

개단 강관말뚝의 폐색효과에 대한 모형실험 연구

Evaluation of Plugging Effect of Open-Ended Model Pipe Pile

김 명 모*
Kim, Myoung Mo

Abstract

Plugging effect of open-ended pipe piles is known to have a close relationship with the ratio of an embedment depth to a pile diameter, i.e., the relative embedment ratio. To evaluate this relationship in the concrete, load tests are performed on the open and the close ended model piles varying the relative embedment ratio as well as the relative density of the model test ground. Cross-shaped hollow plates are attached at the open pile ends to reduce the effective pile diameters, on which load tests are also performed.

As a result, it is confirmed that higher plugging effect may be obtained in the denser ground at lower relative embedment. However, 100% plugging effect can be obtained at the relative embedment ratio of 25 or bigger regardless of the density of the ground. Increment of the plugging effect by introducing the cross-shaped attachment can hardly be achieved.

요 지

개단 강관말뚝의 선단지지력은 폐색 효과에 의하여 발생되는데 이 폐색 효과는 말뚝의 직경에 대한 관입깊이의 비 즉, 상대 관입깊이와 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다. 이에 본 연구에서는 폐색 효과를 종합적으로 평가하기 위하여 지반의 상대밀도와 모형말뚝의 상대 관입 깊이를 달리하여 재하시험을 수행하였으며 개단 말뚝의 유효직경을 축소시킬 목적으로 십자 모양의 칸막이 판을 선단에 부착한 모형말뚝에 대한 시험도 병행하였다.

그 결과로서 개단 말뚝은 말뚝의 극한 지지력을 기준으로 폐색효과를 평가할 때 말뚝 타설 지반이 단단할수록 작은 상대관입깊이에서 큰 폐색효과를 얻을 수 있으나 100%의 폐색효과는 지반의 상대밀도에 상관없이 대략 상대관입깊이 25 정도에서 발휘된다는 사실을 알았다. 그리고 칸막이 판의 설치로 인한 폐색효과의 증대는 기대하기 어려운 것으로 판단된다.

1. 서 론

강관 말뚝에는 선단부가 막힌 폐단강관 말뚝과 선단부가 열린 개단강관 말뚝이 있으며 일반

적으로 강관말뚝은 선단이 열린채 타입된다.

말뚝의 극한 지지력은 계산 편의상 독립적으로 산정된 주변 마찰력과 선단 지지력의 합으로서 나타내는데 이때 선단 지지력은 선단 면적만큼의 지반이 감당할 수 있는 극한 저항력을 의

* 정회원 · 서울대학교 공과대학 부교수, 토목공학과

미한다. 그런데 개단 강관말뚝에 있어서 말뚝의 선단 면적은 실제 강재 단면부의 크기에 관계없이 폐단 말뚝과 동일한 것으로 간주한다. 그 이유는 개단 말뚝이 지반에 타입될 때 말뚝속으로 밀려 들어간 흙으로 인하여 말뚝의 선단부가 막힌 것과 흡사한 효과를 발휘하기 때문이며 이를 개단 강관 말뚝의 폐색 효과(plugging effect)라고 한다.

폐색효과를 일으키는 저항력은 강관내의 흙덩이와 말뚝의 내 주변면 사이에 발생하는 부착력인데 이 부착력보다 개단 말뚝의 강재단면부에 의한 선단 지지력을 합하여 그 크기가 폐단 말뚝의 선단 극한지지력과 같거나 그 이상이면 완전 폐색이라고 하고 그 이하일 때는 불완전폐색이라고 한다. 이때 폐색효과의 정도를 폐색율로서 나타내며 이 폐색율을 낮으로써 개단 말뚝의 정확한 지지력을 산정할 수 있다.

일반적으로 개단 강관말뚝의 직경이 작거나 관입깊이가 클수록 폐색효과가 크다. 그러나 직경이 작은 말뚝이라도 관입 깊이가 작으면 폐색효과가 작고 직경이 큰 말뚝이라도 충분한 관입 깊이를 가지면 폐색효과가 크게 되므로 말뚝의 직경에 대한 관입깊이의 비(L/D) 즉, 상대 관입 깊이와 폐색 효과 사이에는 긴밀한 관계가 있다. 그리고 말뚝의 상대 관입깊이가 동일할 때라도 지반 조건에 따라서 관내토의 높이와 마찰저항력이 달라질 것이므로 말뚝 주변의 지반상태도 폐색 효과에 큰 영향을 미칠 것으로 생각된다.

