터 초기양생 중에 진동을 받는 시험체에 대한 실험이 시작되어 계속해서 연구중이지만^{10~15)}, 아직까지 초기양생중인 콘크리트에 대하여 진동의 허용치 기준을 확립하지 못하고 있는 실정이다.

진동은 진동가력시간에 따라 일시진동과 연속적으로 가해지는 연속진동으로 구분되며, 진동의 가력방향에 따라 수평진동과 수직진동으로 구분해 볼 수 있다.

실제 현장에서 발생하는 진동은 대부분이 수직진동으로 이루어져 있으나, 본 연구에서는 우선적으로 수평진동에 대해 조사하였으며, 추후 수직진동의 영향에 대하여도 조사할 예정이다. 진동의 영향 평가에 가장 크게 영향을 줄 것으로 판단되는 진동속도와 진동가력시간을 실험변수로 하여 실험을 행한 후, 강도 및 밀도의 변화 그리고 재료분리현상을 조사하였으며, 이를 기초로 하여 진동의 허용치를 고찰하여 보았다.

* Corresponding author

Tel : 051-620-1446 Fax : 051-628-2231

E-mail : janghs@pknu.ac.kr

2. 실험 개요

2.1 사용재료와 배합설계

시험체 제작에 사용된 시멘트는 제 1종 보통 포틀랜드 시멘트이고 세척한 해사 및 최대골재치수가 20 mm인 쇄석을 사용하였다. 혼화제로서 AE감수제를 사용하였으며 그 사용량은 시멘트 중량의 0.3%로 하였다. 물-시멘트비는 0.48, 슬럼프는 18 cm로 하여 재령 28일의 압축강도가 270 kgf/cm²이 되도록 하였으며, 이에 대한 콘크리트의 배합설계표는 Table 1과 같다.

2.2 시험체 제작

본 연구에 사용된 시험체는 압축강도, 쪼갠장강도, 부착강도 측정용으로 각각 KS F 2403, KS F 2423, KS F 2441 규격에 의거하여 제작되었다. 압축강도와 쪼갠장강도 측정용 시험체의 크기는 각각 $\phi 10$ cm \times 20 cm, $\phi 15$ cm \times 30 cm로 하였다. 부착강도 측정용 시험체는 철근(D19)을 수직으로 매립한 경우와 수평으로 매립한 경우의 2가지로 하였으며, 그 크기는 수평철근용 시험체가 15 cm \times 15 cm \times 30 cm, 수직 철근용 시험체가 15 cm \times 15 cm \times 15 cm이다. 수평 철근용 시험체의 경우에는 상부와 하부에 각각 하나의 철근을 매립하였다. 철근에 미리 녹방지제를 살포하여 두었다가 매립 직전에 깨끗이 닦아 사용함으로써 녹에 의한 부착강도의 변화를 방지하였다. 철근을 매립한 부착강도 측정용 시험체의 형상은 Fig. 1과 같다.

2.3 실험변수

실험변수는 진동속도와 진동가력시간으로 하였다. 진동속도는 문헌조사³⁻¹⁵⁾를 바탕으로 0.25, 0.5, 1, 2, 4 kine의 5종류로 하였고, 진동가력시간은 시멘트의 종결시간과 실험여건을 감안하여 3, 6, 12, 24시간의 4종류로 하였다. 기존의 연구들이 대부분 일시진동 또는 짧은 진동가력시간의 연속진동을 가한 데 반하여, 본 연구에서는 진동가력시간을 최대 24시간까지 길게 하여, 보다 실제적인 상황에 근접하는 결과를 얻고자 하였다. 진동가력시점은 타설 직후로 하였고 진동속도와 진동가력시간을 조합한 실험변수를 Table 2에 나타내었다.

