

충격하중에 의한 암석의 동적거동 측정시험장치

박철환¹⁾, 박의섭^{1)*}

SHPB Tests for Rock Dynamic Behavior by Shock Loading

Chulwhan Park, Eui-Seob Park

Abstract Dynamic properties of materials by shock loads such as rock blasting and earthquake are recently attracted in the design of aboveground and underground structures. The advance of measuring devices enables to obtain the whole histories of stress and strain in rock specimen of which the failure is completed in several hundred microseconds. The SHPB has been a popular and promising technique to study the dynamic behavior of rock. And the dynamic compressive, tensile and other test with this experiment system are planned to be Suggested Methods of ISRM. This technical paper is to introduced one study article which focuses the design of 3S (special shaped striker) to produce the half-sine wave to eliminate the problems of the rectangular wave. This article is also describing the advantage of half-sine incident wave and size effect of rock dynamic strength.

Key words Dynamic property, Shock load, SHPB, Striker, Half-sine wave

초 록 발파나 지진과 같은 충격하중에 의한 재료의 동적특성이 최근 들어 지상 및 지하구조물의 설계에 주목받고 있다. 측정장비의 발달에 힘입어 수백 μ -sec에서 파괴가 진행되는 동안에 발생하는 응력과 변형률의 완전한 이력곡선을 얻을 수 있다. SHPB는 암석의 동적거동을 연구하는데 보편적이며 믿을만한 실험장치로 인식되고 있으며, 이 장치에 의한 동적 압축이나 인장강도시험은 조만간 표준시험법으로 제정될 예정이다. 본 보고서는 종래의 사각형 입사파의 단점을 없애기 위하여 사인형태의 응력파를 생성할 수 있는 특별한 모양의 충격자를 고안한 논문을 소개한 것이다. 이 논문은 사인형태의 입사파에 대한 장점을 설명하고 또한 동하중에 대한 암석의 크기효과를 설명하고 있다.

핵심어 동적특성, 충격하중, 충격자, SHPB, 사인형태의 응력파

1. 서 론

최근에 지상이나 지하의 구조물을 건설하는데 재료의 동적특성이 주목 받고 있다. 구조물에 작용하는 동하중은 주변의 발파작업과 같은 소규모 진동과 지진과 같은 대규모 진동이 대표적이다. 원자력폐기물 처분장이나 에너지 비축시설과 같은 사회간접자본의 지하시설물 및 해저시설물은 이의 중요성에 의하여 장기안정성과 함께 내진설계가 요구되고 있다. 전 세계적으로 지진이 빈번하게 발생하고 대규모 지하시설물이 많이 구축되고 있어 암석의 동적특성에 관한 연구가 활발히 진행되고

있다. 국내에서도 여러 구조물의 건설에 내진설계가 반영되고 있으며 이에 대한 연구도 관심의 대상이 되었다.

암석의 동적강도는 1960년대에 이미 연구가 시작되었는데 재하속도가 증가하면 강도가 증가한다는 것(그림 1 참조)을 실험적으로 밝혔을 뿐이며 완전한 응력-변형률 곡선을 얻지 못하였다. 최근에는 측정장비의 발달에 힘입어 수백 μ -sec에서 파괴가 진행되는 가운데 응력과 변형률의 크기를 백만분의 1초 또는 그 이하의 단위로 측정하여 완전한 이력곡선을 얻을 수 있다. 일반적으로 재하속도는 그림 1의 가로축과 같이 1초당 하중의 크기(하중속도) 또는 변형률의 크기(변형률속도)로 표시하는데 보편적으로 변형률속도를 많이 사용하고 있다.

이러한 암석의 동적특성을 측정하는 장치는 기존의 재하장치에 공압장치를 추가한 유공압장치(HPM, 그림

¹⁾ 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원

* 교신저자 : espark@kigam.re.kr

접수일 : 2010년 8월 24일

심사 완료일 : 2010년 9월 14일

게재 확정일 : 2010년 9월 24일

2 참조)와 흡킨스바를 변형시킨 장치(SHPB, 그림 3 참조)로 구별된다. 전자는 중간 크기의 변형률속도인 0.1~10/s를 발생시키며, SHPB는 10~100/s 정도의 높은 속도를 발생시킨다(Asprone et. al. 2009). 이러한 SHPB

