

# 개단 강관말뚝의 관내토 폐색력 분석

## Analysis on Plugging Force of Open-end Steel Pipe Pile

최 용 규\*  
Choi, Yong-Kyu  
김 명 모\*\*  
Kim, Myoung-Mo

---

---

### Abstract

Load tests are executed on instrumented model piles to evaluate the magnitudes of soil plugging resistances mobilized at open-end pile tips. The plugging resistances are calculated by some existing methods, which are compared with observation. A couple of the methods are found to give good results. A new computational method to predict the plugging resistance is proposed in this paper, which also gives fairly close prediction to the measurement, and is much simpler than the other computational methods.

### 要 旨

모형 말뚝에 축 하중 계측장치를 부착하고 재하 실험을 하여, 개단 말뚝의 선단부 폐색원인을 분석하고 폐색효과에 대한 기존의 정량적 예측방법들을 비교 검토한 결과, 관내토 폐색력은 永井의 아칭 이론과 勝見의 경험식 등에 의한 예측치와 비교적 잘 일치하였다. 그리고, 본 논문에서는 Coulomb의 수동상태를 가정한 새로운 관내토의 폐색효과 산정식을 제안하였는데, 이 Coulomb 이론을 이용한 폐색력 산정방법은 폐색력을 정확하게 예측할 수 있을 뿐만 아니라 사용이 간편하다는 장점이 있다.

---

---

### 1. 序 論

복잡해져 가는 도시환경과 사회적 여건 등으로 말미암아 토목 건축 구조물이 대형화하고, 그 위치 선정에 있어서 토질 공학적 조건보다 우선한 비공학적 요인들에 의하여 바람직하지

않은 지반에 빈번히 구조물이 놓이게 된다. 이 때, 부족한 지질적 조건을 극복하기 위하여 깊은 기초를 선정하게 됨으로써 말뚝 기초의 이용이 날로 증가하고 있다. 일반적으로 말뚝 기초는 말뚝 머리에 가해진 하중을 말뚝 주변 마찰력과 선단 지지력에 의하여 지지하게 되는데, 개단 강관 말뚝의 경우 선단지지력의 공학적 정의와

---

\*정회원, 한국전력기술(주) 토목구조부

\*\*정회원, 서울대학교 공과대학 부교수

기구(mechanism)등이 정량적으로 뿐만 아니라 정성적으로도 확실하게 이해되지 않고 있다. 기초 말뚝의 설계에 있어서 극한지지력의 산정과 침하량의 예측은 필수 불가결한 문제이므로 개단 말뚝의 선단 지지력에 관한 올바른 이해는 기초 공학에 있어서 무엇보다 중요한 문제이다. 개단 말뚝을 지반에 타입하면 말뚝 속으로 밀려 올라가는 흙에 의해 말뚝 선단이 막힌 것과 흡사한 효과를 얻게 되어 말뚝 강재부만을 고려한 것보다 훨씬 큰 선단지지력을 발휘하게 된다. 이것을 관내토의 폐색효과라고 한다. 개단 말뚝 선단지지력의 합리적 산정을 위해서는 이 폐색효과의 정량적 예측이 필수적으로 요구되는데 이 관내토의 폐색효과는 말뚝 안으로 밀려 올라가는 흙의 팽창성(dilatancy)으로 인한 횡방향 응력의 증대와 말뚝 선단부 부근 관내토에 형성되는 아칭(arching)현상과 상관이 있다고 생각된다. 말뚝 선단에 위치한 흙은 말뚝이 타입되면서 말뚝 내외로 분리되어지며, 이때 흙의 팽창성으로 인하여 말뚝 내외토는 각각 말뚝 안쪽과 바깥쪽의 변위를 수반하게 되어 횡방향 응력은 정지 토압상태보다 큰 값을 가지게 되는데, 특히 말뚝의 선단부에 있는 관내토의 경우에는 공간의 제한성 때문에 수동상태에 이를 것으로 보인다. 또한, 말뚝 선단부에서는 아칭현상이 발생하게 되는데, 기존의 연구결과<sup>1)</sup>에 의하면 말뚝 선단으로부터 말뚝 직경의 2배 높이까지의 관내토에 아치가 형성된다고 한다. 개단 말뚝의 폐색효과에 관한 연구는, 현장 재하실험을 통한 개·폐단 강관 말뚝의 지지력 비교,<sup>2-4)</sup> 모형 말뚝 실험에 의한 관내토의 폐색효과 분석,<sup>5-9)</sup> 그리고 관내토 폐색효과에 대한 이론적 해석적 연구<sup>5, 10-13)</sup> 등이 현재까지 이루어졌으나 학자들이 공통적으로 인정하는 객관성있는 연구결과는 없다. 본 연구에서는 모형 말뚝에 축 하중 계측장치를 부착하고 재하실험을 하여, 개단 말뚝 선단부의 폐색 원인을 분석하고, 폐색 효과에 대한 기존의 정량적 예측 방법들을 비교 검토하면서, Coulomb의 수동상태를 가정한 새로운 폐색효과 산정식을 제안하고자 한다.

