

심초공법의 현황과 과제

일본 규슈(九州)공립대학 공학부 토목공학과 교수 마에다 요시토(前田良刀)

1. 머리말

심초공법은 현장타설 말뚝공법의 하나이며 현재는 약간의 기계를 병용하기도 하지만 지반 굴착을 주로 하여 인력으로 시공하는 오래된 기초공법이다. 건설근로자의 부족과 안전대책 문제 등으로 인해 일반적으로 굴착기계의 반입이 어려운 장소에서 시공되기 때문에 적용장소도 비교적 한정된다.

대표적인 예로는 산악지 급경사면의 교량이나 송전선 철탑 등의 기초, 사면붕괴나 활동(滑動) 등의 억지공 및 기존 구조물 보수, 보강을 위한 언더피닝공법 등에 대한 적용을 들 수 있다.

일본 건설성 토목연구소에서 조사한 구조물 기초형식의 선정방법을 보면 말뚝공법 전체에서 기초공법이 차지하는 비율은 약 14% 정도이고 산악고속도로가 많은 일본도로공단에서는 전체 기초중에서 약 15% 정도를 차지한다.

이와 같은 특수한 조건에서 채택되는 기초공법이기 때문에 그 채택이 본격화된 1960년대 중반에는 설계시공 측면에서 많은 기술적 문제점을 가지고 있었다. 이후

현지실험이나 이론연구 및 시공법의 개량 등으로 점차 기술기준이 정비되어, 현재는 실무에 어느 정도 정착되었다고 할 수 있다. 이러한 검토업무에 필자도 상당부분에 참여하였다. 그러나 합리적·경제적인 심초말뚝의 건설을 위해서는 아직도 해결해야 할 기술적 과제가 많이 남아 있다.

이 글에서는 심초공법으로 시공된 기초(이하, 심초말뚝)의 설계시공에 대한 기술의 현황과 과제에 관해 총론적으로 다루고 그 해결 방향을 살펴 보고자 한다.

2. 심초말뚝의 설계 현황과 과제

1) 연직지지력

심초기초는 현장타설말뚝으로 분류되고 있지만 통상적인 말뚝기초의 연직지지력 산정식을 그대로 적용하는 데에는 아래와 같은 문제가 있다.