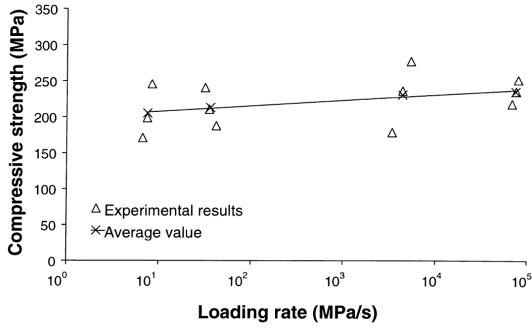
장치는 수년동안 연구를 거치는 사이에 여러 형태로 발전되었으며, 이를 이용한 동적특성시험은 국제암반공학회의 표준시험법으로 지정되고자 제안되고 있다.

국내에서도 이와 같은 시험이 보고된 바 있어(조상호 외, 2008 및 2009), SHPB에 의한 동적특성연구는 앞으로 많은 발전이 기대되는 분야이다. 본 기술보고는 국내에서 암석의 동적특성에 관한 시험이 활성화되기를 기대하며, SHPB에 의한 여러 연구 가운데 장치의 개발에 관한 연구를 소개한 것이다. 원전은 SHPB 연구를 10여년 수행한 중국 湖南省 長沙에 위치한 中南大學의 Xibing Li 교수(xbli@mail.csu.edu.cn)의 주도로 국제암반공학회의 소식지(ISRM News Journal V.12, 2009)에 게재된 "Large Diameter SHPB Tests with a Special Shaped Striker" 제목의 보고서이다(이상 譯者 註).

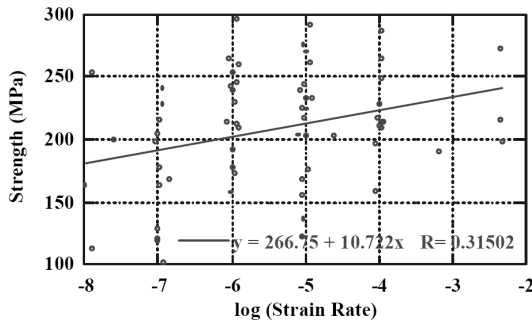
시험장치의 조작이 간편하며 상대적으로 정밀한 결과를 얻을 수 있기 때문에, SHPB는 금속물질의 동적거동을 연구하는데 보편적이며 믿을만한 실험장치로 발전되었다. SHPB 시험에는 다음과 같은 세가지의 기본적인 가정이 적용되고 있다.

- (a) 금속봉 내에서 응력파의 전파는 1차원적 파동이론으로 설명된다.
- (b) 시험편 내에서의 응력은 균일하다.
- (c) 시험편의 관성효과 및 시험편과 금속봉 사이의 마찰은 무시된다.

동하중 시험에서 SHPB의 장점으로 인하여, 이 기법은 암석이나 세라믹, 콘크리트와 같은 취성재료의 연구에 적용되었다. 그러나 암석의 취성이나 불균질한 특성 때문에 다음과 같은 문제점을 야기한다.



(After Zhao et al. 1999)



(After Ma and Daemen, 2004)

Fig. 1. Variations of rock strength on loading rate

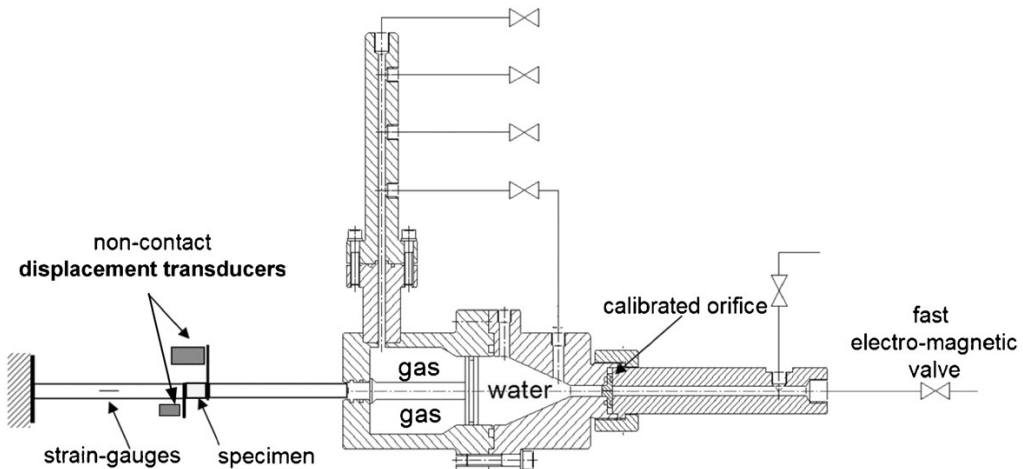


Fig. 2. Schematic of hydro-pneumatic machine (After Asprone et al. 2009)

