

진동전파 경로에서의 진동전파 방지대책

허 영

(수원대학교 토목공학과)

1. 머리말

도로 및 철로변에서 차량 또는 열차에 의해 발생하는 지반 진동문제는 인근 구조물에 미치는 피해뿐 아니라 생활 수준의 향상에 따라 주변의 생활 환경을 악화시키는 주요한 원인으로 인식되고 있다. 이러한 진동을 억제하기 위한 방법은 방진대책이 수립되는 위치에 따라 다음과 같이 나뉘어 진다:

- 진동원 대책
(예 : balancing, isolation, attachment of a tuned mass damper)
- 수진점 대책
(예 : stiffening, constructive change, attachment of a tuned mass damper)
- 진동전파 경로 대책
(예 : open-barrier, infilled barrier)

이 세 가지 방법들은 각기 장단점을 가지고 있어, 현장여건 또는 진동의 동적특성 등을 고려하여 가장 적절한 방법이 채택되어야 한다. 이들 중 여기에서 다루고자 하는 것은 진동 전파경로 상에서의 대책으로, 진동원 대책 및 수진점 대책이 불가능한 경우 또는 이 두 가지 방법으로는 충분하지 못한 경우에 사용될 수 있다. 예를들면 열차운행시와 같이 길이가 긴 선(線)진동원이 있는 경우나 수진점의 규모가 큰 경우에는 진동전파 경로상의 방법인 방진구 또는 방진벽에 의한 진동차단 방법이 유리할 수 있다.

2. 방진구조의 설계

진동전파 경로 대책을 사용하는 경우, 충분한 진동저감의 효과를 얻기 위해 방진구조의 폭, 깊이, 길이, 위치 등이 결정되어야 한다. 이러한 사전 설계단계에서는 수치해석적 방법에 의한 컴퓨터시뮬레이션 방법이 사용되며, 이렇게 결정된 방진구조가 현장에서 설치된 후 측정에 의해 설치된 방진구조의 방진 효율을 검증하게 된다. 여기에서는 먼저 방진구조의 규모를 결정하기 위해 사용되는 컴퓨터 시뮬레이션에서 사용되는 수치해석방법에 관해 논한다.

진동차단구조물의 해석을 위해 사용되는 수치해석방법은 크게 다음과 같이 나뉘어진다.

- 유한요소법(Finite Element Method)
- 경계요소법(Boundary Element Method)

이외에 유한차분법^(FD-1)과 같이 유사한 수학적 이론에 근거를 둔 다른 방법들도 있으나, 유한차분법이 갖고 있는 이론적 단점, 예를 들어 모델링의 어려움으로 인해 위의 방법들에 비해 작게 사용되고 있다. 이에 따라 여기에서는 위의 방법에 대해서만 기술하고자 한다.

2.1 경계요소법에 의한 설계

진동차단구조의 경계요소법에 의한 해석에 관해 참고문헌 (B-1, 2, 3)과 같은 논문들이 발표되었다. 먼저 참고문헌 (B-1)의 경우, 최신논문은 아니나 논문구성과 연구결과가 우수한 것으로 판단되며, 이 논문에서는 방진구의 진동차단효과를 3차원 curvilinear 경계요소에 의해 해석하고 이를 측정에 의한 결과와 비교하여 경계요소법에 의한 진동전파 해석결과의 정확성을 입증하였다. 또한 직

접차단(active isolation)과 간접차단(passive isolation) 모두를 직접구성(direct formulation)에 의한 경계요소법에 의해 연구한 것으로, 직접구성방법은 변위와 표면력(traction)을 변수로 하는 구성방법으로, 해석의 결과가 물리적 의미를 갖고있어 다른 구성방법인 반직접(semi-direct) 또는 간접(indirect) 구성방법에 비해 실무적 적용시 장점을 나타낸다.