개단 강관말뚝의 폐색효과에 대한 연구는 1964년 이후 일본에서 활발하게 진행되어 왔으며(山原⁽¹⁾, 山肩⁽²⁾, 勝見⁽³⁾) 최근에는 폴란드학자 Klos와 Tejchman^(4,5)에 의한 연구결과가 발표된 바 있는데, 이 논문들은 주로 강관의 내부 주변면과 관내토 사이의 역학적 거동에 중점을 두고 실험적 혹은 이론적인 폐색율 산정식을 제안하였다. 실험 논문의 경우 모형 강관 내부에 흙을 채우고 밀어 올리는 실험을 하는 등 관내토의 마찰저항을 말뚝의 외주변 마찰력과 분리하여 측정하려는 노력이 진행되어 왔는데 아직까지 실용성있는 방법이 마련되지 않고 있다. 이론적 분석⁽³⁾은 Kötter의 소성 방정식을 이용하여 시도되었는데 관내토 압축정도의 상하 불균

일성이나 아칭(arching)현상 등 복합적인 역학기구(mechanism)를 고려하기에 미흡하다고 생각된다.

이에 본 연구에서는 외주변 마찰력과 관내토에 의한 내주변 마찰력의 구분없이 개단 및 폐단 강관말뚝의 총 지지력을 비교하여 폐색효과를 평가하고자 한다. 이를 위하여 모형 말뚝에 대한 재하시험을 수행하였으며 개단 및 폐단말뚝의외에 개단 말뚝 선단부의 유효직경을 축소시킬 목적으로 십자 모양의 칸막이판을 부착한 모형 말뚝에 대한 시험을 병행하였다. 현장에서의 응용을 위하여 폐색효과와 말뚝의 상대 관입깊이 사이의 관계를 도시하였으며 이 관계로부터 폐색율 100%가 되는 상대 관입깊이를 결정하였다. 아울러서 폐색율에 대한 지반의 상대 밀도의 영향을 분석하였다.

2. 실험 계획

모형 말뚝을 타입한 실험지반 흙은 사질토로서 이 흙의 공학적 성질은 표 1에 나타난 바와 같다. 폐색효과에 대한 실험 지반밀도의 영향을 알아보기 위하여 각각 25%와 73%의 상대밀도를 갖는 두 종류의 지반을 사용하였다.

표 1. 실험지반흙의 공학적 성질

상대 밀도 (%)	진조단위중량(g/cm ³)	간극비	내부마찰각(°)
0	1.37	0.95	—
25	1.48	0.84	30
73	1.63	0.63	38
100	1.76	0.52	—

폐색효과와 말뚝의 상대 관입깊이 사이의 관계를 알기 위하여 상대 관입깊이를 각각 6, 11, 18, 29, 그리고 40 등으로 달리하여 실험하였으며 정해진 크기의 실험 지반 상자 안에서 이상과 같은 상대 관입깊이를 얻기 위하여 외경이 각각 9.6, 15.9, 그리고 25.4 mm인 말뚝을 사용하였다. 또한 말뚝 강재의 두께로 인한 영향을 검토하기 위하여 강재 두께를 0.8(외경 9.6 mm 말뚝은 0.4)과 1.5 mm 등으로 달리하여 실험하였다. 개단 강관말뚝의 선단부에 보강을 겸한 칸막이판을 부착하면 말뚝의 내경을 줄이