2.4 진동가력장치

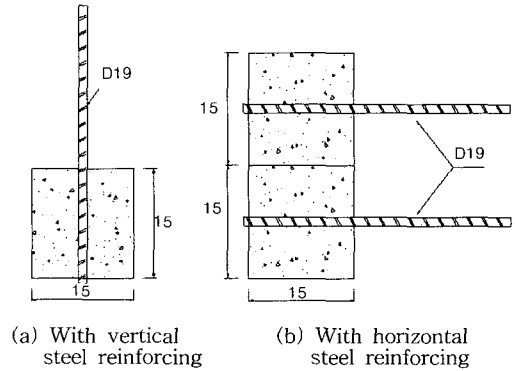


Fig. 1 Bond strength specimen (Unit : cm)

Table 2 Test variables

Vibration velocity (kine)	Vibration time (hrs)	Specimen ID
0.25	0	C 0.25
	3	V 0.25-3
	6	V 0.25-6
	12	V 0.25-12
	24	V 0.25-24
0.5	0	C 0.5
	3	V 0.5-3
	6	V 0.5-6
	12	V 0.5-12
	24	V 0.5-24
1.0	0	C 1.0
	3	V 1.0-3
	6	V 1.0-6
	12	V 1.0-12
	24	V 1.0-24
2.0	0	C 2.0
	3	V 2.0-3
	6	V 2.0-6
	12	V 2.0-12
	24	V 2.0-24
4.0	0	C 4.0
	3	V 4.0-3
	6	V 4.0-6
	12	V 4.0-12
	24	V 4.0-24

Table 1 Mix proportions of concrete

G _{max} (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	Proportion by unit weight (kg/m ³)				Admixture (g/m ³)
					W	C	S	G	
20	18	48	47.4	6.0	181	377	769	890	1,131

진동가력장치는 MTS사의 액츄에이터와 자체 제작한 진동판을 조합하여 만들었으며 Photo. 1에 이 장치의 사진을 나타내었다. 액츄에이터를 두께 2 m의 반력벽에 고정시키고, 진동판은 두께 1 m의 반력상 위에 설치하였다. 진동판의 처짐이 0.2 mm이내가 되도록 판의 두께를 정하였으며 진동가력 도중에 진동판의 떨림 현상을 방지하고자 무거운 몰드를 액츄에이터의 헤드로부터 먼 쪽에 배치하였다.

2.5 실험방법

재료가 분리되지 않고 잘 혼합되도록 하기 위해서 시멘트 및 골재만을 넣고 30초간 건비빔한 후, 물과 혼화제를 넣고 120초간 추가로 비빔을 하였다. 비빔이 끝난 콘크리트는 신속히 몰드 내에 채워서 다짐을 함과 동시에 공기량과 슬럼프를 측정하였다. 콘크리트내의 공기는 기포가 표면으로 활발히 상승하지 않을 때까지 충분히 제거하였다. 그리고 기포가 제거된 몰드를 진동판 위에 배치 및 고정시킨 후 최대 5 Hz 이내의 범위에서 정현(sine)파로 진동을 가하였다. 여기서 진동주기를 최대 5 Hz로 택한 것은, 본 실험에 앞서 콘크리트교 교량상판에서 진동을 측정하여 본 결과 진동주기가 4~5 Hz의 범위에 있었기 때문이다. 한편 홍순길 등^{11~12)}도 확폭교량 RC상판의 휨 및 피로거동 조사에 있어서 고속도로상에 위치한 교량에서 실측한 자료 및 일본도로공단시험소의 자료를 근거로 하여 4 Hz, 1 mm를 실험에 사용하였다고 보고하고 있다.

