

버팀굴착에서 횡방향 토압에 대한 스트러트 주형보의 영향

Effects of Main Girder Beams with Struts on Lateral Earth Pressure in Braced Excavation

김기범* 반재기** 조성호† 정영수*** 김석철****
Kim, Gi Beom, Ban, Jae Ki, Joh, Sung-Ho Chung, Young-Soo, Kim, Seok-Chul

ABSTRACT

MiStrut is a new method to establish structural stability in designing braced excavations by making a rigid connection between top-level steel beams and soldier beams. MiStrut has a function of working as a strut as well as supporting cover plates of top-level steel beams. The structural mechanism of MiStrut is supposed to reduce flexural deformation of soldier beams, which may lead to reduced lateral earth pressures behind excavation. In this research, for verification of the performance of MiStrut, shear-wave velocities of subsurface soil before and after excavation was compared. The rigid connection of main girder beams with soldier beams reduced shear-wave velocity by 67% and lateral earth pressures by 90%, which indicates that MiStrut is effective development in reducing lateral earth pressures on braced excavation.

1. 서 론

버팀화 부재 공법은 H형강 흙막이벽을 이용하는 버팀굴착시 주형보를 스트러트화함으로써 구조적 안정성과 토류벽 설계의 경제성을 확보하고자 하는 새로운 공법이다. 본 연구에서 평가한 주형보의 스트러트화 공법은 최상단 스트러트를 설치하지 않는 대신에 주형보가 복공 지지구조물의 기능에 더하여 버팀보 기능을 발휘할 수 있도록 개발된 것으로, 엄지말뚝의 변형을 주형보로 직접 전달할 수 있도록 한 것이다. 주형보 스트러트화의 횡방향 토압에 대한 효과를 확인하기 위하여, 중앙대학교 안성캠퍼스 인근 자연부지에 11m×16m의 면적에 6.5m의 터파기를 시행하였고, 횡방향 토압을 지지하기 위하여 엄지말뚝과 띠장 등을 설치하였다. 또한 그림 1에 도시한 바와 같이 차량하중 재하를 위하여 터파기 상단에 주형보를 설치하였다. 본 연구에서는 그림 1과 같은 자연지반의 터파기 현장에 대한 실물재하 시험을 통하여 주형보 스트러트화가 횡방향 토압에 미치는 효과를 확인하고자 하였다. 터파기를 지지하고 있는 엄지말뚝 배면에 작용하는 횡방향 토압의 측정을 위해서 비파괴 표면파 시험을 수행하였고, 이로부터 심도별로 평가된 전단파 속도를 측정하여 횡방향 토압변화를 평가하였다.

2. 지반 전단파 속도를 이용한 지중응력 평가

Santamarina (2001)는 연속체에서 응력의 상태는 매질의 강성에 영향을 미치고 결과적으로 P-파와 S-파의 전파속도에도 영향을 미친다고 하였다. 특히 S-파 속도의 경우는 매질 내의 유효응력 상태, 즉 입자간의 연결상태를 반영하는 입자 강성에 의해 결정된다고 하였다. 특히 임의 매질에 등방조건의 하중

† 책임저자 : 정회원, 중앙대학교 토목공학과, 교수
E-mail : shjoh@cau.ac.kr
TEL : (031)670-4664 FAX : (031)675-1387

* 동부건설(주), 공학박사

** (주)선진엔지니어링 종합건축사사무소, 상무

*** 정회원, 중앙대학교, 토목공학과, 교수

**** 학생회원, 중앙대학교, 토목환경공학과, 석사과정

이 작용할 때, 유효응력과 탄성과 전파속도는 식 (1)으로 표현가능하다고 하였다.