- ① 기초전장에 걸쳐 라이너플레이트 등의 흙막이재를 사용하며 또한 이것을 철거하지

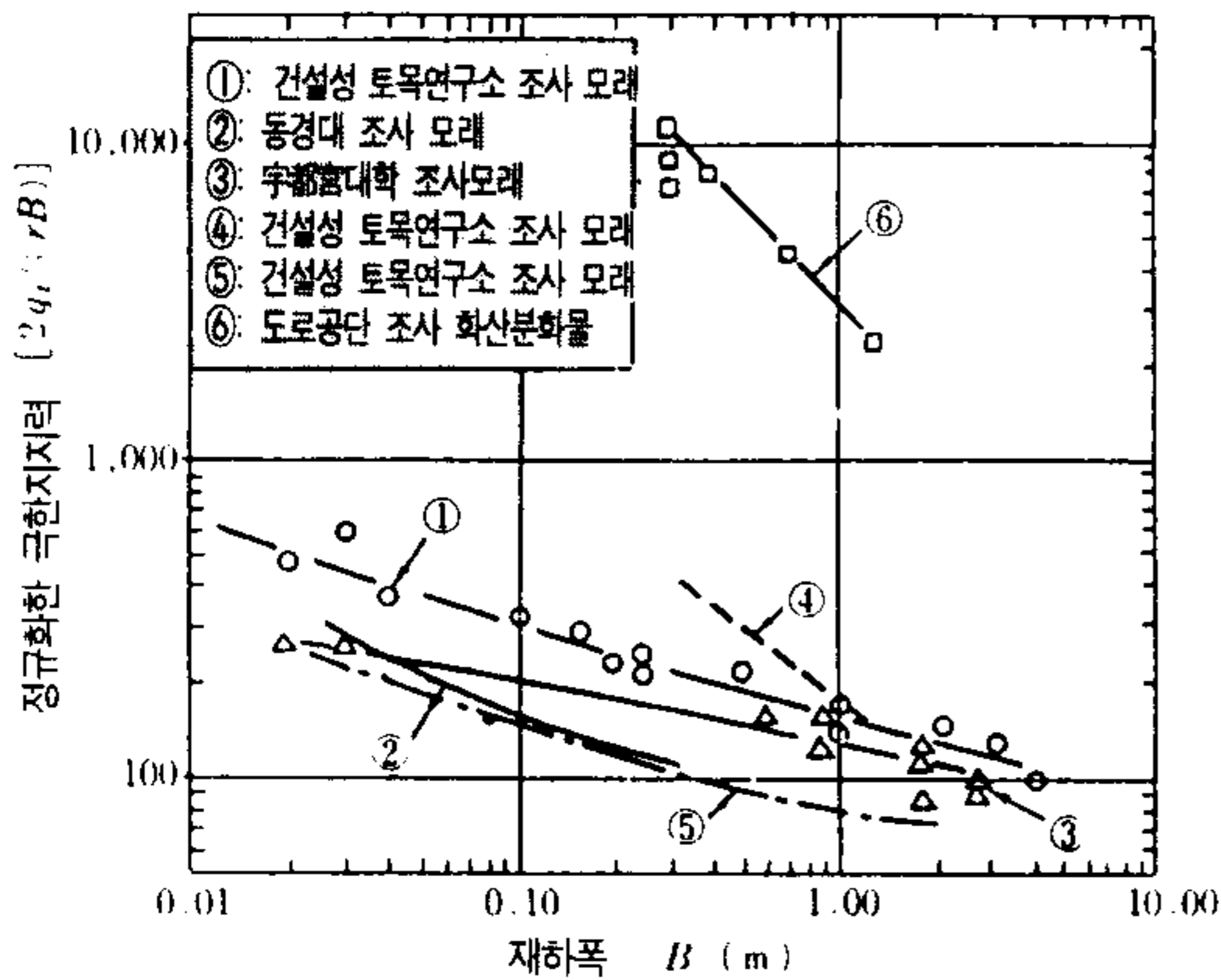


그림-1 직접기초 한계지지력의 재하폭 의존도

경우에도 말뚝지름을 어느 정도까지 적용할 수 있는지에 대해서는 아직 명확한 기준이 없다.

그림-1은 모래지반에서 얇은 기초의 지지력계수의 치수효과를 나타낸 것이다. 본래 일정해야 할 지지력계수 $N\gamma$ (그림중의 세로축은 $c=0$ 의 경우 $N\gamma$ 이 된다)는 재하폭(기초폭)의 증대에 따라 감소되고 있으며 지지력계수에 치수효과가 존재하고 있다.

히시모베(日下部), 마에다(前田) 등은 지반전단강도의 구속압 의존성을 고려하여 얇은 직접기초의 실용지지력식을 나타내고 있다.

$$q_u = S_c \cdot C \cdot N_{c0} \cdot (C/C_0)^{-\alpha} + (1/2) \cdot S\gamma \cdot \gamma \cdot B \cdot N\gamma_0 \cdot (B/B_0)^{-\beta} \quad (1)$$

여기에서, $S_c, S\gamma$ 은 형상계수, C_0, B_0 는 기준이 되는 점착력, 기초폭이며 α, β 는 구속압 의존성을 고려한 계수이다.

여기에 더해, 깊은 기초인 심초말뚝의 선단지지력에는 근입효과에 의한 지지력성분이 존재하지만 이 경우의 지지력계수 N_q 에도 압력의존성이 있어 고전적 지지력식은 성립하지 않는 것으로 보인다. 야스후쿠(安福) 등은 말뚝지름이 작아 지지력이 거의 근입효과뿐인 것으로 간주되는 경우의 모형실험을 실시하여 상재압효과를 고려한 지지력계수의 수정계수를 제안하고 있다.

$$q_u = Ff \cdot N_{q0} \cdot \sigma_v \quad (2)$$

여기에서, Ff 는 기준이 되는 지지력계수 N_{q0} 의 수정계수이며 σ_v 는 상재압이다.

대구경이며 깊은 기초인 심초말뚝은 (1), (2)식의 특성을 동시에 반영할 수 있는 지지력 평가가 바람직하다. 또한 (1), (2)식은 활동면이 명확하게 존재한다는 Prandtl·Terzaghi계의 강소성 이론에 의한 이해를 실무적으로 수정하려는 것인데 이 외에 지반의 탄소성적 거동을 반영한 '구(球)공동 밀어넣히기' 문제에 의해 지지력을 평가하는 방법도 이미 제안된 바 있다.

현시점에서 도로교 케이슨기초의 연직지지력과 같은 고전적 지지력이론을 이용하여 계산한다면, 지금까지의 경험적인 판단을 기초로 지지력도의 상한값을 정해야 한다.

얇는 것이 보통이고 설사 그라우트를 주입하여도 시공성에 문제가 있다는 점.

② 기초 선단의 저면부에서는 일반적인 기계굴착에 의한 시공법보다 지지지반의 확인이 명확하다는 점 및 시공에 의한 지지지반의 교란이 적다는 점과 대구경이라는 점.

이 때문에 연직지지력의 검토방법이 아직 확실치 않고 일원화되어 있지 못한 것이 현실이다.

심초말뚝의 주면마찰력은 그라우트효과를 기대하는 경우와 무시하는 경우가 있으며 또한 선단지지력도 사질토에 대해 현장타설말뚝의 선단지지력을 준용하는 경우나 케이슨 등의 대구경기초에 적용되는 고전적인 지지방식에 의하는 경우가 있다.

심초말뚝은 말뚝지름이 크며, 시공조건이 까다로운 곳에서 시공되기 때문에 재하시험을 실시하여 연직지지력을 확인하는 일이 거의 없는 것이 실정이다.

그러나 최근의 연구에 따르면 기초의 지지력 문제에서 지반의 진행성 파괴나 지반강도의 구속압 의존성에 의해 고전적인 지지력식이 성립되지 않는다는 것이 거의 정설로 되어 있다. 즉, 지지력계수의 치수효과에 의해 기초말뚝과 같은 대구경 말뚝의 선단지지력은 말뚝지름이 증대되어도 그다지 증가하지 않는다. 이 때문에 고전적 지지력식만으로는 한계가 있다. 또한, 현장타설말뚝을 준용하는

해 석 법	① 극한지반 반력법	② 탄성지반 반력법	③ 복합지반 반력법
계산모델			
지반의 요소에서 하중강도와 변위의모식도			
특 실	<ul style="list-style-type: none"> ● 근입이 짧은 강기초에 적용 ● 기초 변형과의 관계가 명확하지 않다. 	<ul style="list-style-type: none"> ● 실용적으로는 기초의 변위에 대응한 계산이 가능 ● 지반의 극한지지력과의 관계가 명확하지 않다 	<ul style="list-style-type: none"> ● 이론적으로는 변형과 극한 지지력을 동시에 평가할 수 있다 ● 지반정수나 계산모델에 민감하다.
적용(도로교)	케이슨기초	말뚝기초 · 강관널말뚝기초	지중연속벽기초