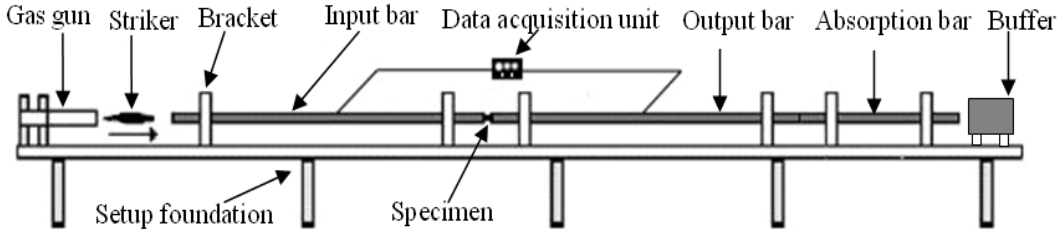


Fig. 3. Schematic of split Hopkinson pressure bar (After Li et al. 1999)

- (a) 시험편 내부에 응력의 균질성과 평형상태가 이루어기 어렵다.
- (b) 응력이 평형상태에 도달하기도 전에 초기에 파괴가 발생한다.
- (c) 입사파의 진폭이 매우 크다.
- (d) 일정한 변형률속도에서 시험편의 변형량을 확보하기 어렵다.

이러한 네가지 문제점에서, 첫 번째 문제점은 암석과 같은 재료의 시험에는 SHPB를 적용할 것을 제한한다. 두 번째 문제점은 시험결과의 유용성과 관련되며, 세 번째 및 네 번째 문제점들은 시험결과의 정확성에 영향을 준다. 이러한 문제점들에 초점을 맞추어 많은 연구들이 수행되었다 (Frantz et al., 1984; Frew et al., 2002; Xia et al., 2008; Li et al., 1994, 2002, 2005, 2008).

본 연구에서는 half-sine 형태의 응력파 개념과 특수형태의 충격자 설계, 적용시험 등등을 포함하여 3S (Special Shaped Striker) 방법이 공들여 고안되었다. 더 나아가 심부지하 건설사업의 암석역학 분야의 연구를 수행하기 위하여 SHPB 장치의 발전상이 소개될 것이다.

2. 대구경 SHPB 장치에서 half-sine 응력파의 장점

대체로 낮은 탄성파속도를 갖는 암석에서는 응력파가 여러번 반사된 후에 응력은 시험편 내부에서 평형상태에 도달한다. 만약 급격히 증가하는 사각형 형태의 입사파가 시험편에 도달하면, 입력봉 근처의 시험편 경계부위에서 응력은 급격히 증가하여 파괴를 유발한다. 그리고 반대편인 출력봉 부위의 시험편에는 응력이 전달되지 않게 된다.

그림 4의 위 그림은 사각형 입사파가 시험편에 작용할 때에 시험편 양쪽 끝부분에 분포하는 응력 이력곡선이다. 이 그림에서 양쪽의 응력이 큰 차이를 보이고 있어 앞에서 언급한 응력의 균일분포라는 가정에 모순이 된다. 이러한 비평형 응력상태가 본 연구에서 개발한 3S