참고문헌 (B-1)에서 검토한 것은 그림 1과 같은 직접차단의 경우로, 방진구로 둘러싸인 기초에서 주파수 50 Hz의 진동의 방진구에 의한 진동차단효과를 그림 2에서와 같이

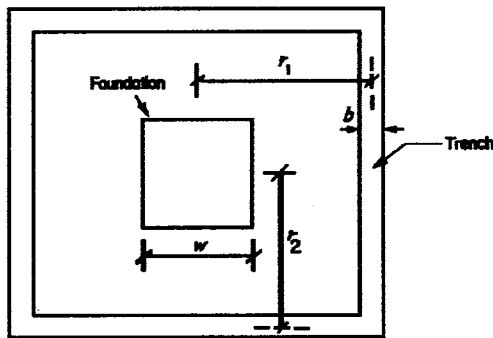


그림 1 반무한 영역에서의 직접차단 모델

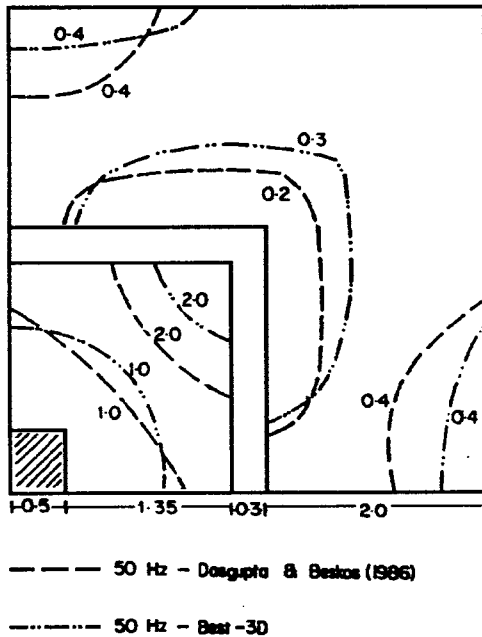


그림 2 직접차단의 해석결과

대칭을 이용한 1/4모델만으로 해석하였다. 이 때 지반은 반무한영역으로 가정하였다. 해석결과를 나타낸 그림 2에서는 진폭저감효과를 방진구 설치후와 설치전의 진폭비인 진폭저감계수(amplitude reduction factor)에 의해 표시하였고, 참고문헌 (F-6)의 결과와 비교하였다. 두 결과는 약간의 차이를 보여 참고문헌 (E-2)에서는 경계요소의 수를 늘려 재해석하였으나 거의 같은 결과를 얻었다. 해석결과는 방진구 뒤에서 설치 전에 비해 0.2배 정도의 진폭을 나타내어 충분한 감쇠효과를 나타내었다. 진폭감쇠비는 방진구에서 더 떨어진 위치에서는 0.4로 더 큰 값을 보이나, 이는 진폭의 절대값이 적으므로 문제가 되지 않는다.

또한 참고문헌 (B-2)에서는 경계요소법에 의한 해석결과를 측정값과 비교하기 위해 그림 3에 나타낸 지반에서의 해석을 수행하였다. 측정은 Woods^(E-3)에 의해 수행된 것으로, 측정장치의 설치가 그림 3에 나타나 있다. 직접차단에서의 해석결과는 그림 4에 Woods의 측정값과 함께 나타나 있으며, 서로 매우 유사한 결과를 나타내고 있다. 그림 5는 간접차단 경우에 대한 해석결과와 측정결과의 비교로 역시 매우 유사한 결과를 보이고 있다.