진동가력 24시간 후에 캡핑을 하였고 다시 24시간 뒤에 탈형하여 20±3 °C의 수중에서 양생하였다. 28일 양생 후 시험체의 표면수를 제거하고 밀도와 강도를 측정하였다. 강도측정이 끝난 쪼갬인장강도 측정용 시험체를 조사하여 재료분리 발생 여부를 판별하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 강도

진동을 가한 시험체와 기준시험체(control)의 강도측정 결과를 진동가력시간에 따른 강도의 증감율로 나타내면 Fig. 2~Fig. 6과 같다. 강도의 증감율은 기준시험체의 강도를 기준으로 하여 나타내었으며 적용식은 식 (1)과 같다.

$$\text{강도의 증감율(\%)} = \left(\frac{\text{진동을 가한 시험체의 강도}}{\text{기준 시험체의 강도}} \times 100 \right) - 100 \quad (1)$$

분석결과 쪼갬인장강도는 전체적으로 감소하나 수직철근의 부착강도는 증가하는 것으로 나타났고, 그 외의 강도

는 일정한 경향을 나타내는 것이 아니라 여러 가지의 다양한 형태로 나타나고 있음을 알 수 있었다.

0.25 kine의 진동속도 아래에서 12시간의 진동을 받은 경우에 쪼갬인장강도에서만 -2 % 정도의 감소율이 있었고, 그 외의 진동가력시간에 있어서는 압축강도, 쪼갬인장강도 및 부착강도 모두가 기준시험체 강도 이상의 값을 보여 주었다.

또한 진동속도 0.5 kine에서 타설직후부터 3시간동안 진동을 주었을 경우에도 압축강도, 쪼갬인장강도, 부착강도 모두 강도의 증가를 보였다.

진동속도 1~4 kine에서는 강도의 증감이 교차하여 일정한 경향을 발견할 수 없었다.

한편 진동속도 4 kine에서 압축강도의 감소가 가장 크게 나타나지 않았고, 부착강도에서는 오히려 다른 진동속도에 서보다 그 증가율이 확연히 더 크게 나타났으므로 진동속도가 크다고 하여 반드시 강도의 감소가 크게 발생하는 것은 아님을 알 수 있었다.