표 2. 모형말뚝의 크기와 선단특성 및 폐색율

말뚝기호	말뚝크기			상대관입깊이(L/D)	선단특성	폐색율
	외경(D) mm	두께(t) mm	관입깊이(L) cm			
1-1-L	25.4	1.5	15.2	6	개방	0.74
1-3-L	"	"	"	"	폐쇄	—
1-1-D	"	"	"	"	개방	0.95
1-3-D	"	"	"	"	폐쇄	—
2-1-L	"	0.8	28.5	11.2	개방	0.88
2-2-L	"	1.5	"	"	개방	0.95
2-3-L	"	"	"	"	폐쇄	—
2-4-L	"	"	"	"	칸막이	0.93
2-1-D	"	0.8	"	"	개방	0.96
2-2-D	"	1.5	"	"	개방	0.99
2-3-D	"	"	"	"	폐쇄	—
2-4-D	"	"	"	"	칸막이	0.99
3-1-L	"	0.8	45.0	40	개방	0.94
3-2-L	"	1.5	"	"	개방	0.93
3-3-L	"	"	"	"	폐쇄	—
3-4-L	"	"	"	"	칸막이	0.91
3-1-D	"	0.8	"	"	개방	0.85
3-2-D	"	1.5	"	"	개방	0.94
3-3-D	"	"	"	"	폐쇄	—
3-4-D	"	"	"	"	칸막이	0.95
4-1-L	15.9	0.8	28.5	18	개방	0.96
4-2-L	"	1.5	"	"	개방	0.93
4-3-L	"	"	"	"	폐쇄	—
4-1-D	"	0.8	"	"	개방	0.99
4-2-D	"	1.5	"	"	개방	1.04
4-3-D	"	"	"	"	폐쇄	—
5-1-L	"	0.8	45.0	29	개방	1.06
5-2-L	"	1.5	"	"	개방	0.97
5-3-L	"	"	"	"	폐쇄	—
5-1-D	"	0.8	45.0	"	개방	1.03
5-2-D	"	1.5	"	"	개방	1.08
5-3-D	"	"	"	"	폐쇄	—
6-1-L	9.6	0.4	38.4	40	개방	1.09
6-2-L	"	1.5	"	"	개방	1.00
6-3-L	"	"	"	"	개방	—
6-1-D	"	0.4	"	"	개방	1.01
6-2-D	"	1.5	"	"	개방	1.00
6-3-D	"	"	"	"	폐쇄	—

는 역할을 하여 폐색 효과를 증대시킨다⁽¹⁾는 연구 결과의 확인을 위하여 0.8mm 두께의 강판으로 만든 십자형 칸막이판을 선단에 부착한 개단 말뚝을 제작하여 실험하였다. 폐단 말뚝은

타입의 편의를 위하여 강봉을 선단각 60°되는 원뿔형으로 깎은 후 선단에 부착하여 사용하였다. 이상에 열거한 실험에 대한 실험 계획표가 표 2에 나타나 있다. 실험 계획표에 보인 각 종류의 실험은 동일한 조건하에서 8회 이상 반복하여 그 결과들의 평균치를 대표값으로 이용하였다.

3. 실험 방법

본 연구에서 수행된 개·폐단 말뚝에 대한 재하시험 및 기타사항의 측정과정은 다음과 같다.

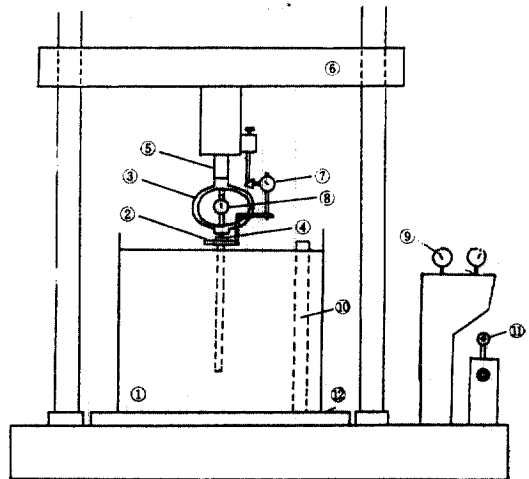
1) 폭 60 cm, 길이 60 cm, 높이 60cm 인 5052 제품 알루미늄 상자에 필요한 상대 밀도를 갖는 실험 기반을 형성한다.

2) 모형 말뚝이 단일 말뚝으로 거동할 수 있는 말뚝간의 최소거리를 유지할 수 있도록 20cm 간격으로 3~4 개소에 타입 위치를 선정한다⁽⁶⁾.

3) 미리 선정된 위치에 모형 말뚝을 놓고 다짐 시험용 2.5 kg의 수동 래머로 두부를 타격하여 관입시킨다.