참고문헌 (B-3)에서는 앞에서의 참고문헌

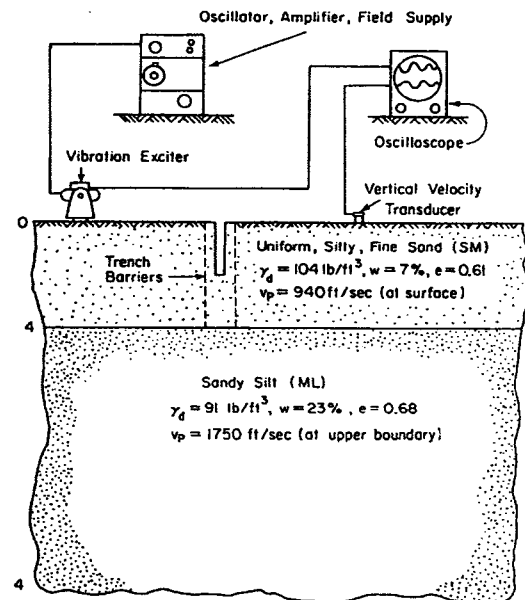


그림 3 지반데이터 및 측정장치

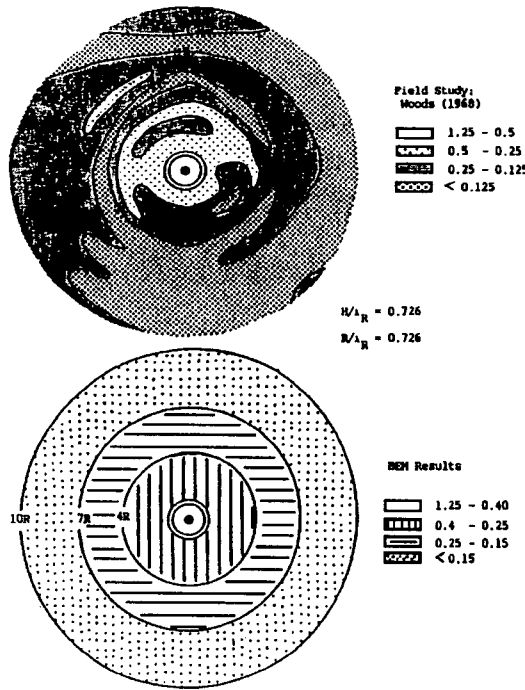


그림 4 직접차단에서의 진폭감쇠비

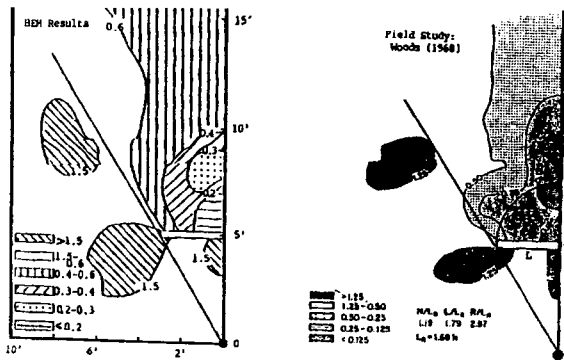


그림 5 간접차단에서의 진폭감쇠비

과 유사하게 직접구성방법에 의한 경계요소법을 사용하여 진동차단효과를 진폭저감계수에 의해 나타내었으나, 검토된 방진벽은 무한강성의 벽으로, 재질에 따른 효과는 연구되지 못하였다.

2.2 유한요소법에 의한 설계

유한요소법에 의한 전파경로 상에서의 진동차단 해석으로는 참고문헌 (F-1, 2, 3, 4) 등이 있다. 이 중 참고문헌 (F-1)에서는 시간영역에서의 2차원 평면변형률문제를 연구한 반면, 참고문헌 (F-2)에서는 연직방향의