Photo. 1 Test setup

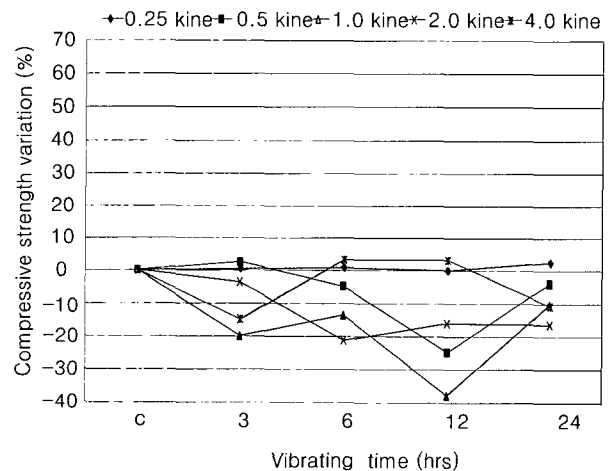


Fig. 2 Variation of compressive strengths according to vibration times

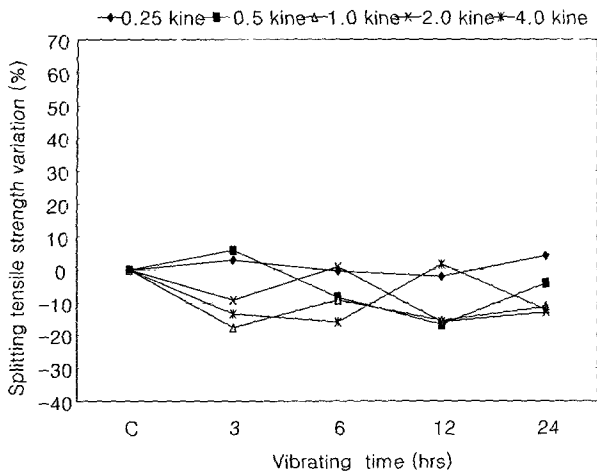


Fig. 3 Variation of splitting tensile strengths according to vibration times

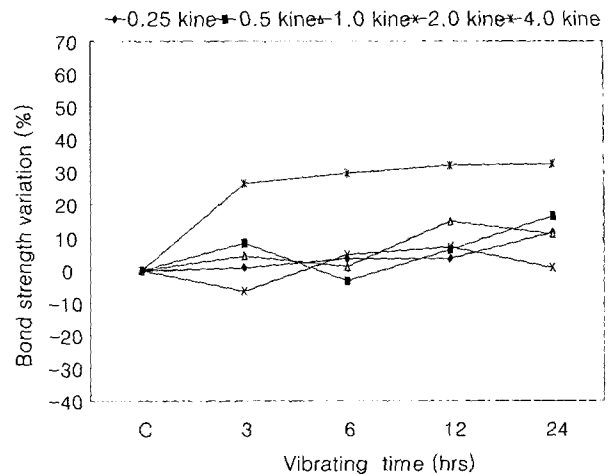


Fig. 6 Variation of bond strengths for vertical steel reinforcing according to vibration times

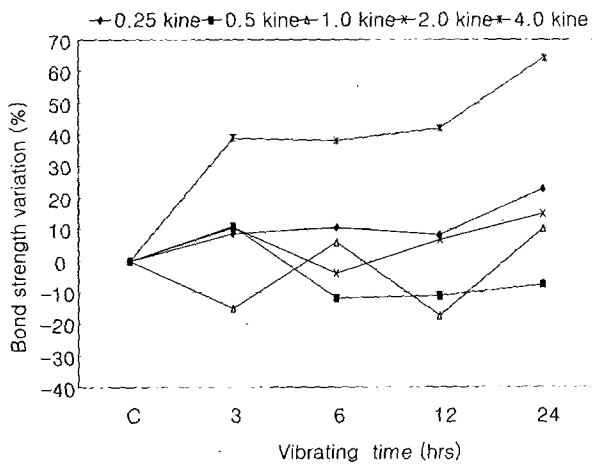


Fig. 4 Variation of bond strengths for upper horizontal steel reinforcing according to vibration times

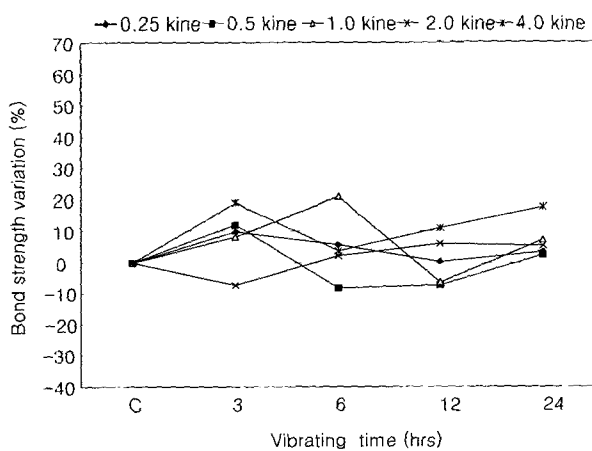


Fig. 5 Variation of bond strengths for lower horizontal steel reinforcing according to vibration times

3.2 밀도

밀도의 측정은 공시체를 재령 28일째 향은 양생조에서 꺼낸 후 표면의 수분을 깨끗이 제거하고 무게와 캐핑두께를 측정 후, 캐핑 부분을 제외한 순수한 콘크리트에 대하여 밀도를 측정하였다. 캐핑부분을 제외한 이유는 진동 속도에 따라 캐핑두께가 일정하지 않았기 때문이다. 즉, 0.25 kine의 진동속도에서는 그 두께가 2mm 정도인데 반해 4 kine의 경우는 캐핑의 두께가 1.5cm 까지 측정되는 등 그 변화가 심하였다. 계산에 사용된 캐핑부의 시멘트 풀 단위중량은 실험에서 측정된 2.02 tonf/m^3 를 사용하였다.

밀도의 변화는 기준공시체의 밀도에 대한 진동을 받은 공시체의 밀도의 증감율로 나타냈으며, 적용식은 식 (2)와 같다. 밀도에 대한 측정결과는 Fig. 7~Fig. 10에 나타내었다.