그림-2 깊은 기초의 수평저항에 관한 해석법의 분류와 특징

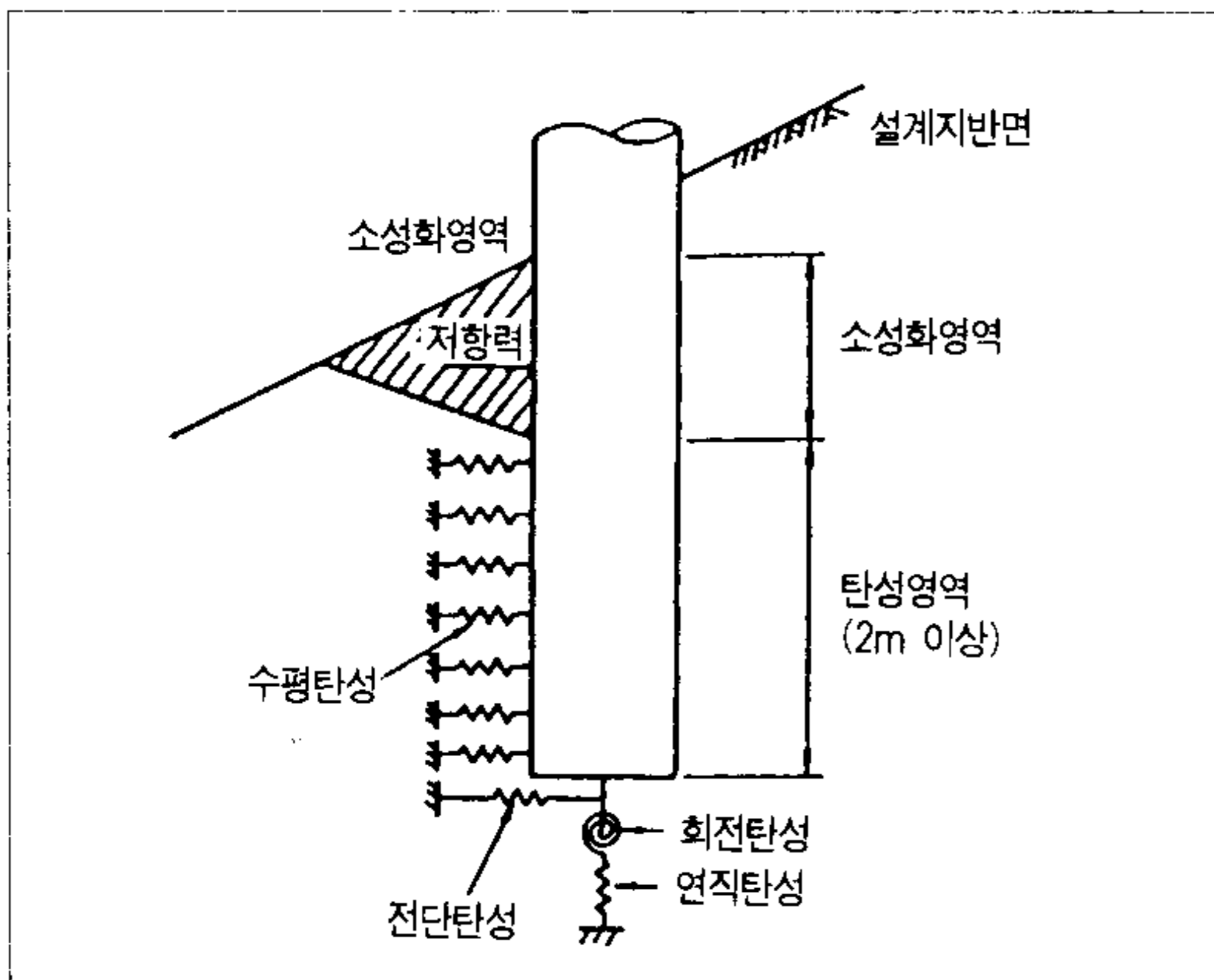


그림-3 심초기초의 역학모델

한편, 지지지반이 점성토인 경우는 전기관에서 거의 같은 개념의 선단지지력식이 채택되며, 또 지지지반이 연암인 경우에도 환산 N 치를 이용하여 점착력 $C_u \approx N$ 이라 가정하면 점성토지반을 대상으로 한 지지력식을 준용할 수 있게 된다. 이 경우, 고전적 지지력식을 사용해도 그다지 답은 변하지 않는다.

또한 심초말뚝의 주변마찰력은 그 시공법과 밀접한 관계가 있으며 나중에 설명할 흙막이재에 슛크리트를 이용한 굴착공법 등에서

주변마찰력을 측정하는 실험 등이 행해지고 있다. 이러한 결과들에 의해 심초말뚝의 지지력 평가가 경제적인 면에서 상당히 개선될 것이다.

2) 수평안정 문제와 관련과제

그림-2는 깊은 기초의 수평저항과 그 해석법의 관계를 나타낸 것이다. 기초는 그 시공법에 따른 특성 이외에 지반과의 상대적인 관계에 따라 각각 다른 해석법이 채택되고 있다.