$$\sigma'_0 = \tilde{\alpha} V^{\tilde{\beta}} \quad (1)$$

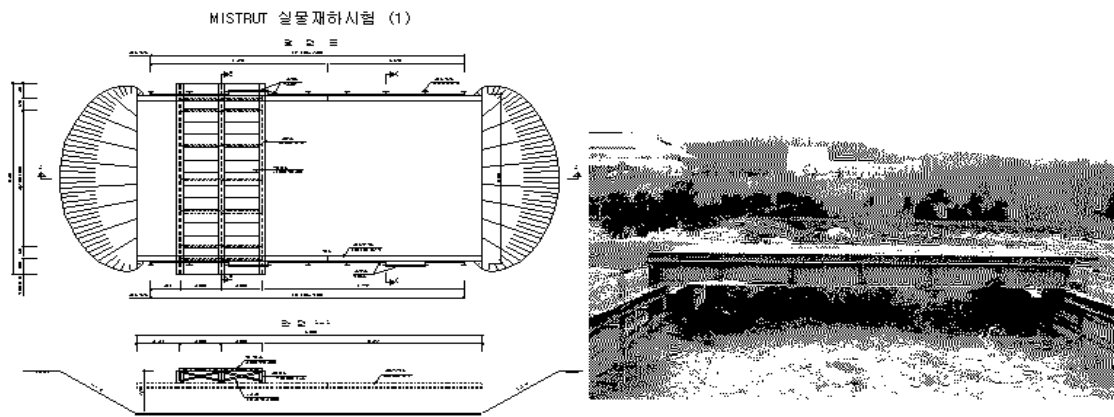
여기서 $\tilde{\alpha}$ 와 $\tilde{\beta}$ 는 실험으로 결정되는 상수이며, 특히 $\tilde{\alpha}$ 는 1KPa 구속압이 작용할 때 매질의 탄성과 속도의 역수이다.

한편, Vucetic and Dobry (1991)은 전단탄성계수와 평균유효주응력간의 관계를 식 (2)와 같이 정의하였다. 전단탄성계수와 전단파속도와의 관계 (즉, $G = \rho V_s^2$)를 고려하여 볼 때, 식 (2)와 식 (3)와 같이 단순화 될 수 있다. 즉, 평균유효주응력은 전단파속도의 지수승에 비례하는 관계라고 할 수 있다.

$$G_{m \max} = 625 \frac{OCR^k}{0.3 + 0.7e^2} \sqrt{P_a \sigma'_0} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \sigma'_0 &= \frac{1}{P_a} \left\{ \frac{0.3 + 0.7e^2}{625 OCR^k} \right\}^2 G_{m \max}^2 \quad (3) \\ &= c V_s^4 \end{aligned}$$

여기서 $\sigma'_0 = \frac{1+2K}{3K} \sigma'_h$ 이고, K 는 횡방향 토압계수이다. 따라서, 식 (2)를 참고하여 볼 때, 엄지말뚝의 횡방향 변위로 인하여 굴착배면토가 횡방향 응력이 증가되는 경우 지층의 전단파 속도가 증가한다고 할 수 있다.



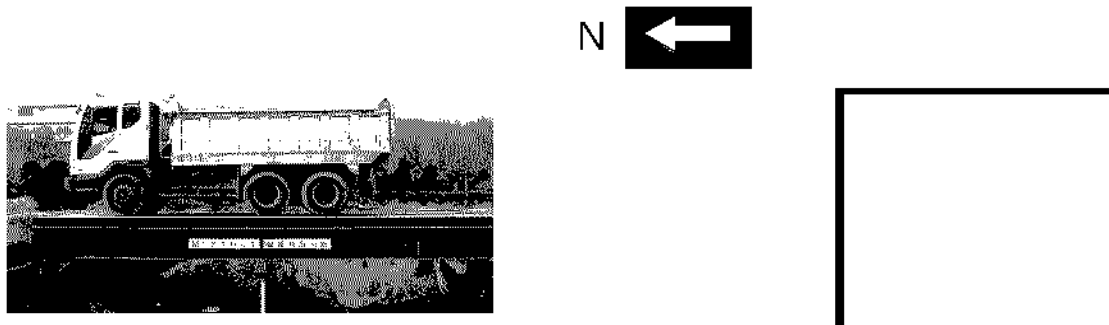
(a) 터파기 도면과 주형보 설치계획 (b) 주형보가 설치된 버팀굴착 현장
그림 1. 주형보 스트러트가 횡방향토압에 미치는 효과를 확인하기 위한 현장실물 재하시험

3. CapSASW 시험을 이용한 지반 전단파속도의 평가

지반 내의 전단파 속도를 지층별로 평가하기 위하여 표면파 기법의 일종인 CapSASW (조성호외, 2005) 시험을 수행하였다. CapSASW 시험을 수행하기 위하여 그림 2에 도시된 바와 같이 주형보 인접한 곳인 SW-L1 시험축선과 주형보에서 2.5m 이격되어 있는 SW-L2 시험축선을 설정하였다. CapSASW 시험축선 SW-L1과 SW-L2는 모두 1m 길이의 축선으로 4.5Hz 지오폰을 사용하여 시험을 수행하였다.