밀도의 증감율(%)

$$= \left(\frac{\text{진동을 가한 시험체의 밀도}}{\text{기준 시험체의 밀도}} \times 100 \right) - 100 \quad (2)$$

여기서,

$$\text{밀도} = \frac{\text{몰드 전체의 무게} - \text{캐핑 부분의 무게}}{\text{몰드 전체의 부피} - \text{캐핑 부분의 부피}}$$

밀도는 기준시험체에 비해 대부분 증가하는 것으로 나타났다. 특히 4 kine에서 가장 크게 나타났다. 이는 진동으로 인한 다짐 효과에 의하여 콘크리트 내부에 포함된 기포 방출 및 이에 따른 체적감소가 지속적으로 이루어졌기 때문인 것으로 판단된다. 또한 진동가력시 블리딩현상

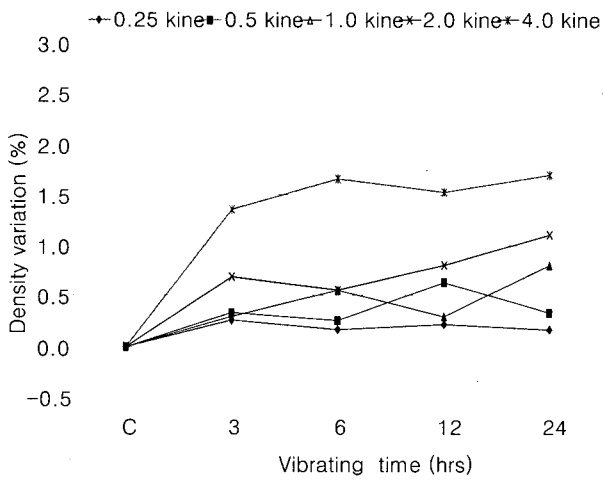


Fig. 7 Density variation of compressive strength specimens according to vibration times

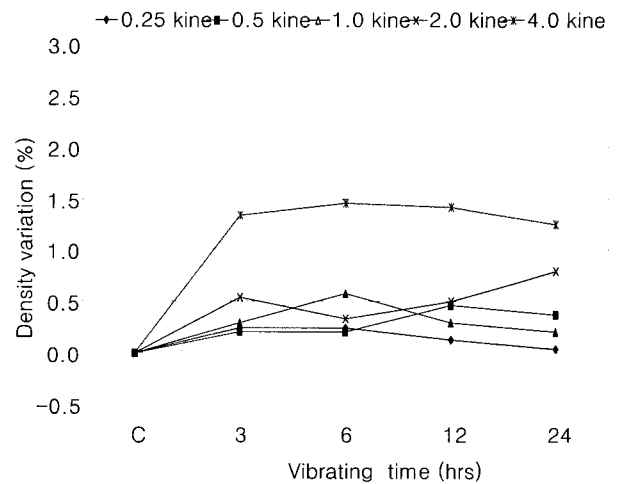


Fig. 8 Density variation of splitting tensile strength specimens according to vibration times

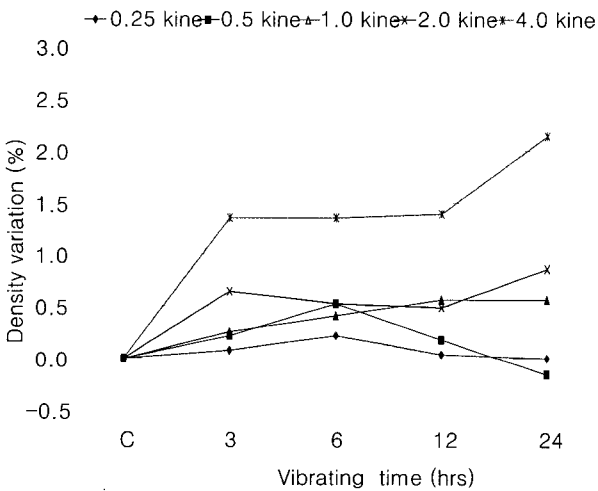


Fig. 9 Density variation of bond strength specimens with horizontal steel reinforcing according to vibration times