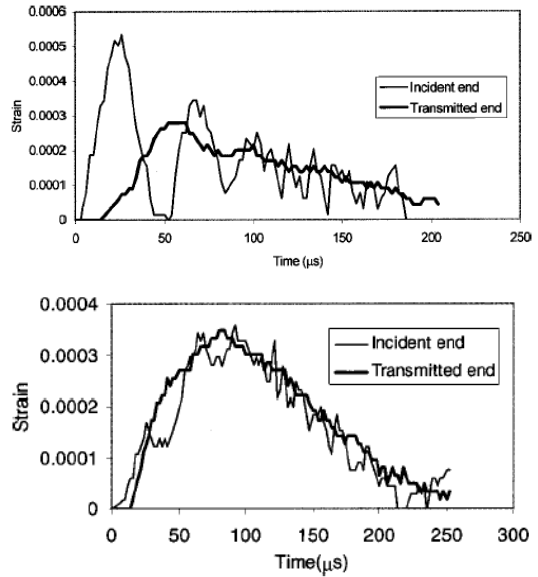


Fig. 4. Stress histories at both ends of the specimen (top; with a rectangular incident wave, bottom; an approximate half-sine incident wave)

방법의 원인이다. 한편, 그림 4의 아래 그림은 3S 방법으로 고안된 충격자에 의하여 발생된 대략 half-sine 형태의 응력파가 시험편에 도달할 때에 시험편 양쪽 끝부분에 분포하는 응력 이력곡선으로, 시험편이 변형을 일으키는 동안에 응력의 평형상태를 이루고 있음을 알 수 있다.

P-C 방정식(Pochhammer-Chree equation, 고체내에 sine 파가 전파될 때 전파속도를 파장 및 밀도, 탄성상수로 정의한 식, 譯註)에 의하면 파의 분산효과를 억제하기 위하여 입력봉과 출력봉, 충격흡수봉은 모두 긴 원통형이 되어야 한다. 사각형태의 응력파는 그림 5와 같이 조화된 성분들의 연속으로 분해될 수 있을 것이다 (Li and Gu, 1994). 주파수가 각자 다른 파의 성분들은 각각 서로 다른 속도로 전파한다. 처음의 사각형 응력

파는 결과적으로 왜곡되고 분산될 것이다. 따라서 응력 파는 그림 6과 같이 요동치게 된다. 더욱 심각한 것은 입사파의 요동친 진폭이 반사파와 투과파의 요동을 상응하게 야기한다. 그리하여 SHPB 시험에서 얻어지는 입사파 및 반사파, 투과파의 결과는 타당한 것이 되지 못한다.

이에 반하여 사인형태의 파는 하나의 속도로 전파하는 단순한 주파수를 갖게 된다. 그림 7의 (a)는 사각형 및 사인 형태의 입사파에 의하여 탄성 금속봉을 따라 전파되는 응력파의 형상을 전산해석한 결과이다. 사인 파가 긴 금속봉을 따라 전파될 때에는 파의 분산이 거

의 없는 것이 확인되었다. 그림 7의 (b)는 사각형 및 사인 형태의 입사파에 의하여 봉의 중간지점의 단면에서 분포하는 응력을 묘사한 결과이다. 사인파는 균일한 응력분포를 보이고 있어 이의 장점을 다시 보여주는 결과이다. 사인형태가 아닌 사각형이나 삼각형과 같이 다른 형태의 입사파에서는 분산으로 인하여 봉의 단면에 균일한 응력분포를 기대할 수 없다는 것이 확인되었다.

더 나아가, 최근의 연구에서 half-sine 파는 일정한 변형률속도로 시험편의 변형을 유도하는 것으로 밝혀졌다. 변형률의 일정한 속도는 속도에 민감한 재료의 시험에서는 필수적이다. 이러한 변형률속도는 뒤의 시험 결과에서 다시 언급될 것이다.

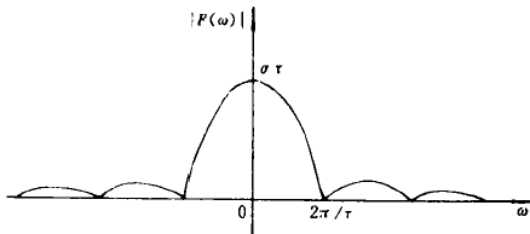


Fig. 5. Frequency components of rectangular wave

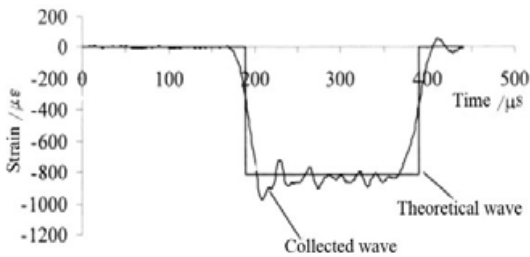
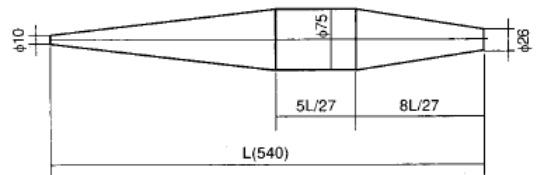