4) 말뚝의 관입 도중에 일정한 간격마다 관내 토의 높이를 측정한다⁽⁷⁾.

5) 말뚝이 정해진 깊이까지 타입되면 유압식



① Model box ② Model pile ③ Proving ring
④ Loading ram ⑤ Loading piston ⑥ Loading frame ⑦ Dial gage for deformation measurement ⑧ Dial gage for proving ring ⑨ Loading gage ⑩ Oil jack ⑪ Base plate

그림 1. 모형 말뚝 재하시험

하중기를 사용하여 일정변위속도법(constant rate of penetration method)으로 재하 시험을 실시한다. 재하시험 장치 및 실험 전경에 대한 개요도가 그림 1에 나타나 있다.

6) 재하 시험이 끝나면 하중을 제거하고 말뚝의 리바운드(rebound)량을 측정한다.

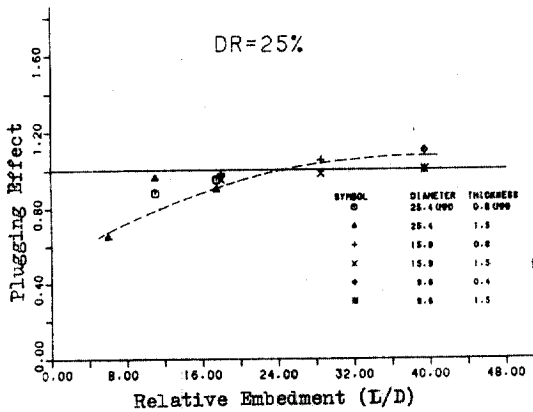
4. 실험 결과 및 토의

모형 말뚝 재하시험에서 구한 폐단 말뚝과 개단 말뚝의 극한 지지력의 비측, 폐색율을 각종류의 말뚝에 대하여 표 2에 나타내었다. 재하시험은 말뚝 머리의 변위량이 10 mm 이상 될 때까지 지속하였는데 그 이유는 일반적으로 타설 말뚝에 있어서 선단지지력은 말뚝 직경의 10% 그리고 주변 마찰력은 말뚝직경의 크기에 관계없이 6~10 mm의 상대 변위가 발생하면 최

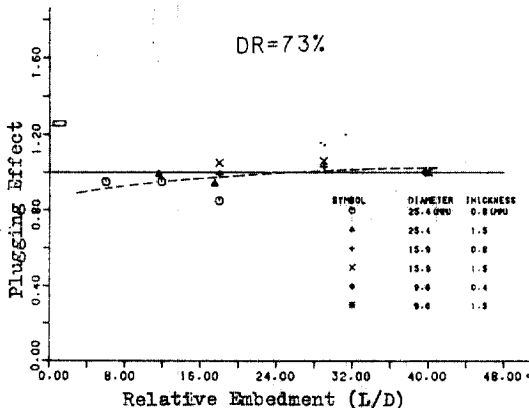
대치에 이르는 것⁽⁸⁾으로 알려져 있는데 본 연구에서 사용한 모형 말뚝의 경우에 말뚝 직경의 10%는 10 mm보다 작기 때문이다.