심초말뚝이 평지에 시공되는 경우에는 근입길이나 강성에 맞추어 기계굴착에 의한 현장타설말뚝이나 케이슨의 설계법을 준용하면 현시점에서도 실무상 지장이 없다. 그러나 1960년대 중반에는 메이신(名神)·도메이(東名) 시대를 거쳐 중앙도로나 신규 고속도로의 전국적 연장에 따라 심초말뚝을 산악지의 급경사면에서 많이 시공되어 독자적인 설계법이 필요하게 되었다.

사면에서는 골짜기쪽으로는 수평지지력이 평지에 비해 두드러지게 감소하기 때문에 지반의 안정조사를 고려한 설계계산법이

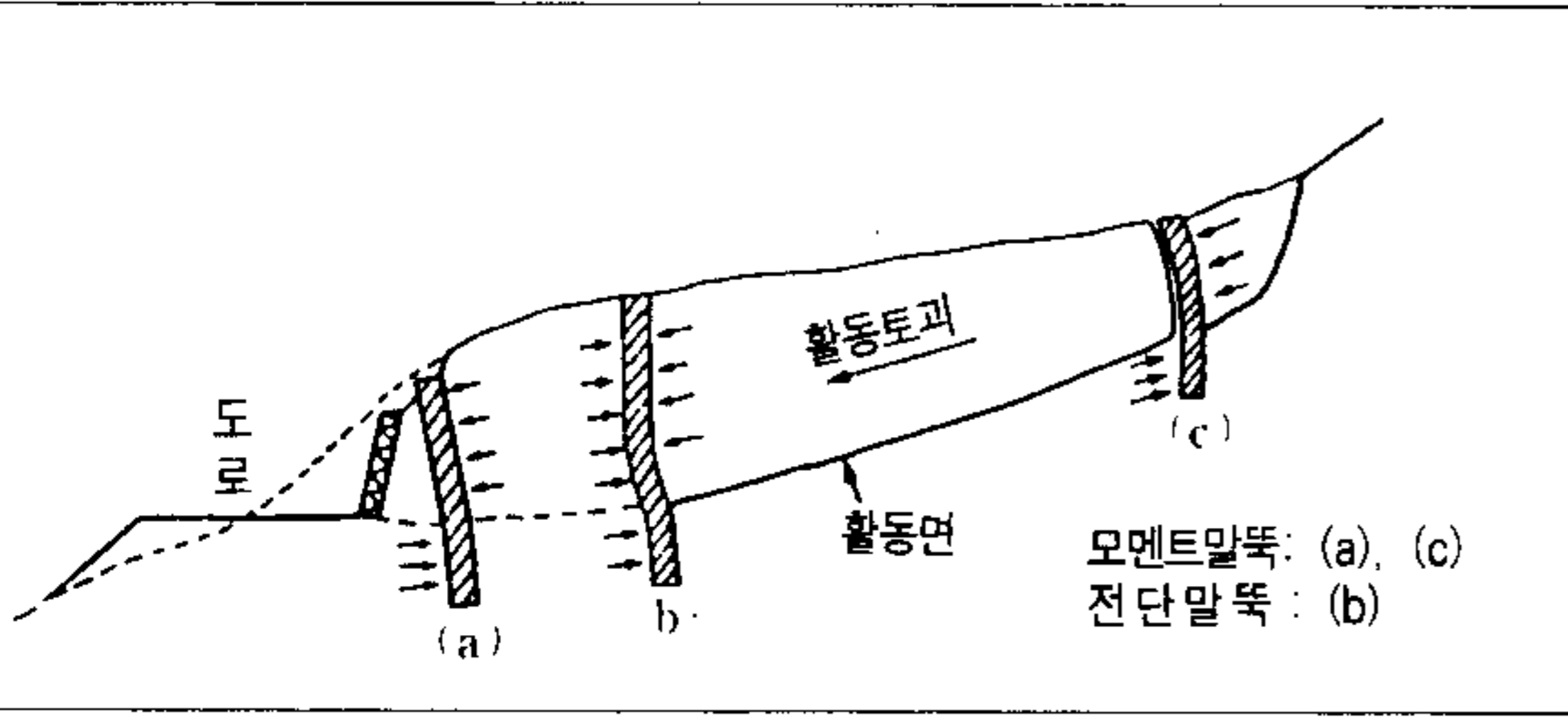


그림4 활동과 말뚝의 개념도

필요하였으나 말뚝의 설계법은 탄성상상의 보가 기본이어서 간편하지만 지반의 안정조사를 할 수 없다. 한편으로, 지지하는 상부구조의 대규모화가 진행되어 심초말뚝의 지름도 커져 마침내 말뚝의 계산법에서는 적용상의 한계가 나타나게 되었다.

이로 인해 일본도로공단은 실내실험과 현지실험을 거듭하여 1978년에 그림-3과 같은 복합지반 반력법을 채택하게 되었다. 이 설계법은 말뚝의 탄성지반 반력법이나 케이슨의 극한지반 반력법에 비교하면 이론적으로 한걸음 진보된 것이었으나, 유감스럽게도 계산상의 번잡함이나 현지실험과의 정합성(특히 토사지반) 및 대구경 말뚝에 적용하기 곤란하다는 등의 문제가 있어 이 설계법 단독으로 운용되는 일은 없었다.