Fig. 6. Oscillation of rectangular wave for dispersion

3. 3S 방법에 의한 half-sine 파의 발생

천공이나 말뚝박이 등과 같은 작업에서 충격도구는 각자 달라 서로 다른 파형을 생성한다. 이는 충격자의



(a) Geometry of striker by inverse theory



(b) 3D profile of striker by FE and NNW

Fig. 8. Typical profiles of striker to produce an approximate half-sine wave

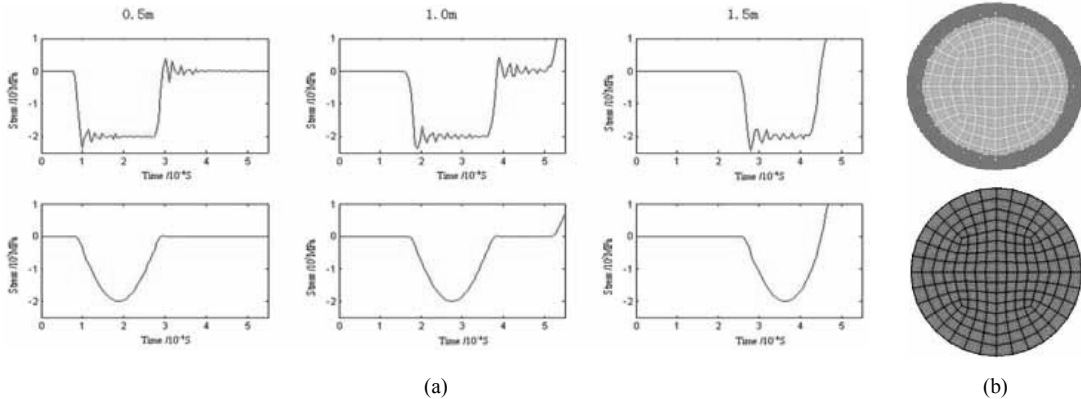


Fig. 7. Dispersion effect of different incident waves in SHPB bars (a; Signals with different incident wave, b; Stress distribution at a bar section for different waves)

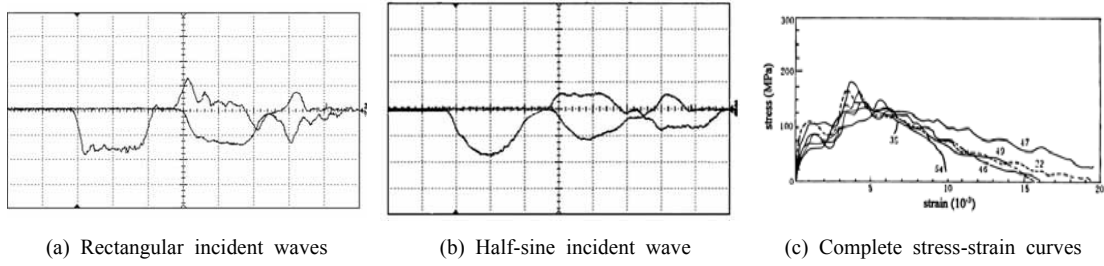


Fig. 9. Test signals and obtained stress-strain results with rectangular and half-sine waves

기하형태에 따라 파형이 달라진다는 것을 의미한다. 이러한 차별 때문에 특수한 형태를 가진 충격자를 만든다면 half-sine 파를 발생시킬 수 있을 것이라는 것을 착안하게 되었다. 이러한 목적으로 저자들은 Impact Discrete Inverse Theory를 개발하였다. 이 이론은 파형을 원하는 형태로 생성할 수 있는 충격자의 2차원 형상을 제공할 수 있는 것이다.

그림 8의 (a)는 half-sine 파를 생성하는 충격자의 단순한 형태의 하나이다. 최근에 물체의 댐핑이나 마찰효과 분산 등등과 같은 3차원 요소를 고려하기 위하여, FE(Finite Element)와 NNW(Neural Network)를 결합한 방법으로 3S 방법을 보다 더 정밀하게 설계할 수 있게 되었다(그림 8의 (b) 참고).