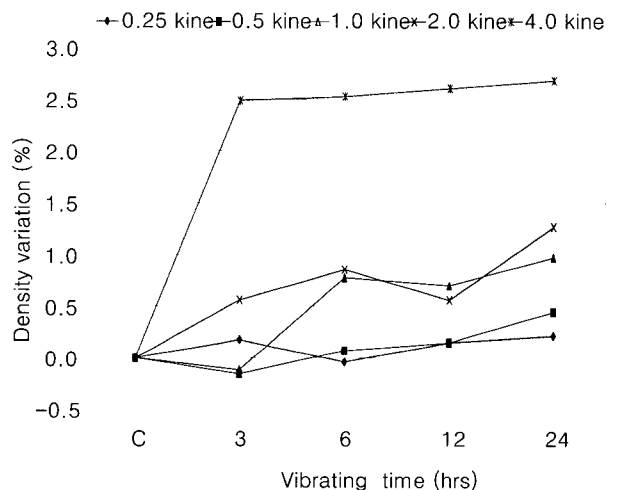


Fig. 10 Density variation of bond strength specimens with vertical steel reinforcing according to vibration times

이 발생하여 콘크리트 내부에 있는 상당량의 수분이 표면으로 상승하여 증발하였기 때문이다. 2.0 kine 이하에서는 전체적으로 밀도의 증가가 나타나기는 하지만 그 차이가 미소하므로, 2.0 kine 이하의 진동속도에서 밀도증가의 효과는 비슷한 것으로 보아도 좋다고 판단된다. 그리고 진동가력시간과 밀도의 증감 관계를 살펴볼 때 진동가력시간이 3시간의 경우에는 밀도가 증가하였으나, 3시간을 경과한 경우에는 일정한 경향이 없는 것으로 나타났다.

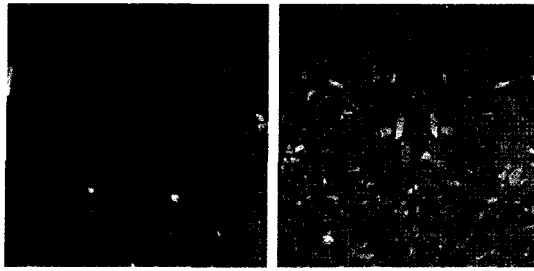
3.3 재료분리

재료분리 여부는 쪼갬인장강도 측정 후 얻어진 시험체의 단면을 면밀히 관찰함으로써 판별하였다. Photo. 2에

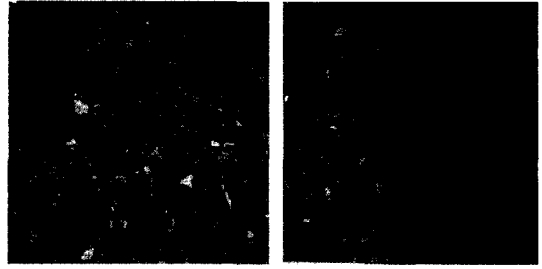
기준시험체와 각각의 진동속도에 있어서 최장 진동가력시간인 24시간 진동을 받은 시험체의 쪼갬단면을 시험체 2개씩만에 대하여 나타내었다.

기준시험체와 비교해 볼 때 진동을 받은 시험체의 상부의 골재가 전체적으로 약간씩 하강한 것은 볼 수 있었으나 심각한 재료분리는 발생하지 않았다. 높은 슬럼프에도 불구하고 재료분리가 발생하지 않은 것은 진동의 방향이 수평으로 작용하였기 때문으로 판단된다.