현재도 탄성지반 반력법인 탄성상상의 보 이론과 복합지반 반력법의 두가지가 병용되고 있으며 잠정적 조치라는 느낌도 없지 않다. 한편, 도로교에서는 지중연속벽기초 설계시공지침 등과 같이 복합지반 반력법이 설계실무에 도입되어 점차 정착되고 있다. 그리고 이 설계법의 개념은 사면지반에 대해서도 충분히 적용할 수 있도록 되어 있다. 또한, 심초말뚝이나 지중연속벽기초와 거의 동등한 강성을 지닌 강관널말뚝 기초에 대해서도 설계법의 재검토가 이루어지고 있다. 심초말뚝의 설계법에 대해서도 이와 같은 유사한 구조물기초와 보조를 맞추어 재검토할 시기가 되었다고 생각된다.

이상은 구조물기초로서의 심초말뚝이었으나, 이 외에 사면붕괴나 활동억지공으로서의 심초말뚝의 사용도 많다. 이런 경우에도 수평안정 문제가 중요하다. 그림-4는 활동과 말뚝의 설계상의 관계를 나타내고 있는데 활동 상부의 골짜기쪽 토괴의 수동저항을 기대할 수 없는 것을 '모멘트말뚝', 수동저항을 기대하는 것을 '전단말뚝'이라 하고 있다. 특히 중요구조물에 대한 영향을 고려할 경우, 안전을 위해 모멘트말뚝의 설계법이 채택되는데 이때의 설계법은 그 특성장 βl ($\beta = \sqrt[4]{kD/AEI}$) 에 의해 케이슨 ($\beta l \leq 2$) 이나 말뚝 $\beta l > 2$ 으로 나누어진다.

이러한 설계의 검토방법은 기존 구조물기초의 설계 분류와 거의 같지만 그림-2와 같이 각각 입장일단이 있다. 특히 말뚝으로 간주되는 경우의 근입깊이는 억지공에서의 말뚝공과의 관계 때문에 말뚝 선단의 역학조건이 문제가 되지않는 반무한장의 말뚝 ($\beta l > \pi$) 으로 하는 예도 많다. 이것은 과도한 안전값이 되어 경제성 측면에서 다소 문제가 된다. 억지공의 경우, 지반의 안정조사에 중점을 두면 복합지반 반력법적인 설계법을 채택하여 필요한 근입에 맞춘 일관된 해석을 할 수 있다.