CapSASW 시험으로 측정된 표면파 분산곡선은 시험축선 SW-L1과 SW-L2에 대하여 그림 3과 4에 각각 도시하였다. CapSASW 시험은 모두 3차례에 걸쳐서 수행되었다. CapSASW 시험이 수행된 3 가지 경우는 1. 주형보에 트럭하중을 재하하기 전, 2. 주형보에 트럭하중을 재하하고, MiStrut을 체결한 상태, 3. 주형보에 트럭하중을 재하하고, MiStrut 체결을 풀은 상태 등이다. 세 가지 각 경우에 대하여 측정된 표면파 속도를 비교한 결과, 주형보에서 2.5m 이격되어 있는 축선의 매질에서는 하중 조건에 따라 큰 변화를 보이지 않았지만, 주형보에 인접하여 측정된 매질에서는 하중조건에 따라 명확한 변화가 측정되었다. 하중조건에 따른 표면파속도의 변화를 간단히 정리하면 다음과 같다.

- MiStrut을 체결하지 않고 트럭하중을 재하한 경우는 MiStrut을 체결하고 트럭하중을 재하한 경우보다 표면파 속도가 다소 크게 측정되었다. MiStrut의 체결을 해지한 결과, 파장의 길이가 1~3m 구간에서는 약 10%, 3~9m 구간에서는 약 20% 정도로 표면파 속도가 증가한 것으로 나타났다.
- 트럭하중을 재하하지 않은 경우와 MiStrut을 체결하고 트럭하중을 재하한 경우 표면파 속도는 거의 동일하게 측정되었다. 즉, MiStrut 체결로 인하여 엄지말뚝의 횡방향 변위가 억제됨으로써 지반내의 횡방향 응력 증가 요인이 완화된다고 판단된다.
- 주형보에서 2.5m 이격된 지점에서는 트럭하중의 재하, MiStrut의 체결 등으로 인한 영향이 측정되지 않았다. 즉, 2.5m 횡방향으로 이격된 매질은 주형보로 인한 응력변화 영향권 밖에 있는 것으로 판단된다.



(a) 차량하중 재하상태 (b) 횡방향 토압평가를 위한 CapSASW 시험측선

그림 2. 지중응력 평가를 위한 CapSASW 시험 측선

4. 전단파속도 측정에 의한 수평응력의 평가

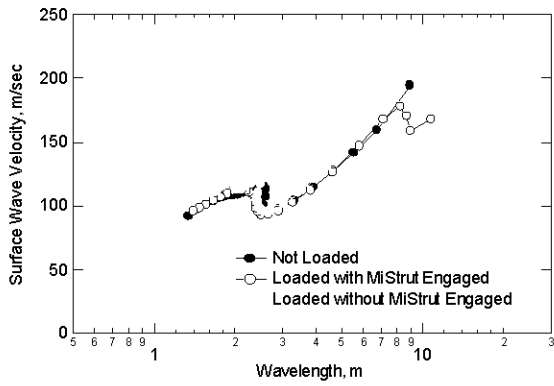
CapSASW 시험으로 측정한 표면파 속도 분산곡선을 역산해석하여 깊이별 전단파 속도를 구하였다. 해석결과는 그림 3.3.4에 주상도의 형태로 도시하였고, 구체적인 전단파 속도는 표 1에 정리하였다. MiStrut을 체결함으로써 횡방향 변위가 제한되는 효과는 표면파 속도의 크기에서 나타난 것처럼 각 지층의 전단파 속도에서도 나타났다. 그림 3.3.4에서 비교한 것처럼 MiStrut을 체결한 결과 감소된 전단파 속도는 0.67 배까지인 것으로 평가되었다.

식 (3)을 이용하여 MiStrut 설치유무에 대한 횡방향 응력의 비를 표현해 보면 식 (4)과 같다. 이를 이용하여 횡방향 응력의 비를 계산한 결과를 표 2에 정리하였다. MiStrut의 설치로 인하여 횡방향 응력은 최대 약 90% 수준으로 감소되는 것으로 평가되었다.