## 2. 관내토의 아칭 작용

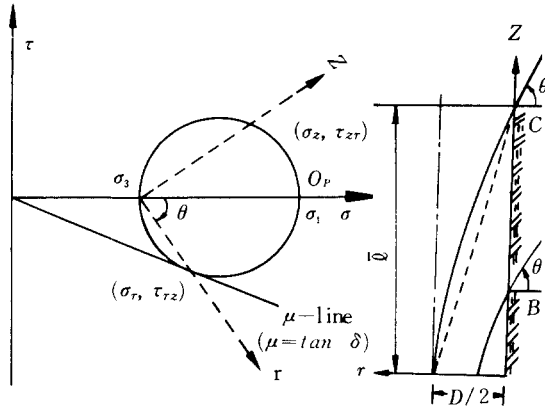
永井<sup>1)</sup>은 말뚝 선단으로부터 4D(D: 말뚝의 직경)까지의 관내토에 대한 경계조건을 설정하여 유한 요소해석을 하고, Mohr 응력원의 개념을 사용하여 관내토 선단부의 아칭 작용에 대해 설명한 바 있는데, 그에 따르면, 말뚝 내벽의 마찰력이 극한상태에 도달하면 말뚝 내벽 근처에 있는 임의의 관내토 요소에서도 극한 상태에 도달한다고 가정할 수 있으므로, 말뚝 내벽면 가까운 요소에서는  $\tau_{rz} = \mu \cdot \sigma_r (\mu = \tan \delta, \delta: \text{말뚝과 관내토의 마찰각})$ 로 된다. 여기서,  $\tau_{rz}$ 는 반경방향의 응력  $\tau_r$ 에 의해 그 작용면(z방향)에 발생하는 전단응력이다. 그림 2.1(a)에는, 이 때 벽면 가까운 요소의 Mohr 응력원이 점( $\tau_r, \tau_{rz}$ )에서 직선  $\tau_{rz} = \mu \cdot \sigma_r$ ( $\mu$ 선)에 접한 상태를 나타내었다. 이 경우 말뚝 반경방향인 r축과 주응력  $\sigma_1$ 이 이루는 각  $\theta$ 는 그림 2.1(a)와  $\mu = \tan \delta$ 로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta = 45 + \delta / 2 \dots\dots\dots (2.1)$$

여기서, 만약  $\delta = 25^\circ \sim 35^\circ$  라면  $\theta = 58^\circ \sim 63^\circ$ 가 된다. 그리고 아치의 형상은 그림 2.1(b)에 나타낸 바와 같다. 주응력  $\sigma_1$ 의 방향은 선단부에서 연직 방향이고, 말뚝 내벽부근에서는 반경 방향과  $\theta$ 의 각도를 이루면서 계속적으로 변한다. 이와 같이 변화하는 주응력  $\sigma_1$ 의 연쇄를 무수히 고려할 수 있는데, 주응력 방향이 선단중심에서 수직이고 말뚝내벽 부근에서  $\theta = 60^\circ$ 라고 가정하면, 아칭 작용이 발생하는 말뚝 선단으로부터의 거리  $\bar{\theta}$ 는 근사적으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \bar{\theta} &= \frac{D}{2} \tan \frac{90^\circ + \theta}{2} = \frac{D}{2} \tan 75^\circ \\ &= 1.87 D \dots\dots\dots (2.2) \end{aligned}$$

즉, 관내토의 마찰력은 말뚝 선단으로부터 약 2D까지의 관내토에서 발휘된다고 할 수 있다.



(a) Mohr-circle (b) rotation of principle stress  
 Fig. 2.1 Nagai's arching theory in soil plug

### 3. 관내토의 지지력 산정공식

개단 말뚝의 관내토에 대한 지지력 산정공식은 여러 학자들에 의해 제안되어졌으나, 본 논문에서는 山原의 공식과 勝見의 공식을 설명하고자 한다.

山原<sup>10)</sup>은 관내토가 다져지지 않고 말뚝 벽면과 흙의 마찰력(또는, 부착력)이 관내토의 전길이에 걸쳐 작용한다고 가정하였으며, 관내토의 표면으로부터 임의 깊이에 있는 미소 토층에 대하여 평형방정식을 세워 그 깊이에서의 지지력 산정공식을 제안했다. 또한, 지지력 공식에 사용된 여러 변수들에 대한 산정 방법들도 제안하였다. 관내토의 표면으로부터 x만큼 관입된 말뚝에 대한 관내토의 극한 지지력(Q<sub>l</sub>(x))의 산정 공식은 다음과 같다.

$$Q_l(x) = \frac{\pi\gamma D^3}{16\mu\nu} \left( e^{\frac{4\mu}{D}x} - 1 \right) - \gamma Ax \quad (3.1)$$

여기서, Q<sub>l</sub>(x) : 관내토 내주변 마찰력  
 γ : 단위 체적 중량, 실험 결과 사용  
 D : 말뚝의 직경  
 μ : 말뚝과 흙과의 마찰 계수, tan φ  
 ν : 포아슨 비, 사질토 = 0.09~0.13, 점성토 = 0.25  
 A : 관내토의 단면적

勝見<sup>13)</sup>은 관내토에서의 활동선의 개형을 대칭 용벽의 경우를 참고로 하여 구하고, 이것을 토대

로 쌍곡선형 미분방정식이며 토압문제를 소성적으로 해결하기 위해 도입한 미분방정식인 Kötter 방정식을 유도하였다. 경계조건과 유한 차분법에 의해 이 방정식을 해석한 결과, 관내토의 지지력 산정을 위한 지지력 계수를 도표화하였다. 또한, 말뚝 내면과 관내토와의 마찰저항에 의해 폐색효과를 설명하였으며, 수학적 해석 방법을 도입하였다. 그가 제안한 관내토 단위 극한 지지력(q<sub>l</sub>) 산정 공식은 다음과 같다.

$$q_l = cN_{cl} + D\gamma N_{r1} \quad (3.2)$$

여기서, N<sub>cl</sub>, N<sub>r1</sub> : 관내토에 대한 지지력 계수  
 c : 관내토의 점착력

### 4. 실험계획, 장치 및 절차

#### 4.1 실험계획

모형 개단 말뚝과 폐단 말뚝에 스트레인 게이지를 부착하여 개단 말뚝과 폐단 말뚝에 대한 축 하중 분포와 개단 말뚝에 대한 관내토 폐색력 분석을 위한 말뚝 재하실험을 수행하였으며, 계획은 표 4.1에 나타내었다.