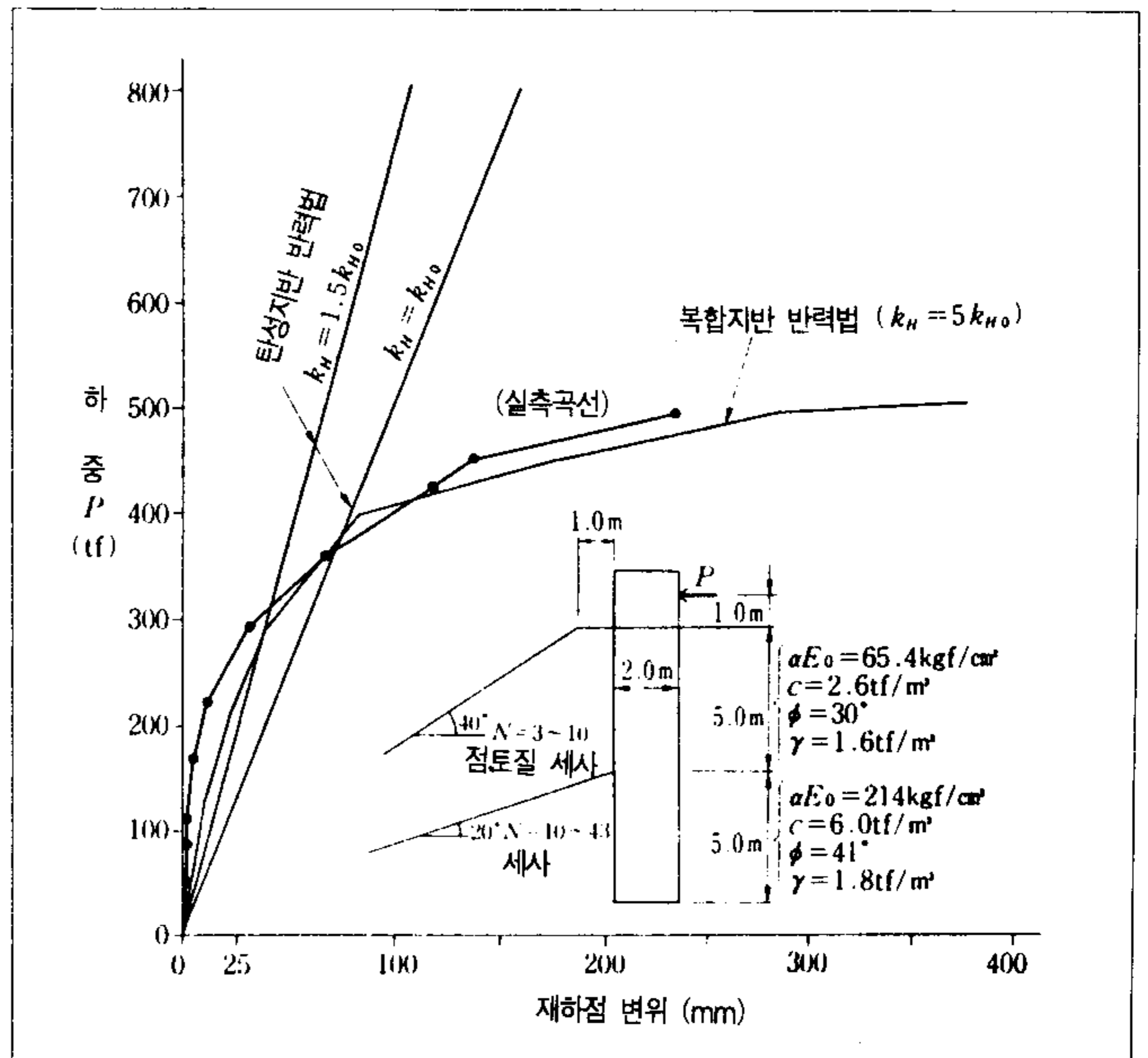


그림5 하중~변위곡선

3) 지반의 평가와 설계정수

심초말뚝은 조건이 매우 한정된 개소에서 시공되기 때문에 지반조사도 상당히 어려우며 그 조사밀도도 낮다. 더우기 대상지반도 폭이 넓어 산지의 경우, 애추퇴적물 등의 토사로부터 풍화가 진행된 연암·경암 등에 이르기까지 다종다양하다. 이 경우, 지반 요소의 역학정수를 조사하는 데에는 고도의 기술이 필요하며, 또 이 구조물 기초의 거동을 표현하기 위한 설계정수를 결정하는 것도 마찬가지이다.

이 밖에 가장 기본이 되는 해석모델의 타당성 문제도 있다. 이 때문에 일본도로공단이 산악지 경사지반에서 실시한 심초말뚝의 현장실험에서는 실제의 거동을 나타내는 것이 불가능함을 보여주는 많은 사항이 지적되었다. 이로 인해 간이설계법적인 방법이 강조된 시기도 있었다. 그러나 진정한 의미의 경제적·합리적인 설계법을 추구한다면 역시 성숙한 이론과 상세한 토질시험으로 결과를 증명해 둘 필요가 있다.

그림-5는 심초말뚝의 현장재하실험의 일례이며 기준이 되는 지반조사나 역학시험으로 얻어지는 지반반력계수 k_{H0} (목표변위량 1cm의 경우)를 검토한 것이다. 탄성지반 반력법에 의할 경우, 허용변위량을 어떤 값으로 설정할 것인가에 따라서도 다르지만, 당시 일반적으로 사용되었던 $\delta_a \leq 25mm$ 으로 하면 약 1.5배의 k_H 값이 예상된다. 복합지반 반력법으로는 약 5배의 k_H 치이며 거의 실제 거동을 표현할 수 있다.

최근, 다츠오카(龍岡) 등에 의해 미소변형 영역에서의 변형계수를 정확하게 측정하는 국소변형 측정장치(LDT)가 개발되어 지반의 변형정도에 대응한 변형계수를 측정하는 것이 가능해짐으로써 기존 지반조사법에서의 변형계수와 비교도 가능하다.

심초말뚝과 같은 대구경 말뚝에서는 지반의 변형이 일반적인 말뚝과 같은지 또는 다른지에 따라 설정하는 초기 변형계수가 결정적으로 달라진다. 또한 이 변형계수는 구속압 의존성도 지니고 있다. k_H 값이라는 입장에서 보면, 기초폭의 증대에 의해 지지력이 증가하고 초기