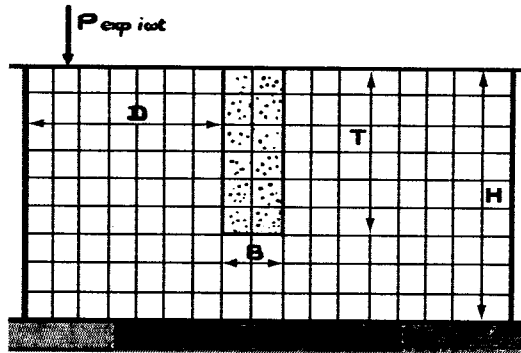


그림 6 유한요소에 의한 진동차단 모델

진동을 steady-state 문제로 정의하여 해석하였다. 이 논문에서 사용된 운동방정식 구성 방법은 참고문헌 (F-5)에서 사용된 것과 같으며, two-term power series expansion에 의해 변위를 가정한 후 각 층에서의 운동방정식을 구성하고 각 층 사이에서의 변위와 표면력의 연속성에 의해 전체 시스템의 운동방정식을 구하였다. 이러한 방법의 가장 큰 단점은 층의 기하학적 형상이 변하면 적용이 불가능한 것으로, 참고문헌 (F-2)에서 사용된 유한요소모형이 그림 6에 나타나 있고, 그림 7에는 진동원으로부터 진동차단구조물과의 거리(D)에 따른 방진구의 진동차단효과가 방진벽에 비해 훨씬 우수한 것으로 나타나 있다.

그림 8에는 두 가지의 거리에 대해 진동차단을 위한 방진구조물의 깊이(H)에 따른 진동차단효과의 변화가 진폭감쇠비에 의해 비교되어 있다. 사용된 방진구조는 콘크리트 방진벽과 방진구로, 대체로 방진구의 효과가 우수한 것으로 나타나 있다. 이는 두 가지 진동차단 구조물의 진동차단 기능이 다르기 때문이다. 즉, 방진벽의 경우 방진벽 채움재의 강성에 의해 깊이에 따른 진폭의 차이를 억제함으로써 인해 진동차단이 이루어지지만, 방진구에서는 전파매개체인 지반을 절단해냄으로써 인해 에너지의 전달을 막는 것이기 때문에 방진구의 효과가 대체로 좋게 된다.

3. 방진구 또는 방진벽의 채움재료에 따른 진동저감효과 변화

방진구 또는 방진벽의 채움재료에 따른 진

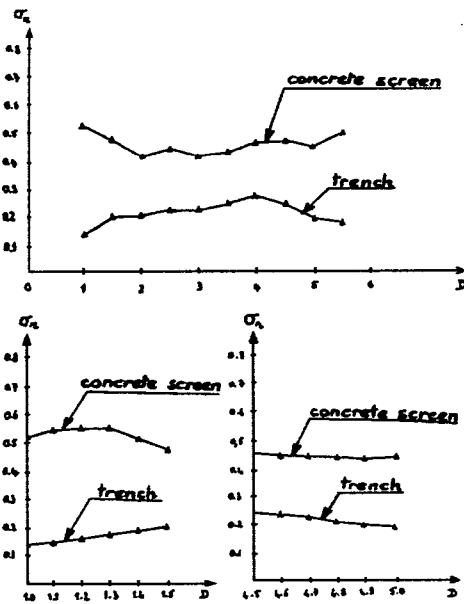


그림 7 거리(D)에 따른 콘크리트 방진벽 방진구의 진동차단효과 비교

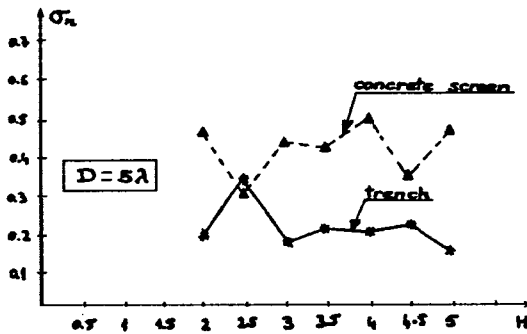


그림 8 깊이 H에 따른 콘크리트 방진벽과 방진구의 진동차단효과

동저감효과의 변화를 연구한 대표적인 논문으로는 참고문헌 (E-1, 2, 3) 등이 있다. 이 논문들은 실험적 방법에 의한 것으로, 제시된 결과들은 진동차단구조물의 설계를 위한 좋은 참고자료가 되고 있다. 이 참고문헌들의 내용은 많이 알려져 있으므로, 여기에서는 비교적 최근에 실험에 의해 진동차단구조물의 성능을 연구한 논문(E-4)에 의해 실험연구에 실험기술의 현황을 기술하려 한다.