Table 4. Overall view of test program

실험종류	말뚝종류	목적	비고
타입실험	개 단	· 관내토의 상승 높이 측정 · 타격에너지 측정	· 그림 4.1의 말뚝(타입 완료 후)
	폐 단	· 타격에너지 측정	
재하실험	개 단	· 하중-침하량 곡선 · 말뚝의 압축 변형 측정	· 스트레인 게이지(KFC-5-D16-1 1L 500) 이용
	폐 단	→ 축 하중(응력)분포 · 원주방향의 변위	

Table 4.2 Pile dimensions used in model tests

내경	외경	두께	길이	관입길이	관입길이 외경
mm	mm	mm	cm	cm	
108	113.6	2.8	160	150	13

모형 개단 말뚝과 폐단 말뚝의 제원은 동일하며, 표 4.2에 나타내었다. 그리고, 폐단 말뚝의 선단에는 60° 각도의 원추<sup>14)</sup>를 부착시켰다. 각 말뚝에는 말뚝의 바깥쪽에 7개씩의 스트레인

게이지를 대칭으로 부착시켰으며, 각 스트레인 게이지(제품명 : KFC-5-D16-11L 500)는 2 방향 십자형 게이지이므로, 말뚝축 방향과 원주 방향의 변형을 각각 측정할 수 있으며, 스트레인 게이지의 결선은 2-게이지법을 사용하는 데 이 방법은 온도 변화 등에 의한 오차를 보정할 수 있는 방법이다. 준비된 모형 지반에 말뚝을 타입할 때에는 모형 실험지반을 형성하는 상자의 벽면 및 인접해 있는 말뚝에 의해 영향을 받지 않아야 한다. 그러나, 저자가 실시한 실험에서는, 다음과 같은 일본 건축학회 설계기준<sup>15)</sup>을 사용하여 단일 말뚝에 대해 적용되어 지는 타격에 의한 유효응력의 분포영역을 계산하였으며, 이 분포영역이 중첩되지 않도록 모형 말뚝을 타입시키고 모형 상자의 크기도 정하였다.

$$S = 1.5 \cdot \sqrt{(r \cdot L)} \dots\dots\dots (4.1)$$

여기서, S: 단일 말뚝의 유효 응력 분포 영역  
 r: 말뚝의 반지름  
 L: 말뚝의 관입 길이

그리고, 말뚝 선단과 모형 상자의 바닥과는 적어도 말뚝 직경의 3~4배 이상<sup>16)</sup>의 간격을 두어 모형 상자바닥의 영향을 배제시켰다. 모형 말뚝의 타입 위치를 그림 4.1에 나타내었는데, 여기에는 스트레인 게이지의 부착 위치도 아울러 나타내었다. 그림 4.1에 타입된 말뚝은 재하 실험을 위한 것이며, 관내토의 폐색효과는 말뚝의 선단부에서 대부분이 발휘되므로 이것을 고찰하기 위해 선단부에 스트레인 게이지를 촘촘하게 부착시켰다.

본 실험에서는 모형 지반의 형성을 위하여 레이닝법(Rainning Method)<sup>17)</sup>를 이용하였다. 이를 위하여 시료가 충분히 통과할 수 있는 직경 7mm의 타공망을 사용하여 두 겹으로 체를 제작하였으며, 모형 상자의 전면적을 덮을 수 있도록 하였다. 7mm의 큰 직경의 타공망을 사용하였고 시료의 입도 분포도 양호한(well-graded) 것이어서 약 1m 이상의 낙하고인 경우 시료의 낙하 높이에 의한 영향은 거의 나타나지 않았으며 이때의 상대밀도는 약 71%이었다.

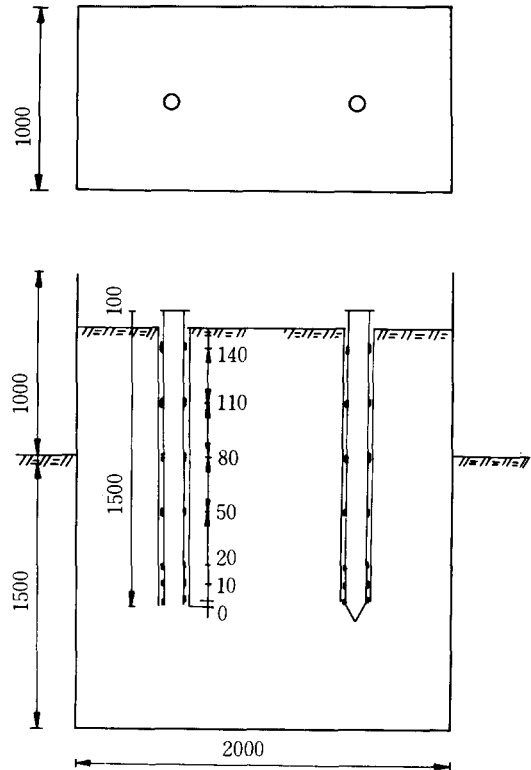


Fig 4.1 Plan and front views of model pile arrangement

이와 같이 형성된 동일한 지반에 개단 말뚝과 폐단 말뚝을 같이 타입하였으며, 개단 말뚝과 폐단 말뚝에 대해 각각 3회씩의 반복 실험을 하였다. 또한, 말뚝타격이 이미 타입된 말뚝에 미치는 영향을 알아보기 위해 타격순서를 바꾸어 주었다. 1회 실험은 개단 말뚝을 먼저 타입한 후에 폐단 말뚝을 타입하였으며, 2회 실험은 폐단 말뚝을 먼저 타입한 후에 개단 말뚝을 타입하였고, 3회 실험은 1회 실험과 동일하게 실시하였다.