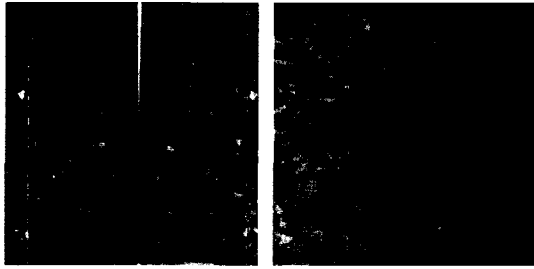
이러한 현상은 진동을 이용한 프리캐스트 콘크리트 제품의 다짐과정에서 수직진동에 의한 것보다 수평진동에 의한 것이 공극의 분포가 고르고 재료분리가 훨씬 더 적게 나타난다는 Tjaronge¹⁶⁾의 연구결과와도 잘 일치하는 것으로 판단된다.



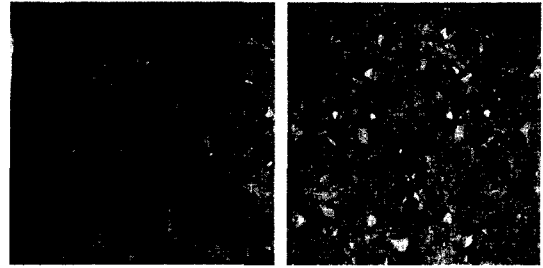
(a) Control



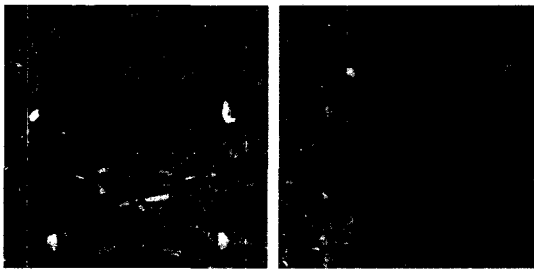
(d) 1.0 kine



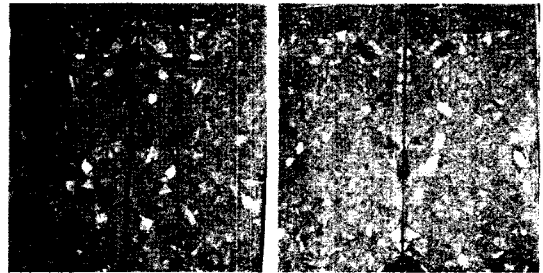
(b) 0.25 kine



(e) 2.0 kine



(c) 0.5 kine



(f) 4.0 kine

Photo. 2 Splitting sections of splitting tensile strength specimens vibrated for 24 hours

4. 결 론

초기양생중인 콘크리트에 수평연속진동이 미치는 영향을 평가하기 위한 본 연구에서, 콘크리트의 강도, 밀도 그리고 재료분리현상을 실험을 통하여 조사해본 결과 다음과 같은 결론들을 얻을 수 있었다.

1) 진동속도 0.25 kine에서는 진동가력시간에 무관하게 강도의 감소가 거의 없었고 진동속도 0.5 kine의 경우에도 타설 직후부터 3시간동안 진동을 가한 경우에는 압축강도, 쪼갬인장강도, 부착강도 모두가 기준시험체 강도 이상의 값을 보여주었다.

2) 진동속도 4 kine에서 강도의 감소가 가장 크게 나타나지 않았고, 부착강도에서는 오히려 다른 진동속도에서보다 그 증가율이 확연히 더 크게 나타났으므로 진동속도가

크다고 하여 반드시 강도의 감소가 비례적으로 발생하는 것은 아님을 알 수 있었다.

3) 진동을 받은 시험체의 밀도는 기준시험체에 비하여 증가하였으며, 시험체 상부의 골재가 약간씩 하강한 것은 볼 수 있었으나 심각한 정도의 재료분리현상은 발생하지 않았다.