이 논문에서 연구된 진동차단구조물은 방진구 및 페타이어, 고무조각, 스티로폼 및 슬래그로 채워진 방진벽으로, 대부분의 다른 실험논문들은 조화진동을 발생시키는 진동원으

로부터의 진동전파를 측정 한 것에 비해 이 논문에서의 진동원은 1.6 m의 높이에서 1.3 kN의 공을 떨어뜨린 충격하중으로 상당히 흥미 있는 논문이다. 이 논문에서는 전파되는 진동의 주파수분석에 의해 주파수성분의 변화가 있는지를 같이 검토하였다. 그러나 실험결과의 표시방법이 좋지 않아 이러한 새로운 시도의 실험결과를 정확히 묘사하지 못한 것이 아쉬운 점이다. 실험결과에 따르면 방진구의 경우가 역시 가장 좋은 차단효과를 나타내었다. 고무조각이나 스티로폼으로 채워진 방진벽의 경우, 가까운 거리에서는 스티로폼으로 채워진 방진벽이 더 효과가 좋았으나, 먼 거리에서는 고무조각으로 채워진 방진벽이 더 우수한 차단효과를 나타내었다.

4. 실무 적용례

4.1 방진구와 널말뚝벽에 의한 진동차단

방진구 또는 방진벽과 같은 지반진동차단 구조물에 의해 외부로부터 전달되어 오는 진동을 차단하기 위한 시도의 예는 많이 있다. 그림 9는 참고문헌 (E-1)에서 사용된 널말뚝벽 (sheet pile wall)이며, 그림 10은 벤토나이트로 채워진 방진구(bentonite-slurry filled trench)를 사용한 예이며, 그림 11은 널말뚝벽(sheet pile wall)에 의한 진동차단의 경우이다. 참고문헌 (A-2)에 의하면, 외부로부터의 지하철진동의 유입을 차단하기 위한 그림 10의 경우, 진폭이 설치 전에 비해 반으로 줄어들었으며, 진동에 민감한 기계를 외부로부터의 진동에 대해 널말뚝벽으로