#### 4.2 실험장치

모형 지반 형성에 사용된 시료는 한강에서 채취된 비중 2.67인 강 모래이며, 함수비 1% 이내로 자연 건조시켜 사용하였다. 모래의 입도 분포곡선과 공학적 특성은 각각 표 4.3과 그림 4.2에 나타내었다.

모형 지반 형성을 위한 시료상자(그림 4.1)는 폭 1m, 길이 2m, 그리고 높이 2.5m인데,

Table 4.3 Properties of sandy soil

SPECIFIC GRAVITY	: 2.67
MAXIMUM DRY UNIT WEIGHT	: 1.75 T/m <sup>3</sup>
MINIMUM DRY UNIT WEIGHT	: 1.33 T/m <sup>3</sup>
EXPERIMENTAL CONDITION	
RELATIVE DENSITY	: 71%
DRY UNIT WEIGHT	: 1.63 T/m <sup>3</sup>

지하 1.5m 깊이를 굴착하여 돌레와 바닥을 콘크리트로 타설하였고, 지상 1m 높이는 10mm 두께의 강철판으로 연장시켰다. 재하 장치는 H형강으로 제작하였으며, 최대 재하 용량은 30 ton이며, 유압 잭은 수동으로 재하할 수 있는 것으로서 재하 용량은 20 ton이었다. 변형 게이지의 변형 측정 기구는 디지털 스트레인 지시계(UCAM-8BL)와 스위치 박스(USB-50A)를 사용하였으며, 이 측정기는 소형컴퓨터가 내장되어 있어서 각 점당 0.1초의 속도로 측정할 수 있었으며, 그 결과가 자동으로 인쇄되어 출력되어 진다.

### 4.3 실험절차

재하 실험 모습은 그림 4.3에 모식적으로 나타내었으며 재하 실험 절차는 다음과 같다. 스트레인 게이지 유도 도선을 스위치 박스(USB-50A)에 연결한다. 그리고, 말뚝 머리에 프루빙링을 두고, 그 위에 유압 잭을 위치시켜 수직으로 정렬되게 하며, 말뚝 머리의 변위를 측정하기 위해 말뚝 머리에 다이얼 게이지를 설치한 후, 프루빙링과 스트레인 게이지의 영점을 조정한다. 그리고, 하중을 단계적으로 증가시키면서 말뚝 머리의 임의 변위에 대하여 말뚝 머리에 가해진 하중과 스트레인 게이지의 전압 출력(voltage output)을 기록한다. 파괴가 급속히 진행될 때,<sup>18)</sup> 즉 본 연구에서는 말뚝 머리가 40mm 정도 변위할 때까지 하중을 계속적으로 증가시켜 준다. 재하 실험이 끝난 후 말뚝 머리에 가해진 유압을 제거하고, 말뚝 머리의 리바운드 크기와 스트레인 게이지의 전압출력도 측정하였다.

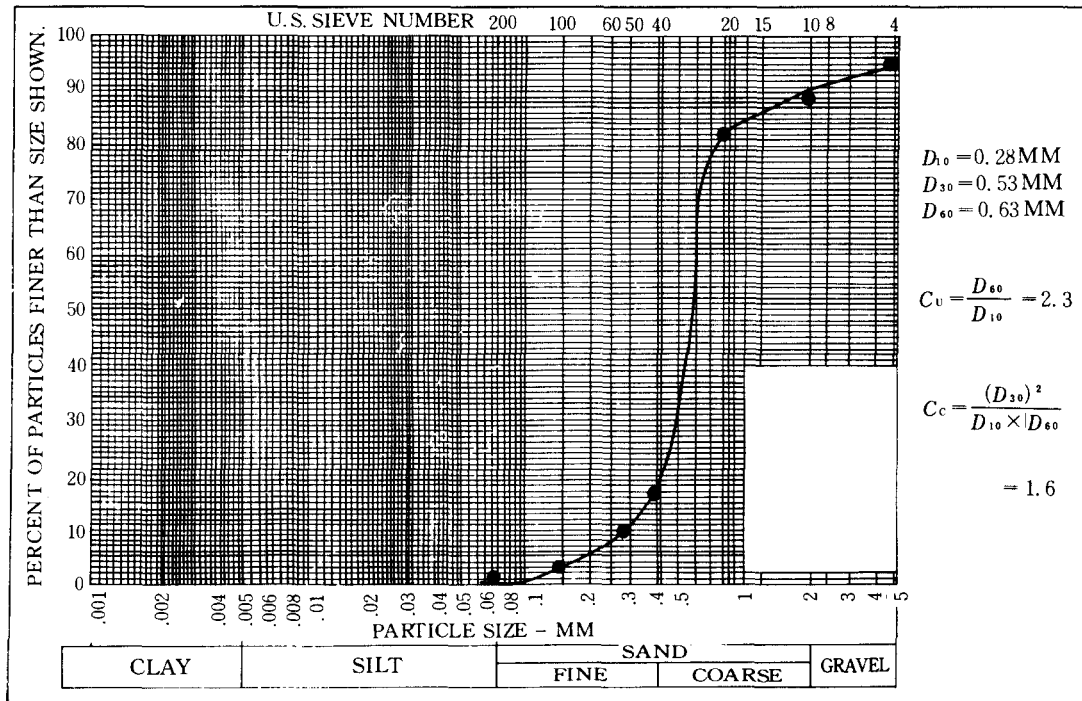


Fig. 4.2 Distribution of grain size.