4. SHPB 시험에서 3S 충격자의 적용

하중속도가 증가함에 따라 암석의 동적강도는 증가한다. MTS 나 INSTRON 같은 유압서보 조절장치에서 하중속도는 10^{-5} - $10^2/s$ 정도이며 정하중강도를 얻을 수 있다. 하중속도가 10^2 - $1/s$ 정도 발휘되는 공압장치가 개발되었다(Zhao et al., 2000). 보다 높은 속도인 1000/s 이상의 하중속도를 얻기 위하여 Gas-gun 장치가 암석에서의 반응을 측정하는데 성공적으로 적용되었다. 그렇지만 천공이나 보링작업에서 일반적으로 나타나는 중간정도의 속도인 100-1000/s를 사용한 실험장치나 시험결과는 많지 않다.

이러한 시점에서 대구경 SHPB 장치를 고안하여 중간속도를 성공적으로 얻을 수 있었다(Li and Lok, 2005). 대구경 SHPB 장치에서 3S방법에 의한 half-sine 응력파를 유도하여 중간크기의 하중속도에서 많은 암석시험이 수행되었다(Li and Lok, 2002, 2005; Zhou and Li, 2006).

그림 9는 시험에서 입사파의 형상에 따라 측정된 전형적인 신호와 해석되어진 응력-변형률 곡선을 보여주고 있다(그림 9의 b에서 중앙선 좌측은 입사파, 우측의



Fig. 10. Strikers for dynamic size effect research

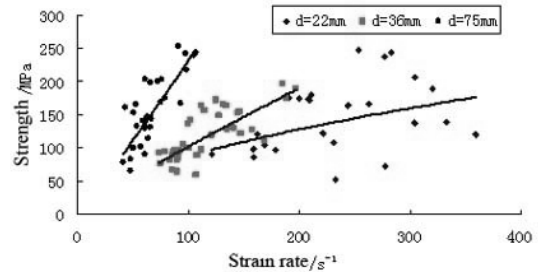


Fig. 11. Size effect for granite under different strain rates

사각형은 반사파, 그리고 우측의 사인형상은 투과파를 뜻함. half-sine 형태의 입사파에서 편평한 반사파 부분은 암석이 일정한 속도로 변형되고 있음을 암시하는 것이며, 응력-변형률 곡선이 유연하게 전개되는 것은 half-sine 입사파가 파의 분산이나 진동을 크게 제거하고 있음을 보여주는 것이다.

암석은 내부의 결함이나 입자들 때문에 대체로 불균질하므로 이의 강도는 항상 크기효과를 갖고 있다. 정

하중 강도의 크기효과는 많이 연구되어 왔지만, 동하중에서는 복잡하기 때문에 거의 연구되지 않았다. 3S방법으로 고안된 충격자의 직경이 22 mm 및 36 mm, 75 mm일 경우에 동하중에서 화강암 및 이암, 석회암의 크기효과가 연구되었다(Li and Hong, 2008). 그림 10은 크기가 다른 세 종류의 충격자 사진이며, 그림 11은 다른 하중속도에서 화강암의 강도의 크기효과를 보여주고 있다.

5. 결론

본 연구에서는 3S방법으로 충격자를 고안하였으며, 이를 사용하여 SHPB 장치의 발전을 이루었다. 이러한 충격자와 발생하는 half-sine 응력파의 장점으로 인하여 사각형 파와 비교하여 시험도 발전하였다. 3S 충격자에 의한 시험결과를 소개하였으며, 이의 새로운 개발방안도 제시되었다.

감사의 글

본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘지하 복공식 에너지 저장시스템 개발연구’에 의하여 연구비가 지원되었습니다.