표 2에 보인 폐색율을 상대 관입깊이에 대하여 도시하면 상대 밀도 25%와 73% 지반에 있어서 각각 그림 2(a) 및 2(b)와 같이 나타난다. 동 그림들에서 보면 폐색율 100%가 되는 상대 관입깊이는 각각 24.4와 26.3으로서 지반의 상대밀도에 큰 영향을 받지 않는다. 폐색율 95%가 되는 상대 관입깊이는 각각 17.9와 8.3으로서 조밀한 지반인 경우에 작은 상대 관입 깊이에서 높은 폐색율을 나타내며 관입깊이 2.6인 경우에도 폐색율이 90%가 된다. 앞에서 설명한 바와 같이 본 논문에서는 개단과 폐단 말뚝의 총지지력비를 폐색율로 정의하였는데 폐색율을 다른 논문들⁽¹⁻⁵⁾에서와 같이 총 지지력에서 말뚝 외주변 마찰력을 제외한 개단말뚝의 내주변 마찰력과 말뚝 강제 단면의 선단 지지력의 합과 폐단 말뚝의 선단 지지력의 비로서 나타낸다면 폐단 말뚝이 개단 말뚝보다 고 변위 말뚝(high displacement pile)임을 감안할 때 폐단 말뚝의 외주변 마찰 지지력이 개단 말뚝의 그것보다 클 것이므로 조밀한 지반의 경우 상대 관입 깊이가 아주 작은 경우에도 100%의 폐색 효과가 발휘된다고 할 수 있다. 또한 그림 2(a), (b)에서 보면 상대 관입깊이가 커지면서 폐색율이 100%를 초과하게 되는데 그 이유는 개단 말뚝은 선단이 흠으로 완전 폐색되고 나면 선단부가 편평한 폐단 말뚝으로 거동하게 되어 원뿔형 선단부를 갖는 폐단 말뚝보다 선단 지지력이 더 커지기 때문이라고 생각된다. 이것은 또한 위에서 설명하는 개·폐단 말뚝의 리바운드(rebound)량의 비교로부터 간접적으로 확인할 수 있다.

개단 말뚝 선단에 폐색효과 증대를 위한 목적으로 부착한 칸막이 판은 본 실험 결과에 따르면(표 3 참조) 폐색효과에 대한 영향이 전혀 없는 것으로 나타났다. 이에 대해서는 지반의 입자 크기와 칸막이 판의 칸의 크기 사이의 크기 효과(size effect) 등을 고려하여 다시 검토할 필요가 있다고 생각된다. 표 4에서 보면 폐색 효과에 대한 말뚝 강제부 두께의 영향도 거의 없는 것으로 판단된다.



(a)



(b)

그림 2. 폐색율 대 상대 관입 깊이

표 3. 폐쇄효과에 대한 칸막이 판의 영향

말뚝 기호		2-($\frac{2}{4}$)-L	2-($\frac{2}{4}$)-D	3-($\frac{2}{4}$)-L	3-($\frac{2}{4}$)-D	평 균
폐쇄율	개 단	0.95	0.99	0.93	0.94	0.95
	칸막이	0.93	0.99	0.91	0.95	0.95

표 4. 폐쇄효과에 대한 말뚝 강제부 두께의 영향

말뚝 기호		2-($\frac{1}{2}$)-L	2-($\frac{1}{2}$)-D	3-($\frac{1}{2}$)-L	3-($\frac{1}{2}$)-D	4-($\frac{1}{2}$)-L	4-($\frac{1}{2}$)-D	5-($\frac{1}{2}$)-L	5-($\frac{1}{2}$)-D	6-($\frac{1}{2}$)-L	6-($\frac{1}{2}$)-D	평 균
폐쇄율	0.8 mm	0.88	0.96	0.94	0.85	0.96	0.99	1.06	1.03	1.09*	1.01*	0.98
	1.5 mm	0.95	0.99	0.93	0.94	0.93	1.04	0.97	1.08	1.00	1.00	0.98