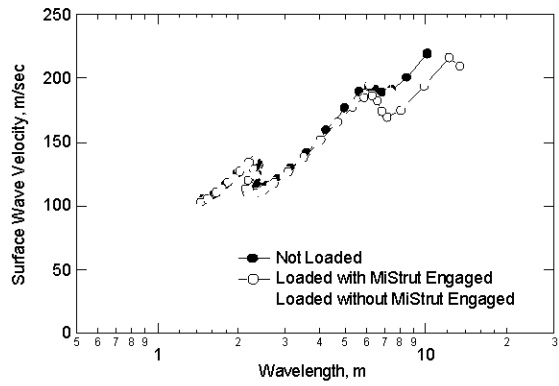
$$\frac{\sigma_{h,2}}{\sigma_{h,1}} = \left(\frac{V_{s,2}}{V_{s,1}} \right)^4 \quad (4)$$

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 MiStrut을 주형보에 체결함으로써 얻을 수 있는 횡방향 응력의 감소효과를 지층의 전단파 속도의 항목으로 평가하였다. 측정결과 버팀화 부재를 주형보에 체결함으로써 얻을 수 있는 횡방향 응력의 감소효과를 지층의 전단파 속도의 항목으로 확인할 수 있었다. 본 연구에서 수행한 구조형식 및 지반조건에서 버팀화 부재 설치로 인하여 전단파 속도는 67%까지 감소하였고, 횡방향 응력은 90%수준까지 감소하였다. 따라서



(a) SASW 측선 SW-L1



(a) SASW 측선 SW-L3

그림 3. CapSASW 시험으로 측정된 위상속도 분산곡선

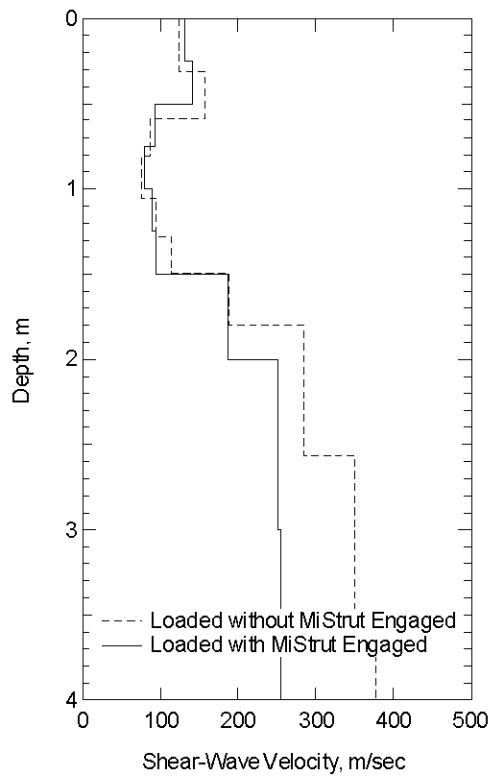


그림 4. CapSASW 시험으로 측정된 전단파 속도의 변화: SASW 측선 SW-L1

참고문헌

- Santamarina, J.C. (2001). Soils and Waves. John Wiley & Sons Ltd., p.488.
- Vucetic, M., Dobry, R. (1991). Effect of Soil Plasticity on Cyclic Response, Journal of Geotechnical Engineering, vol. 117, No. 1, pp. 89-106.
- 조성호, 장대우, 강태호 (2005). CAP-SASW 기법에 의한 지반절편의 전단강성구조 평가, 한국지반 공학회 논문집.

표 1. MiStrut 설치시와 미설치시 각각 CapSASW 시험으로 측정된 지반 전단파 속도

Layer No.	MiStrut Not Engaged		MiStrut Engaged	
	Depth, m	S-Wave Vel., m/sec	Depth, m	S-Wave Vel., m/sec
1	0.0	124.1	0.0	131.1
2	0.3	156.7	0.3	142.5
3	0.6	86.7	0.5	93.2
4	0.8	75.9	0.8	79.7
5	1.1	95.2	1.0	90.0
6	1.3	114.2	1.3	94.0
7	1.5	188.8	1.5	186.5
8	1.8	284.8	2.0	251.0
9	2.6	350.6	3.0	254.7
10	3.6	377.7	4.0	253.2

표 2. MiStrut 설치로 인하여 감소된 횡방향 응력

지층 번호	전단파속도, $V_{S,1}$ (MiStrut 미설치)	전단파속도, $V_{S,2}$ (MiStrut 설치)	전단파속도의 비 ($V_{S,2}/V_{S,1}$)	횡방향응력의 비 ($\sigma_{h,2}/\sigma_{h,1}$)
	m/sec	m/sec		
1	124.11	131.08	1.06	1.01
2	156.69	142.48	0.91	0.98
3	86.69	93.22	1.08	1.02
4	75.94	79.72	1.05	1.01
5	95.25	90.04	0.95	0.99
6	114.15	93.97	0.82	0.95
7	188.84	186.46	0.99	1.00
8	284.81	251.01	0.88	0.97
9	350.62	254.73	0.73	0.92
10	377.69	253.20	0.67	0.90