## 5. 관내토 폐색력 분석

그림 5.1에는 하중 전이 실험결과로부터 구한 개단 말뚝과 폐단 말뚝의 극한 지지력 상태에서의 축 하중 분포를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이, 폐단 말뚝의 경우 외주변 마찰의 합( $Q_s$ )과 선단 지지력( $Q_p$ )으로 분리할 수 있으나, 개단 말뚝의 경우에는 선단 강재부 지지력( $Q_t$ ) 그리고 외주변 마찰력과 관내토 폐색력의 합( $Q_{so}+Q_l$ )으로만 나눌 수 있으며 외주변 마찰력( $Q_{so}$ )과 관내토 폐색력( $Q_l$ )을 분리하는 문제는 해결되지 않는다. 본 연구에서는 개단 말뚝의 관내토 폐색력을 분리하기 위하여 선단 두께부 지지력( $Q_t$ )은 폐단 말뚝의 단위 극한 선단 지지력( $q_0^*$ )을 이용하여 구하고, 외주변 마찰력( $Q_{so}$ )은 같은 하중 상태에 있는 폐단 말뚝의 외주변 마찰력(그림 5.1에 삼각형 기호로 표시했음)을 사용하였는데 이렇게 해서 구한 관내토 폐색력은 약 2.00 ton 정도이다. 그런데, 선단 단면적의 크기를 달리 하는 개단 말뚝의 경우 단위

선단 지지력은 그림 5.2에서 볼 수 있는 바와 같이 선단부 단면적에 따라 일정하지 않고 단면적에 비례하여 감소하므로 개단 말뚝의 강재부 지지력은 실제보다 다소 크게 산정되었다고 생각된다. 또한, 개단 말뚝은 폐단 말뚝보다 주위 지반을 적게 변위시키므로 외주변 마찰력에 있어서 폐단 말뚝보다 작은 값을 갖는 경향이 있다. 따라서, 본 논문에서 산정한 관내토 폐색력( $Q_l$ )은 실제 폐색력의 하한치의 성격을 띠고 있다.

아직까지 관내토의 폐색효과를 정량적으로 예측할 수 있는 객관성 있는 연구결과가 없으므로 본 연구에서는 Coulomb의 수동 토압상태를 가정한 방법, 永井의 아칭이론을 이용한 방법, 그리고 기존의 지지력 공식(山原공식, 勝見공식)에 의한 방법 등을 동원하여 관내토 폐색력을 분석하고자 한다. Coulomb의 수동 토압상태를 가정한 방법에서는 기존의 연구결과<sup>1)</sup>에 의거하여 말뚝 선단으로부터 말뚝 직경의 2배 높이까지의 관내토에서만 폐색작용이 발생하는 것으로 가정하였다. 그리고, 실험 지반의

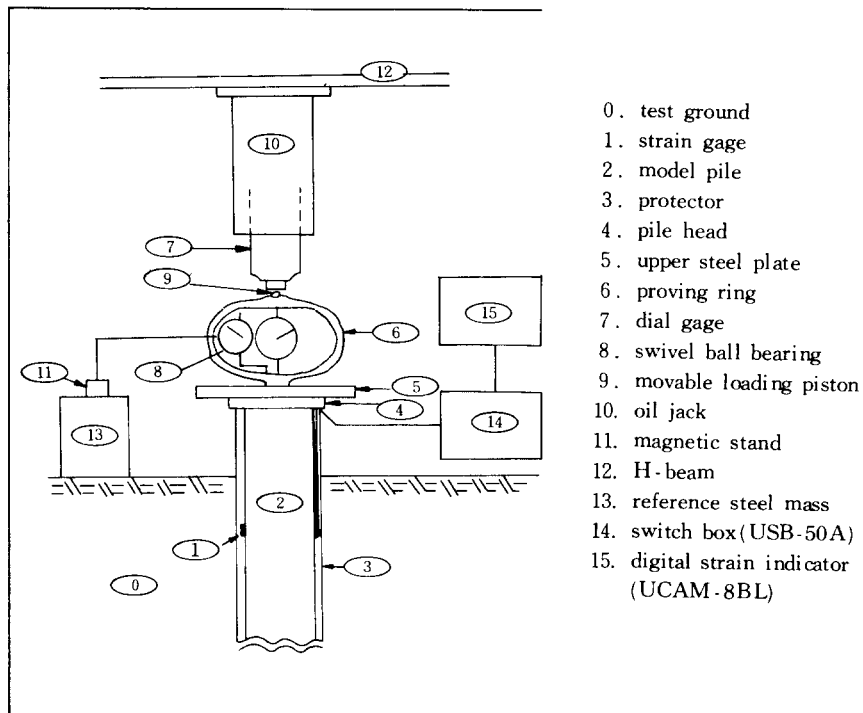


Fig. 4.3 Schematic drawing of details for loading measuring system.

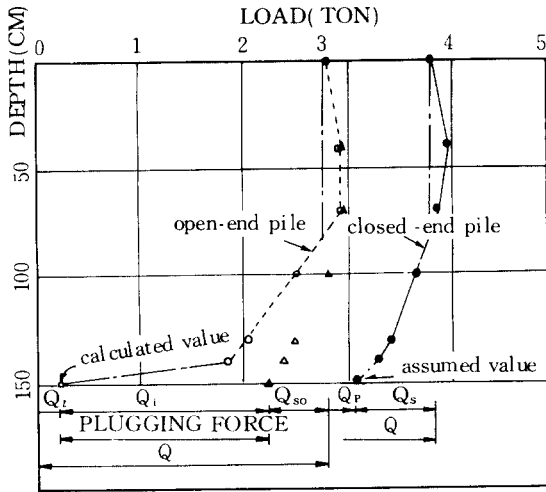


Fig. 5.1 Distribution of axial force of open-end and closed-end piles at ultimate condition

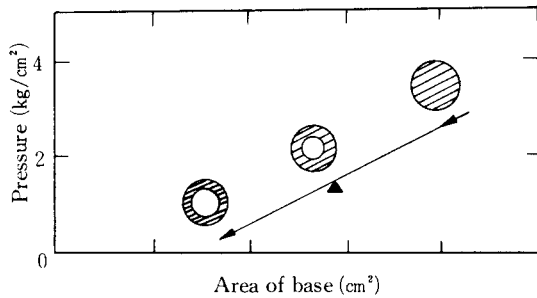


Fig. 5.2 Relationships between base area and unit point force for open-end pile (another test result performed by author)