본 연구의 결과는 수평연속진동에 대하여 진동속도와 진동가력시간을 실험변수로 하여 얻어진 결과이므로, 향후 수직진동을 비롯한 다양한 요인에 대해서 추가적인 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 1999년 부경대학교 학술진흥(동원학술)재단의 학술연구비에 의하여 지원되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 한국콘크리트학회, “건설교통부 제정 콘크리트 표준시방서,” 기문당, 서울, 1999, p.68.
2. 한국도로교통협회, “건설교통부 제정 도로교 표준시방서,” 도서출판 건설정보, 서울, 1999, p.135.
3. Howes, E. V., “Effects of Blasting Vibrations on Curing Concrete,” *Proceedings of the 20th U.S. Symposium on Rock Mechanics*, Austin, Texas, 1979, pp.455~460.
4. Hulshizer, A. J., “Acceptable Shock and Vibration Limits for Freshly Placed and Maturing Concrete,” *ACI Materials Journal*, Vol. 93, No. 6, 1996, pp.524~533.
5. Bastian, C. E., “The Effects of Vibrations on Freshly Poured Concrete,” *Foundation Facts*, Vol. 6, No. 1, 1970, pp.14~17.
6. Krell, W. C., “Effect of Coal Mill Vibration on Fresh Concrete,” *Concrete International : Design and Construction*, Vol. 1, No. 12, 1979, pp.31~34.
7. ACI Committee 309, “Behavior of Fresh Concrete During Vibration,” *ACI Journal*, Jan.-Feb., 1981, pp.36~53.
8. John F. W., “Construction Vibrations : State of the Art,” *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol. 107, No. GT2, 1981, pp.167~181.
9. Akins, K. P. J. and Dixon, D. E., “Structures and Construction Vibrations,” *Vibrations of Concrete Structures*, ACI SP-60, 1979, pp.213~247.
10. 임중석 외, “진동이 주변구조물 및 콘크리트 경화에 미치는 영향,” 대한주택공사, 1990. pp.58~77.
11. 홍순길, 장동일, “확폭교량 RC상판의 휨거동에 관한 연구,” 한국콘크리트학회지, 제6권 3호, 1994, pp.152~161.
12. 홍순길, 장동일, “확폭교량 RC상판의 피로거동에 관한 연구,” 한국콘크리트학회지, 제6권 6호, 1994, pp.143~150.
13. 오병환, 송혜금, 조재열, “진동이 양생 초기 콘크리트에 미치는 영향에 관한 연구,” 한국콘크리트학회지, 제10권 5호, 1998, pp.81~87.
14. 윤영수, 장영일, 이승훈, “말뚝항타에 의한 진동발생이 콘크리트에 미치는 영향에 관한 실험적 연구,” 대한토목학회 논문집, 제6권, 제1~5호, 1996, pp.515~526.
15. 이지은, 권영웅, “진동이 양생중인 콘크리트에 미치는 영향에 관한 연구,” 한국콘크리트학회 봄학술 발표회 논문집, 2000, pp.97~102.
16. Tjaronge, M. W., Kawabe, S., Okajima, T., Muto, M., and Matsuoka, S., “Compaction of Fresh Concrete with Long Amplitude and Low Frequency of Vibration in Manufacturing Precast Concrete,” *Proceedings of the Advanced Materials Development and Performance*, Vol. 2, 1999, pp.501~506.

요 약

본 연구에서는 초기양생 중에 수평연속진동을 받는 콘크리트 시험체에 대하여 강도특성이 조사되었다. 실험변수로서 진동속도(0.25, 0.5, 1, 2, 4 kine)와 진동가력시간(3, 6, 12, 24 hrs)을 택하였다. 압축강도, 쪼갬인장강도 및 부착강도가 비교되었으며, 밀도와 재료분리현상이 조사되었다.

실험 결과, 진동속도 0.25 kine에서는 진동가력시간에 관계없이 모든 시험체에서 강도의 감소가 거의 발생하지 않았고, 또한 진동속도 0.5 kine에서 3시간의 진동을 받은 경우에도 강도의 감소가 없었다. 전체 시험체에 있어서 밀도가 증가하였으며, 재료 분리현상은 발견되지 않았다.

핵심용어 : 진동속도, 진동시간, 콘크리트강도, 밀도, 재료분리현상