참고문헌

1. 조상호, 조슬기, 천대성, 신중호, 양형식, 김승곤, 2008, 충격하중을 받은 인공취성재료의 손상평가에 관한 연구, 터널과 지하공간, 18-6, 457-464.
2. 조상호, 조슬기, 김승곤, 박찬, K. Kaneko, 2009, 단계적 충격하중에 의한 암석의 동적손상매커니즘에 관한 실험적 연구, 터널과 지하공간, 19-6, 545-557.
3. Asprone D., E. Cadoni, A. Prota and G. Manfredi, 2009, Dynamic behavior of a Mediterranean natural stone under tensile loading, IJRMMS, 46-3, 514-520.
4. Frantz C.E., P.S. Follansbee and W.J. Wright, 1984, New experimental techniques with the split Hopkinson pressure bar, Proc 8th Int Conf High Energy Rate Fabrication, Berman I. and Schroeder J.W, eds., San Antonio, 17-21.
5. Frew D.J., M.J. Forrestal and W. Chen, 2002, Pulse shaping techniques for testing brittle materials with a split Hopkinson pressure bar, Experimental Mechanics, 42-1, 93-106.
6. Li X.B. and D.S. Gu, 1994-a, Rock impact dynamics, Central South Univ Technol Press, Changsha, China (in Chinese).
7. Li X.B. and D.S. Gu, 1994-b, Energy dissipation of rock under impulsive loading with different waveforms, Explosion and Shock Waves, 14-2, 129-139.
8. Li X.B., I. Hong, T. Yin and et al., 2008, Relationship between diameter of split Hopkinson pressure bar and minimum loading rate under rock failure, J. Cent South Univ. Technology, 15-2, 218-223.
9. Li X.B., D.D. Liu and A.H. Liu, 1998, Study on reasonable loading stress waveforms for impact machines, J. Cent South Univ. Technology, 29-2, 116-119 (in Chinese).
10. Li X.B., T.S. Lok, J. Zhao and et al., 2000, Oscillation elimination in the Hopkinson bar apparatus and resultant complete dynamic stress-strain curves for rocks, IJRMMS, 37-7, 1055-1060.
11. Li X.B., T.S. Lok, and J. Zhao, 2005, Dynamic characteristics of granite subjected to intermediate loading rate, RMRE, 38-1, 21-39.
12. Li X.B., Z.L. Zhou, and W.H. Wang, 2005, Construction of ideal striker for SHPB device based on FEM and neural network, Chinese J. Rock Mech Engineering, 24-23, 4215-4219 (in Chinese).
13. Li X.B., Z.L. Zhou, and Y.S. Zhao, 2007, Approach to diminish scattering of results for split Hopkinson pressure bar test, J. Cent South Univ. Technology, 14-3, 404-407.
14. Li X.B., Z.L. Zhou, T.S. Lok and et al., 2008, Innovative testing technique of rock subjected to coupled static and dynamic loads, IJRMMS, 45-5, 739-748.
15. Lok T.S., X.B. Li, D. Liu and J. Zhao, 2002, Testing and response of large diameter brittle materials subjected to high strain rate [J]. J. Mat in Civil Engineering, 14-3, 262-269.
16. Ma L. and J. J. K. Daemen, 2004, Strain rate dependence of mechanical properties of welded Topopha Spring tuff, IJRMMS, 41-s1, 209-214.
17. Xia K., M.H. Nasser, B. Mohanty and et al., 2008, Effects of microstructures on dynamic compression of Barre granite, IJRMMS, 45-6, 879-887.
18. Zhao J., H.B. Li, M.B. Wu and T.J. Li, 1999, Dynamic uniaxial compression tests on a granite, IJRMMS, 36-2, 273-277.
19. Zhao J. and H.B. Li, 2000, Experimental determination of dynamic tensile properties of a granite, IJRMMS, 37-5, 861-866.
20. Zhou Z.L., X.B. Li, Y. Zou Y and et al., 2006, Fractal characteristics of rock fragmentation at strain rates of 1-100/S, J. Cent South Univ. Technology, 13-3, 290-295.
21. Zhou Z.L., D.Y. Li, G.W. Ma and et al., 2008, Failure of rock under dynamic compressive loading, J. Cent South Univ. Technology, 15-3, 339-343.



박철환

1979년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사

1981년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사

1987년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 042-868-3244

E-mail: cwpark@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 책임연구원



박의섭

1989년 서울대학교 공과대학 자원공학과 공학사

1991년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학석사

2000년 서울대학교 대학원 자원공학과 공학박사

Tel: 042-868-3098

E-mail: espark@kigam.re.kr

현재 한국지질자원연구원 지구환경연구본부 선임연구원