평균 상대밀도는 71%이지만 말뚝 타입으로 인하여 말뚝 선단부 관내토의 상대밀도가 90% 이상으로 다져진다는 것을 관내토 밀도 측정 실험으로부터 알 수 있어서 선단부 관내토의 상대밀도는 90%로 가정하였으며, 이 때, 건조 단위 중량은  $1.70 \text{ t/m}^3$ 이고 내부 마찰각은  $41^\circ$ 이다. 흙과 말뚝면 사이의 벽면 마찰각( $\delta$ )은  $17^\circ$ 에서부터 흙의 내부 마찰각  $\phi$ 까지 다양한 값이 사용되고 있는데, 본 논문에서는 이 중의 대략 중간값<sup>7,19)</sup>인  $\frac{2}{3} \phi = 27^\circ$ 로 가정하였다.

### Coulomb의 수동 토압상태를 가정한 분석

관내토의 팽창성(dilatancy)에 의한 횡방향 응력의 증대로 인하여 관내토가 수동상태에 이르게 될 것으로 생각하여 Coulomb의 수동 토압 계수를 산정하면

$$K_p = \frac{\sin^2(90 - \phi)}{\sin(90 + \delta) \left[ 1 - \sqrt{\frac{\sin(\delta + \sigma) \cdot \sin \phi}{\sin(90 + \delta)}} \right]} \quad (5.1)$$

이로 관내토 마찰 저항력은

$$\begin{aligned} Q_1 &= \bar{\sigma}_p \cdot K_p \cdot \tan \delta \cdot 2 D_1 \cdot \pi D_1 \quad (5.2) \\ &= \bar{\gamma}_p \cdot L \cdot K_p \cdot \tan \delta \cdot 2 D_1 \cdot \pi D_1 \\ &= (1.70)(1.5)(21.2)(0.51)(2)(0.108) \\ &\quad (\pi)(0.108) \\ &= 2.02 \text{ ton} \end{aligned}$$

이다.

여기서,  $\bar{\gamma}_p$  = 말뚝 선단부 흙의 단위 중량( $\text{t/m}^3$ )

$L$  = 말뚝의 관입 깊이(m)

$K_p$  = Coulomb의 수동 토압 계수

$\delta$  = 관내토와 말뚝 내면의 벽면 마찰각( $^\circ$ )

$D_1$  = 말뚝의 내경(m)

### 永井의 아칭 이론을 이용한 분석

永井이 해석한 4개의 예를 통하여, 말뚝 벽면과 인접한 관내토에서 발생하는 마찰응력의 분포를 추정하여 그림 5.3에 나타내었다. 여기서, 관내토의 마찰응력은 말뚝 선단으로부터 말뚝 직경의 2배 높이까지의 관내토에서만 발휘되며, 말뚝 선단에서는 극한 단위 선단 지지력  $q_0^*$ 가 작용한다고 가정하였다. 점 A에서는 마찰로 인한 주응력의 감소가 없으므로 반경 방향응력은 그림 5.3(a)에서  $1/2 q_0^*$ 가 된다. 이 때, 점 A의 마찰 응력  $\tau_A$ 는

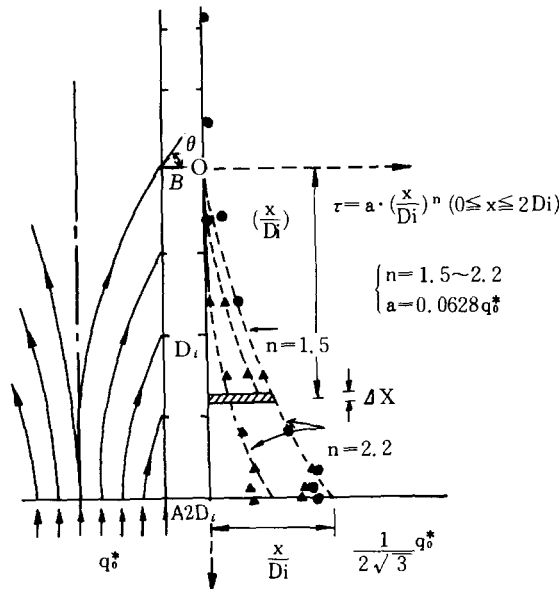
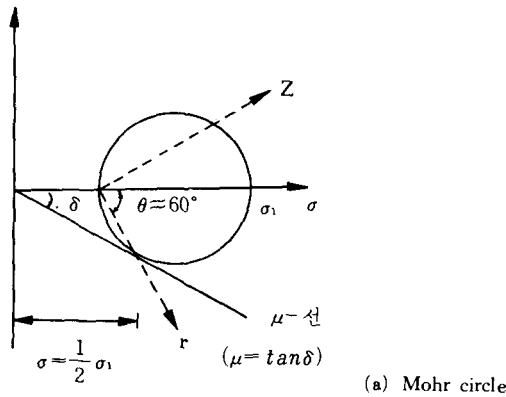
$$\tau_A = \mu \cdot \sigma_r = \tan \delta \cdot \frac{1}{2} q_0^* = \frac{1}{2\sqrt{3}} q_0^* \quad (5.3)$$

이며, 말뚝 선단으로부터 직경의 2배 높이인 지점(그림 5.3(b)의 점 B)에서 아래 방향으로 x만큼 떨어진 지점의 관내토 마찰 응력  $\tau_x$ 는

$$\tau_x = 0.0628 \cdot q_0^* \cdot \left(\frac{X}{D_i}\right)^{2.2} (0 \leq X \leq 2D_i) \dots\dots\dots (5.4)$$