* 말뚝 강제부 두께=0.4 mm

그림 3(a), (b)에는 상대 관입깊이에 대한 관내토의 높이 변화가 나타나 있는데 동 그림들로부터 조밀한 지반에서 관내토의 높이가 높은 것

을 알 수 있으며 두 종류의 지반에서 모두 상대 관입 깊이가 20 정도 되면 관내토의 상승도가 아주 낮아져서 완전 폐쇄상태에 이르고 있음을

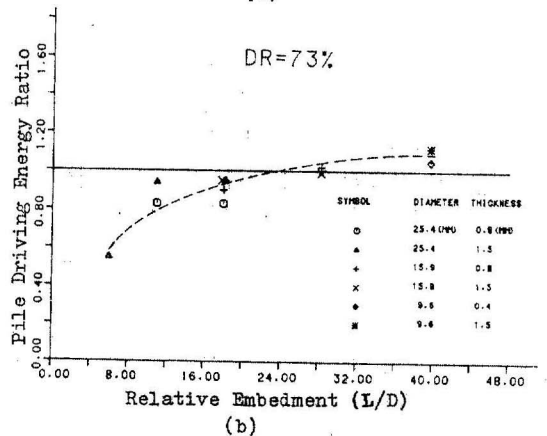
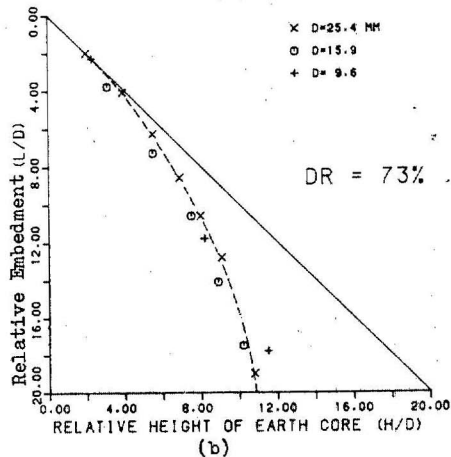
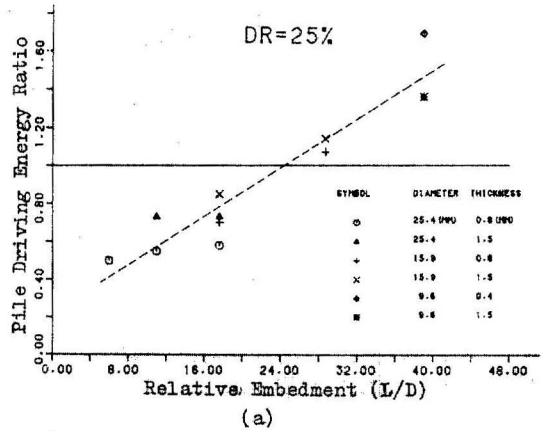
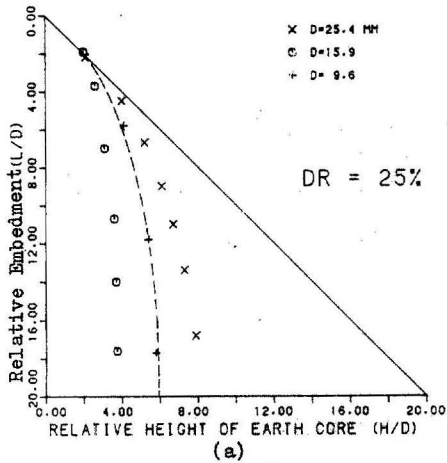


그림 3. 상대 관입깊이 대 상대 관내토 높이

그림 4. 개단 및 폐단 말뚝의 타입에너지비 대 상대 관입깊이

알 수 있다. 그리고 그림 3(a), (b)에 나타난 관입 깊이와 관내토 높이의 관계는 대체로 Klos와 Tejchman⁽⁵⁾의 결과와 비슷한 경향을 나타내고 있다.

그림 4(a), (b)에는 말뚝의 상대 관입깊이에 대한 개·폐단 말뚝 타입에 소요된 에너지의 비의 관계를 나타내었는데 동 그림들의 데이터 분포 형태는 상대 관입깊이 대 폐색을 그래프(그림 2(a), (b))의 데이터 분포 형태와 큰 차이를 보이고 있으나 재미있는 점은 소요된 에너지의 비가 1인 때의 상대 관입 깊이가 상대 밀도 25%와 73%인 지반에서 각각 24.4와 23.5로서 이 결과는 폐색을 100% 때의 상대 관입깊이와 거의 일치한다는 것이다.