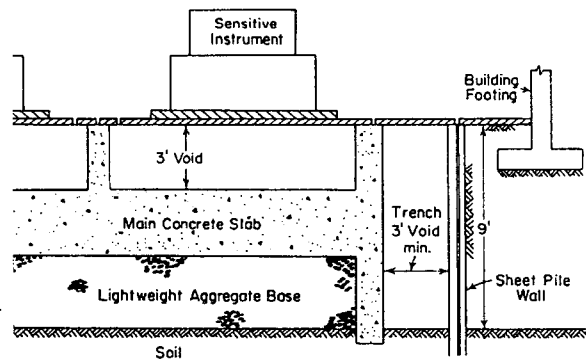


그림 9 널말뚝벽에 의한 진동차단

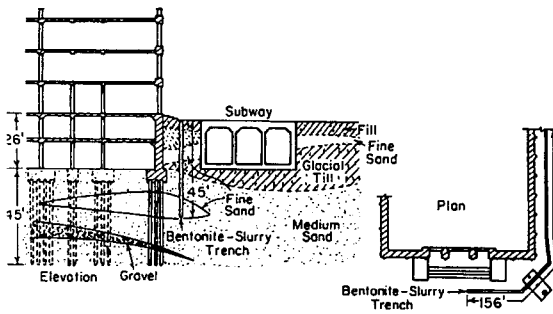


그림 10 Bentonite-slurry filled trench 에 의한 진동차단

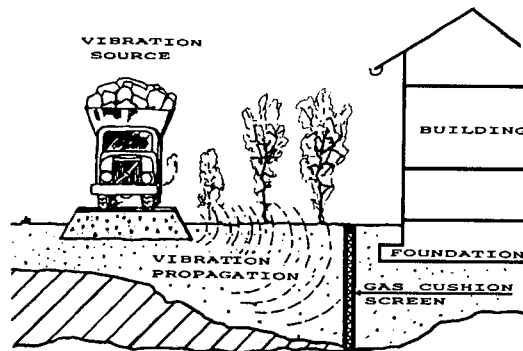


그림 12 진동차단을 위한 gas cushion배치

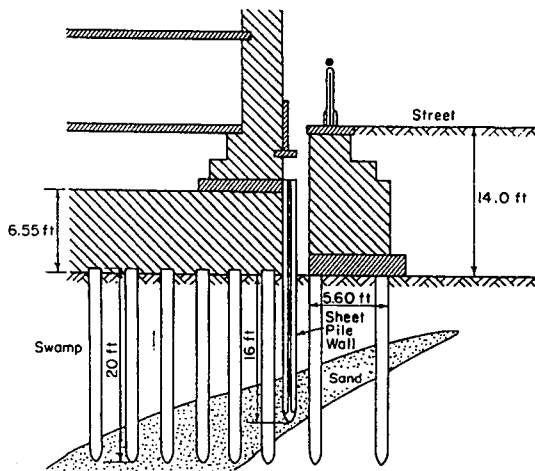


그림 11 Sheet pile wall에 의한 진동차단

차단하기 위한 간접차단(passive isolation)의 예인 그림 11에서는 최대 가속도를 100 micro-g 까지 낮출 수 있었다^(A-3).

4.2 Gas Cushion에 의한 진동차단

앞에서 언급된 것처럼, 가장 좋은 진동차단 구조물은 전파매개체인 지반을 없애 버리는 방진구이다. 방진구의 경우, 진동차단효과는 방진구의 깊이에 의존하므로 방진구를 사용해 충분한 진동차단 효과를 얻기 위해서는 방진구의 깊이를 어느 정도 확보해야 한다. 그러므로 항상 벽의 자립이 문제가 되어, 이를 위한 첫 번째 방법으로 방진구 안에 벤토나이트액을 채우는 방법이 시도되었다. 그러나 벤토나이트액으로 채워진 방진구의 경우, 지표에서의 하중에 의해 방진구가 무너질 위험이 있으며, 또한 시간이 흐름에 따라 벤토나이트액이 줄어들어 벤토나이트액으로 채워

진 방진구는 장기간의 사용이 불가능하다.

이를 위해 가스쿠션을 사용하는 기법이 참고문헌 (G-1)에서 사용되어 방진구의 단점을 보완하였다. 이것은 특수가스로 채워진 튜브를 수평으로하여 수직방향으로 겹쳐 geotextile로 연결하여 만든 가스쿠션을 방진구 안에 채워 넣는 것으로, 쿠션의 끝에 콘크리트블록을 달아 콘크리트와 벤토나이트액의 혼합으로 채워진 방진구에 갈아 앉히며, 가스쿠션은 굳어진 방진벽 내부에서 쿠션 내부의 가스압력으로 인해 충분한 구조적 안전성을 나타내게 된다.

그림 12는 진동차단을 위한 가스쿠션 배치의 예이며, 그림 13과 그림 14는 각각 진폭감쇠비에 의해 표시된 수직성분 및 수평성분의 감쇠결과이다. 이에 따르면 수직성분의 경우, 방진벽 바로 뒤에서 가장 좋은 차단효과를 나타내었으나, 수평성분은 거리가 멀어짐에 따라 차단효과가 더 좋아지는 경향을 보이고 있다.