이다. 그림 5.3(b)에 나타낸 미소 요소 dx에 대한 전단력 dF는

$$dF = \tau_x \cdot \pi \cdot D_i \cdot dx \dots\dots\dots (5.5)$$



(b) Distribution of frictional stress and shape of arch in soil plug

Fig. 5.3 Analysis using Nagai's arching theory

이므로, 관내토의 총 마찰 저항력은

$$\begin{aligned} Q_i &= \int_0^{2D_i} dF = \int_0^{2D_i} 0.0628 q_0^* \left(\frac{X}{D_i}\right)^{2.2} dx \\ &= 0.0607 q_0^* D_i^2 \\ &= 0.0607 (\gamma \cdot L \cdot N_q) D_i^2 \\ &= (0.0607)(1.70)(1.5)(120)(0.108)^2 \\ &= 2.17 \text{ ton} \end{aligned}$$

이다. 여기서,  $q_0^*$ 는 개단 말뚝의 선단부에 있는 관내토의 단위 선단 지지력인데, 폐단 말뚝의 값을 대입하였다. L은 말뚝의 관입 길이이며,  $D_i$ 는 말뚝의 내경이다.  $N_q^*$ 는 지지력 계수이며, Kulwahy의 도표<sup>20)</sup>를 사용하였다.

山原의 제안식을 이용한 분석

山原이 제안한 관내토의 지지력 산정공식은 식 (3.1)과 같으며 그 식에 의해 구한 관내토 지지력  $Q_i$ 는

$$\begin{aligned} Q_i &= \frac{\pi \gamma D^3}{16 \mu \omega} (e^{\frac{4\mu}{D} H_i} - 1) - \gamma A H_i \\ &= \frac{(\pi)(1.70)(0.108)^3}{(16)(0.600)(0.25)} (e^{\frac{(4)(0.600)(0.25)}{0.108}} \\ &\quad - 1) - (1.70)(\pi/4)(0.108)^2 (1.1) \\ &= 1.24 \text{ ton} \end{aligned}$$

이다.

勝見의 제안식을 이용한 분석

勝見이 제안한 관내토 단위 극한 선단 지지력 공식은 식 (3.2)와 같으며, 본 연구에서는 관내토의 점착력을 무시할 수 있으므로 관내토 지지력  $Q_i$ 는

$$\begin{aligned} Q_i &= D \gamma N_{r1} \frac{\pi D_i^2}{4} \\ &= (0.11)(1.70)(1,225)(\pi/4)(0.108)^2 \\ &= 2.18 \text{ ton} \end{aligned}$$

이다.

관내토 폐색력의 비교·분석 및 토의

본 논문에서 사용한 분석 방법들에 의한 관내토 폐색력을 표 5.1에 나타내었다. 본 논문의 경우, 관내토 폐색력은 하한치로써 2.00 ton으로 추정되었으며, 이 실험값은 Coulomb의 수동토



Table 5.1 Analysis of frictional resistance of soil plug

방 법	관내토 폐색력 (ton)	해 석 근 거
실 험	2.00	$D_i = 10.8 \text{ cm}, D_o = 11.4 \text{ cm}, L = 150 \text{ cm},$ $H_i = 110 \text{ cm},$ 관내토 특성 : $\gamma = 1.70 \text{ t/m}^3, \phi = 41^\circ, \delta = 27^\circ$
Coulomb 수동상태를 가정한 분석	2.02	$K_p = \frac{\sin^2(90 - \phi)}{\sin(90 + \delta) [1 - \sqrt{\sin(\phi + \delta) \cdot \sin \phi / \sin(90 + \delta)}]}$ $Q_i = \tau_p \cdot K_p \cdot \tan \delta \cdot 2 D_i \cdot \pi D_i$
永井의 아칭이론을 이용 한 분석	2.17	$\tau_x = 0.0628 \cdot q_0^* \left(\frac{x}{D_i}\right)^{2.2} (0 \leq x \leq 2 D_i)$ $Q_i = 0.607 \cdot q_0^* \cdot D_i^2$ $= 0.607 \cdot (N_q^* \cdot \gamma \cdot z) \cdot D_i^2$
山原의 지지력 공식을 이용한 분석	1.24	$Q_i = \frac{\pi \gamma^2 D_i^3}{16 \mu \omega} (e^{4\mu/D_i} H_i - 1) - \gamma A H_i$
勝見의 지지력 공식을 이용한 분석	2.18	$q_{ui} = D_i \gamma N_{r1}$ $Q_i = q_{ui} \cdot \frac{\pi D_i^2}{4}$

압을 이용한 예측치(2.02 ton), 永井의 아칭이론을 이용한 예측치(2.17 ton), 그리고 勝見의 경험식에 의한 예측치(2.18 ton)등과 비교적 잘 일치하였다. 이들 예측치들은 실험값과 약 10% 이내의 오차를 나타내었다. 그리고 본 논문에서 제안하는 Coulomb의 수동토압이론을 이용한 예측방법은 사용이 간편한 장점이 있다.