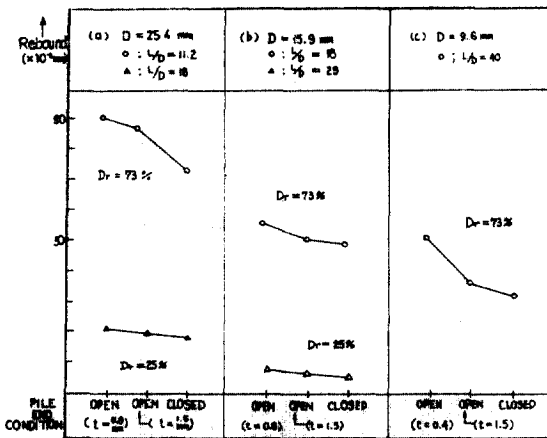


그림 5. 개단 및 폐단 말뚝의 하중제거 후 리바운드량의 비교

그림 5에 보인 것은 재하 시험이 끝난 후 하중을 제거하였을 때 말뚝이 위로 용기하는 리바운드(rebound)량을 각 종류의 말뚝에 대하여 개단 및 폐단을 구분하여 나타낸 것이다. 동 그림에서 특기할만한 점은 말뚝의 상대 관입깊이에 상관없이 개단 말뚝의 리바운드량이 폐단 말뚝의 그것보다 항상 크다는 것이다. 그 이유는 폐단 말뚝의 경우 원뿔형 선단부 부근의 지반에 응력 집중 현상이 발생하여 편평한 선단부를 갖는 말뚝으로 거동하는 개단 말뚝보다 더 빨리 더 많은 영역이 소성 상태에 이르기 때문이라고 생각된다.

5. 결 론

이상에 밝힌 결과 및 분석으로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 전체 지지력을 비교하여 폐색 효과를 평가할 때 상대 관입깊이가 대략 25 정도 이상이면 100%의 폐색 효과가 발생한다.

2) 말뚝 타설 지반이 단단할수록 작은 상대 관입 깊이에서 큰 폐색 효과를 얻을 수 있으며 본 실험에서는 73% 상대 밀도 지반의 경우 상대 관입깊이 8.3에서 95%, 2.6에서 90%의 폐색 효과를 발휘하였다.

3) 칸막이 판 설치로 인한 폐색효과의 증대는 기대하기 어려울 것으로 판단된다.

4) 관내토의 높이는 상대 관입깊이가 20 정도에 이르면 거의 변화하지 않으며 이때 폐색 효과는 100% 가까이 된다.

5) 개단 말뚝의 상대 관입깊이가 일정한 값보다 커지면 폐단 말뚝보다 큰 지지력을 받을 수 있게 되는 데 그 이유는 개단 말뚝은 선단이 흩으로 완전 폐색되고 나면 선단부가 편평한 폐단 말뚝으로 거동하게 되어 원뿔형 선단부를 갖는 폐단 말뚝보다 선단 지지력이 더 커지기 때문이라고 생각된다.

후 기

본 연구는 1985년도 학술진흥재단의 첨단 연구비의 지원으로 이루어졌으며, 이에 대하여 심심한 사의를 표한다. 아울러서 본 연구에 필요한 실험을 위하여 헌신적인 노력을 기울인 전 서울대학교 토목과 대학원의 이종식군과 나영복군에게 특별한 사의를 표하는 바이다.

참 고 문 헌

1. 山原浩, "鋼管くいの閉塞効果と支持力機構(その1, その2)", 日本建築學會論文報告集, 第96號, 1964. 3, pp. 28~35. 第9號, 1964. 4, pp. 34~41.
2. 山肩邦男·永井興史郎, "開端鋼管くいの支持力關する考察(その1, その2)", 日本建築學會論文報告集, 第212號, pp. 1~8, 1973. 10, 第213號, 1973. 11, pp. 39~44.
3. 勝見雅·貴谷暢夫, "開端杭の閉塞効果と關する基礎

- 的研究”, 土木學會論文集, 第 323 號, 1982. 7, pp. 133~139.
4. KLOS, J. & Teichman, A., “Analysis of Behavior of Tubular Piles in Subsoil”, *Proc. of the 9th International Conference Soil Mechanics & Foundation Engineering Div.*, Tokyo Japan Vol. 1977.
 5. KLOS, J. & Teichman, A., “Bearing Capacity Calculation for Pipe Piles”, *Proc. of the 10th ICSMFE*, Tokyo Japan 1981.
 6. 이종석, “모형실험에 의한 개단강관 말뚝의 폐색효과 고찰”, 서울대학교 공과대학 토목공학과 석사논문, 1985.
 7. 나영목, “개단강관 말뚝의 폐색효과에 관한 실험적 고찰”, 서울대학교 공과대학 토목공학과 석사논문, 1986.
 8. Vesic, A.S., *Design of Pile Foundation*, Synthesis of Highway Practice 42, TRB, 1877, pp. 855~869.

(接受: 1987. 6. 19)