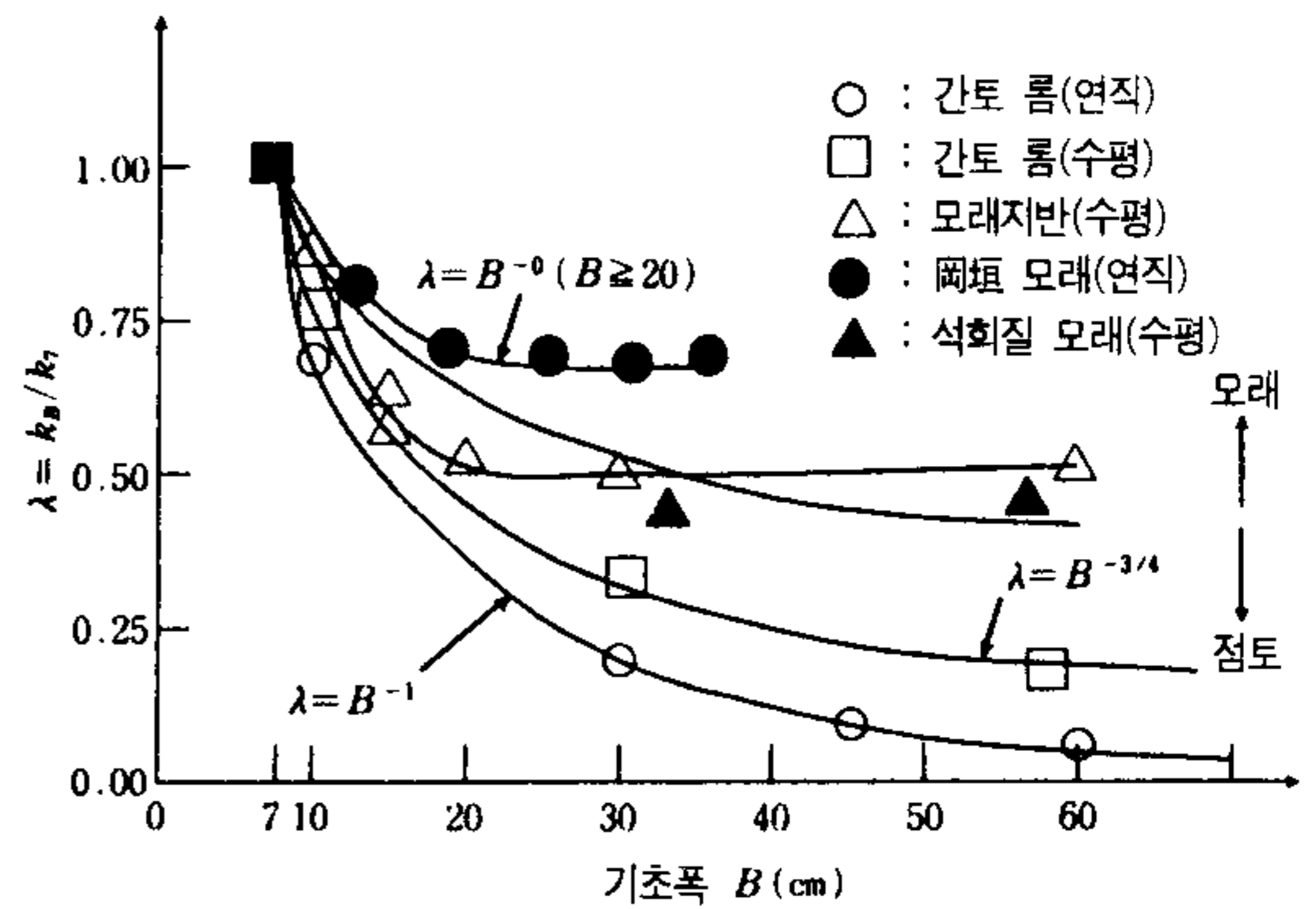


그림-6 지반반력계수의 치수효과

지반반력의 분포도 탄성론과 다른 사질토와, 지지력이 기초폭과 무관하며 초기지반반력의 분포는 탄성이론에 가까운 점성토의 경우에는 k_H 값의 치수효과 특성이 달라지는 것으로 추정된다. 즉, 설계에 이용되는 변형계수의 초기값은 초기의 변형정도와 구속압 의존성에 따라 결정되며, 그 설계상의 탄력계수로서의 k_H 값의 치수효과에는 전단저항의 발현방법(특히 압력레벨의 문제)이 상당한 영향을 미치는 것으로 보인다.

도로교 기초에서 이용되는, 축축하며 점착력이 있는 사질토나 점성토인 간토(關東) 롬에서의 k_H 값의 $B^{-3/4}$ (수식)쪽과 항만에서 이용되는 모래지반을 대상으로 한 경우의 k_H 값은 B 에 무관하다는 것은 각각 같은 관점에서 설명할 수 있다. 이러한 검토의 필요성이 심초말뚝 뿐만 아니라 특히 대구경의 기초에 요구되고 있다.

지반의 역학적 성질을 상세하게 고려하여 검토하면 앞으로 대구경 기초의 초기 k_H 값과 치수효과를 상당히 합리적으로 설명할 수 있을 것으로 보인다.

그림-6은 k 값의 치수효과를 조사한 일례이다. 세로축은 기초폭 $B=7cm$ 를 기준으로 하여 그 때의 k 값에 대한 비율을 나타내고 있다. 따라서, k 값 자체의 크기와는 직접 관계가 없으며 저감경향이 중요하다.

한편, $B=7cm$ 의 데이터가 없는 것은 제안된 식으로부터 k 값을 계산으로 구하고 있다.