4.3 PC Wall Pile을 이용한 방진구조

PC wall pile을 이용한 방진구조에 의한 진동차단 방법이 참고문헌 (P-1)에 발표되었다. 여기서 사용된 PC wall pile의 단면은 600 mm × 600 mm로 길이 14 m, 구멍 직경 400 mm이다. PC wall pile을 설치한 후의 진동차단 효과를 실험한 결과를 보면, PC wall pile 바로 후면에서는 설치 전에 비해 약 10 dB이 감소하였으며, PC wall pile에서 10 m 정도 떨어진 지점에서는 5 dB이 감소한 것으로 나타나 있다. PC wall pile의

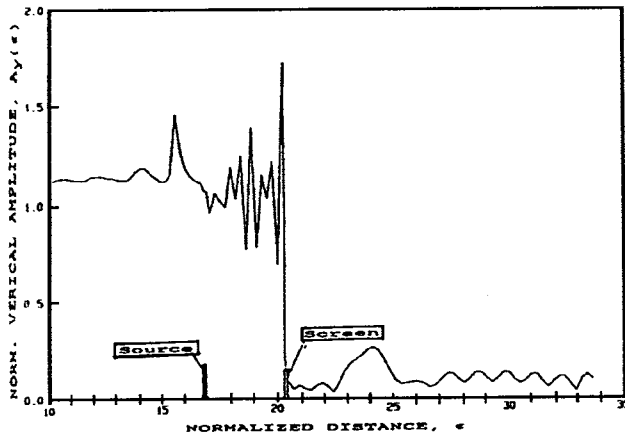


그림 13 Gas cushion에 의한 진동차단 (수직성분)

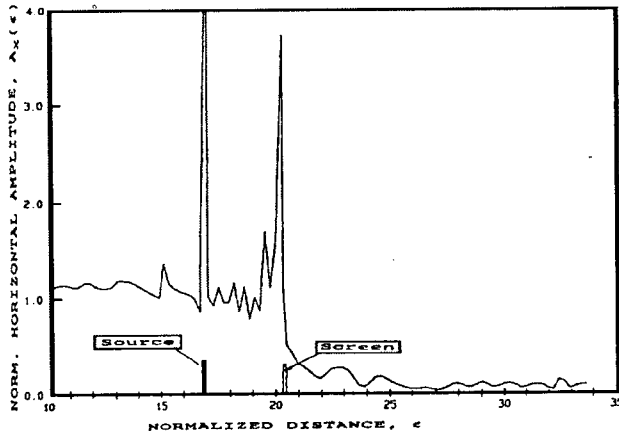


그림 14 Gas cushion에 의한 진동차단 (수평성분)

진동차단 효과는 대략 콘크리트 방진벽과 가스쿠션 방진벽의 중간 정도인 것으로 알려져 있다.

5. 맺음 말

국내에서도 개략적으로 설계된 방진구 또는 공기 튜브를 이용한 방진구조의 시공예가 있으며, 현재 건설교통부 지원으로 현재 진행 중인 방진구조 관련 연구가 체계적으로 진행되고 있다. 이 연구에서 개발된 연성채움재로 시공된 방진벽의 경우, 진폭감소계수 0.4 ~ 0.5를 나타내어 가스쿠션의 진동차단 효율인 0.2 ~ 0.35 보다는 크나, 가스쿠션과 비교해 구조적 안전성에 따른 시공 시나 설치 후의 장점을 고려할 때 사용 가능한 방진구조로 판단된다.

참고로 방진구조의 설계 순서는 아래와 같다:

- ① 현장 및 실내실험에 의한 지층 및 지반의 동적 물성치 조사
- ② 컴퓨터시뮬레이션을 통한 방진구조의 채움재 및 규모 결정(방진구조의 설치 위치의 변경이 가능한 경우, 최적 설치위치도 결정)
- ③ 시공 및 측정에 의한 방진효율 검증

참고 문헌

Boundary Element Method

- (B-1) Leung, K. L. and Vardoulakis, I. G., 1987, "Vibration Isolation of Structures from Surface Waves in Homogeneous and Nonhomogeneous Soils," Soil-Structure Interaction, Cakmak, A. S.(Ed.), Elsevier, pp. 155~169.
- (B-2) Banerjee, P. K., Ahmad, S., and Chen, K., 1988, "Advanced Application of BEM to Wave Barriers in Multi-Layered Three-Dimensional Soil Media," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 16, pp. 1041~1060.
- (B-3) Chow, N., Le, R., and Schmid, G., 1990, "Vibration Transmitting Behavior of the Soil," Proceedings: Structural Dynamics, Kratzig et al.(Eds), Vol. 2, pp. 701~708.
- (B-4) Al-Hussaini, T. M. and Ahmad, S., 1991, "Simple Design Methods for Vibration Isolation by Wave Barriers," Proceedings, Second Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, Paper No. 11.12, pp. 1493~1499.