관내토 폐색작용의 크기를 나타내기 위하여 본 논문에서는 아칭비(arching ratio)<sup>21)</sup>를 다음과 같이 정의하였다.

$$\text{아칭비} = \frac{\text{관내토 폐색력}}{\text{관내토 순마찰력(폐색작용이 없다고 가정)}} \\ = \frac{Q_i}{(\frac{1}{2} \bar{K} \bar{q}_v)(\tan \delta)(H_i \pi D_i)} \quad (5.7)$$

여기서,  $\bar{K}$  = 흙의 수평 토압 계수(=1 - sin  $\phi$ )

$\bar{q}_v$  = 관내토 길이에 대한 연직 응력

$\delta$  = 관내토와 말뚝 내면의 벽면 마찰각(=2/3  $\phi$ )

$\phi$  = 관내토 내부 마찰각

$D_i$  = 말뚝의 안지름

$H_i$  = 관내토의 길이

본 연구에서 사용한 모형 말뚝에 대한 아칭비는 다음과 같다.

$$\text{아칭비} = \frac{2.00}{1/2(0.344)(1.87)(0.510)(\pi)(0.108)(1.1)} \\ \approx 33$$

즉, 본 모형 말뚝에서는 관내토 폐색작용이 발생하지 않을 때의 관내토 마찰력에 비하여 약 33배의 관내토 폐색력이 발생하였다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 모형 말뚝에 축 하중 계측 장치를 부착하고 재하실험을 하여, 개단 말뚝과 선단부 폐색원인을 분석하고, 폐색효과에 대한 기존의 정량적 예측방법들을 비교 검토한 결과 본 논문에서 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 관내토의 폐색력은 본 논문의 경우 하한치로써 2.00 ton으로 추정되었으며, Coulomb 수동 토압이론, 永井의 아칭이론, 그리고 勝見의 경험식 등에 의한 예측치들과 비교적 잘 일치하였다. 이들 예측치들은 실험값과 약 10% 이내의 오차를 나타내었다. 본 논문에서 제안하는 Coulomb 수동 토압이론을 이용한 예측방법은

사용이 간편한 장점이 있다.

2. 아래 식과 같이 정의한 아칭비는 본 논문에서 사용한 모형 말뚝의 경우 약 33이었다.

$$\text{아칭비} = \frac{\text{관내토 폐색력}}{\text{관내토 순 마찰력 (폐색작용이 없는 경우)}}$$

3. 아칭현상은 크기 효과(size effect)의 영향을 받는 것으로 알려져 있어서 실물크기의 실험을 통하여 본 논문의 결과를 확인할 필요가 있다.

### 참고 문헌

1. 永井興史郎, 開端鋼管杭の支持力機構に関する研究, 1986年4月, pp.1~67, 博士學位論文.
2. 小公雅彦, 脇黒稔, 富永眞生, “大口徑鋼管クイの閉ンク性に關する2, 3の實驗”, 土と基礎, 17-5, No. 558, May, 1969, pp.11~16.
3. M.J. Tomlinson, Pile Design and Construction Practice, 3rd ed., A Viewpoint Publication, London, 1981, pp.106, 356-369.
4. 山肩邦男, 永井興史郎, “開端鋼管ぐいの支持力に關する考察(その1, 2)”, 日本建築學會論文報告集, 第212號, 昭和48年10月(1973), pp.1~8, 第213號, 昭和48年11月(1973), pp.39~44.
5. 後藤尙男, 勝見雅, “大徑鋼管ぐいの沈下に關する基礎的研究”, 土木學會論文集, 第138號, 昭和42.2(1967), pp.1~10.
6. 岸田英明, 有原高志, 原悟視, “開端グイの内部に詰った砂の學動”, 第9回 土質工學研究發表會, 昭和49(1974), pp.549~552.
7. J. Klos & A. Tejchman, “Analysis of Behavior Tubular Piles in Subsoil”, Proceedings, 9th ICSMFE, Vol. 1, Tokyo, Japan, 1977, pp.605~608.
8. J. Klos & A. Tejchman, “Bearing Capacity Calculation for Pipe Piles”, Proceedings, 10th ICSMFE, Vol. 2, Rotterdam, 1981, pp.751~753.
9. H. Kishida & N. Isemoto, “Behavior of Sand Plugs in Open-ended Steel Pipe Piles”, Procee-

- dings, 9th ICSMFE, Vol. 1, Tokyo, Japan, 1977, pp.601~604.
10. 山原浩, “鋼管ぐいの閉塞効果と支持力機構(その1, 2)”, 日本建築學會論文報告集, 第96號, 昭和39年3月(1964), 第97號, 昭和39年4月(1964), pp.28~35, pp.34~41.
11. 田島重男, “開端グイの先端閉そく効果の考察”, 第1回 土質工學研究發表會, 昭和41年(1966), pp.211~214.
12. 青木雅路, 岸田英明, “開端杭内部に詰った砂の極限抵抗力”, 第4回 土質工學研究發表會, 昭和54(1979), pp.913~916.
13. 勝見雅, 貴谷暢夫, “開端杭の閉塞効果に關する基礎的研究”, 土木工學會論文報告集, 第323號, 1982年7月, pp.133~139.
14. H.G. Poulos & E.H. Davis, Pile Foundation Analysis and Design, John Wiley and Sons, 1980, pp.13~14.
15. 日本建築學會, 建築基礎設計基準
16. A.S. Vesic, Design of Pile Foundations, NCHRP Synthesis of Highway Practice 42, 1977, pp.8~31.
17. W.A. Bieganousky, W.F. Marcuson, “Uniform Placement of sand”, Journal of the Geotechnical Eng. Div., ASCE, Vol. 102, No. GT. 3, Mar. 1976, pp.229~223.
18. B.H. Fellenius, “Test Loading of Piles and New Proof Testing Procedure”, Journal of the Geotechnical Eng. Div., ASCE, Vol. 101, No. GT. 9, Sept. 1975.
19. Potyondy, “Skin Friction Between Various Soils and Construction Materials”, Geotechnique, 1961, pp.11~14.
20. F.H. Kulwaha, “Limiting Tip and Side Resistance, Factor fallacy” Symposium on Analysis and Design of Pile Foundations, American Society of Civil Engineers, San Francisco, 1984, Proceedings, pp.80~98.
21. 최용규, “개단 강관 말뚝의 폐색 효과에 관한 모형 실험 연구”, 박사 학위 논문, 서울대학교 대학원, 1989. 2.

(접수일자 1989. 10.18)