Finite Element Method

- (F-1) May, T. W. and Bolt, B. A., 1990, "The Effectiveness of Trenches in Reducing Seismic Motion," Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol. 10, pp. 195~210.
- (F-2) Houedec, D. L. and Malek, S., 1990, "Effectiveness of Trenches or Screens for Scattering Surface Waves,"

Proceedings: Structural Dynamics, Kratzig et al.(Eds), Vol. 2, pp. 709~716.

(F-3) Haupt, W. A., 1977, "Isolation of Vibrations by Concrete Core Walls", Proceedings of the 9th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Tokyo, Vol. 2, pp. 251~256.

(F-4) Haupt, W. A., 1981, "Model Tests on Screening of Surface Waves," Proceedings of the 10th Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stockholm, Vol. 3, pp. 215~222.

(F-5) Segol, G., Lee, P. C. Y., and Abel, J. F., 1978, "Amplitude Reduction of Surface Wave by Trenches," J. of the Engng. Mechanics Division, Vol. 104, pp. 621~641.

(F-6) Dasgupta, D., Beskos, D. E., and Vardoulakis, I. G., 1986, "3-D Vibration Isolation Using Open Trenches," ASCE Conf. Comput. Mech. Atlanta, pp. 385~392.

Finite Difference Method

(FD-1) Fuyuki, M. and Matsumoto, Y., 1980, "Finite Difference Analysis of Rayleigh Wave Scattering at a Trench," Bull. Sesm. Soc. Am., Vol. 7, pp. 2051~2069.

Experiment

(E-1) Richart, F. E., Hall, J. R., and Woods, R. D., 1970, Vibrations of Soils and Foundations, Prentice-Hall.

(E-2) Das, B. M., 1993, Principles of Soil Dynamics, PWS-KENT Publishing Company, Boston.

(E-3) Woods, R. D. and Luco, J. E., 1968, "Screening of Surface Waves in Soils," J. Soil Mech. Found. Div., ASCE 94, pp. 951~979.

(E-4) Ciesielski, R. and Zieba, A., 1990,

"Experimental Investigation on Reduction of Impact Vibrations Through Ground by Means of Shallow Vertical Trenches," Proceedings: Structural Dynamics, Kratzig et al. (Eds), Vol. 2, pp. 717~722.

Application

(A-1) Barken, D. D., 1962, Dynamics of Bases and Foundations, McGraw-Hill Book Co..

(A-2) Neumeuer, H., 1963, 'Untersuchungen ueber die Abschirmung eines bestehenden Gebäudes gegen Erschuetterungen beim Bau und Betrieb einer U-Bahnstrecke', Baymaschine und Bautechnik, 10. Jahrgang, Heft 1.

(A-3) McNeill, R. L., Margason, B. E., and Babcock, F. M., 1965, "The Role of Soil Dynamics in the Design of Stable Test Pads," Guidance and Control Conf., Minneapolis, Minn., pp. 16~18.

Composite Wave Barriers

(C-1) Its, E. N. and Lee, J. S., 1992, "Screening of Surface Waves by Composite Wave Barriers," Earthquake Engng., 10th World Conf., pp. 1987~1992.

Gas Cushions

(G-1) Massarch, K. R., 1991, "Ground Vibration Isolation using Gas Cushions," Proceedings, Second Int. Conf. on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, Missouri, Paper No. 11.6..

PC Wall Pile

(P-1) Kiyoshi Hayakawa, 1998, "Ground Vibration by PC Wall Piles," 4th Int. Conf. on Case Histories in Geotechnical Engineering, 672~677.