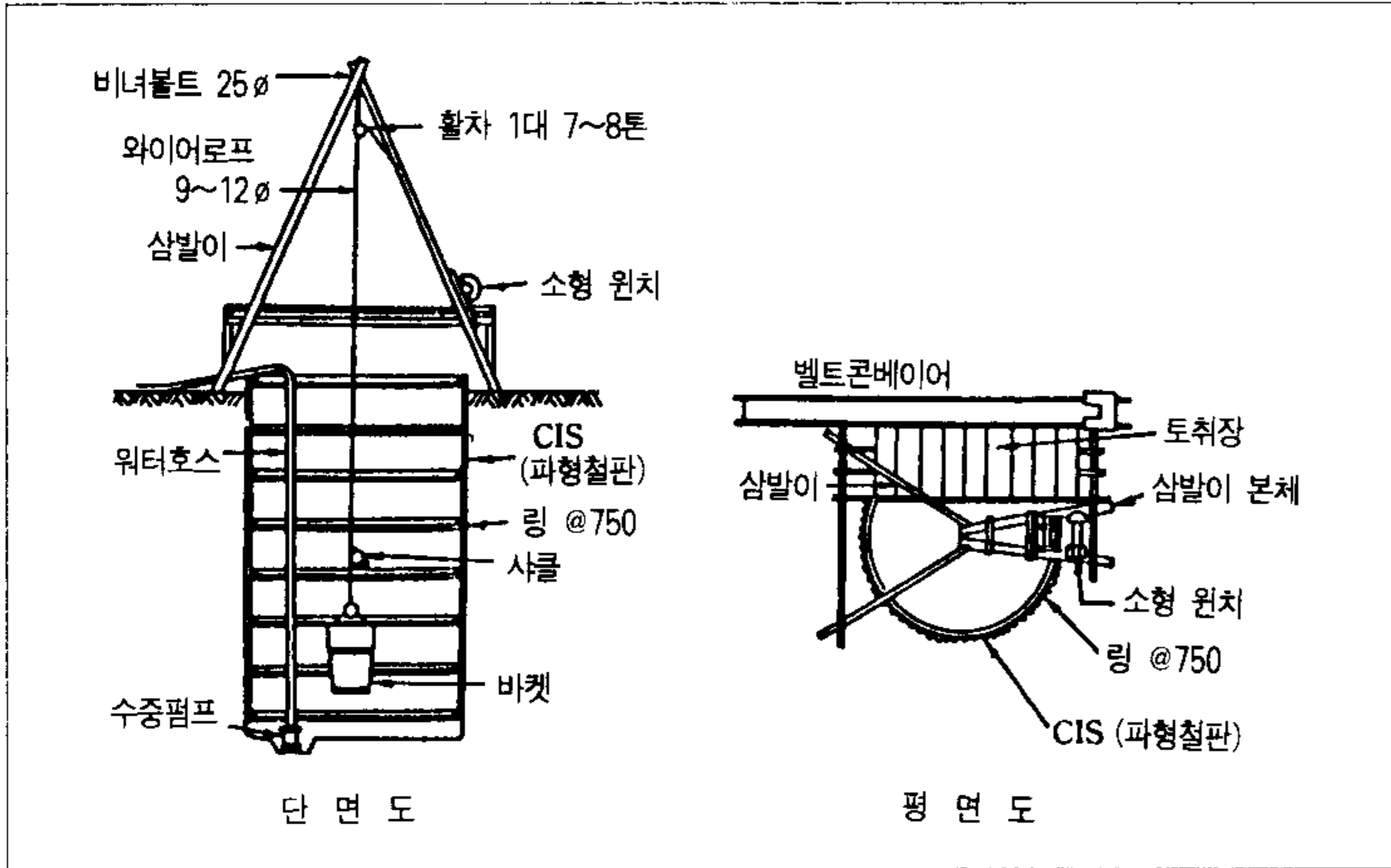


그림-7 심초공법

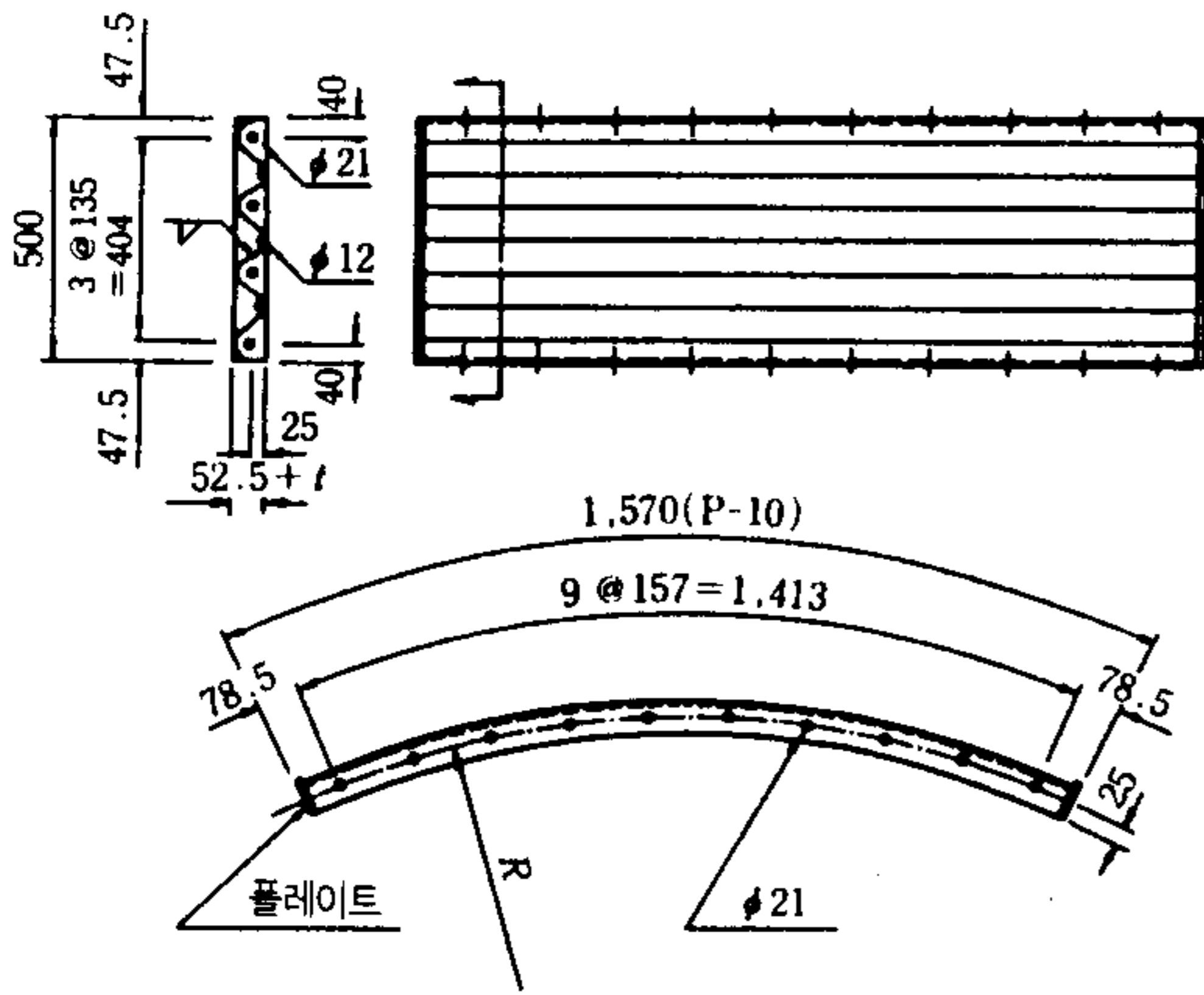


그림-8 라이너플레이트의 일반적인 형태

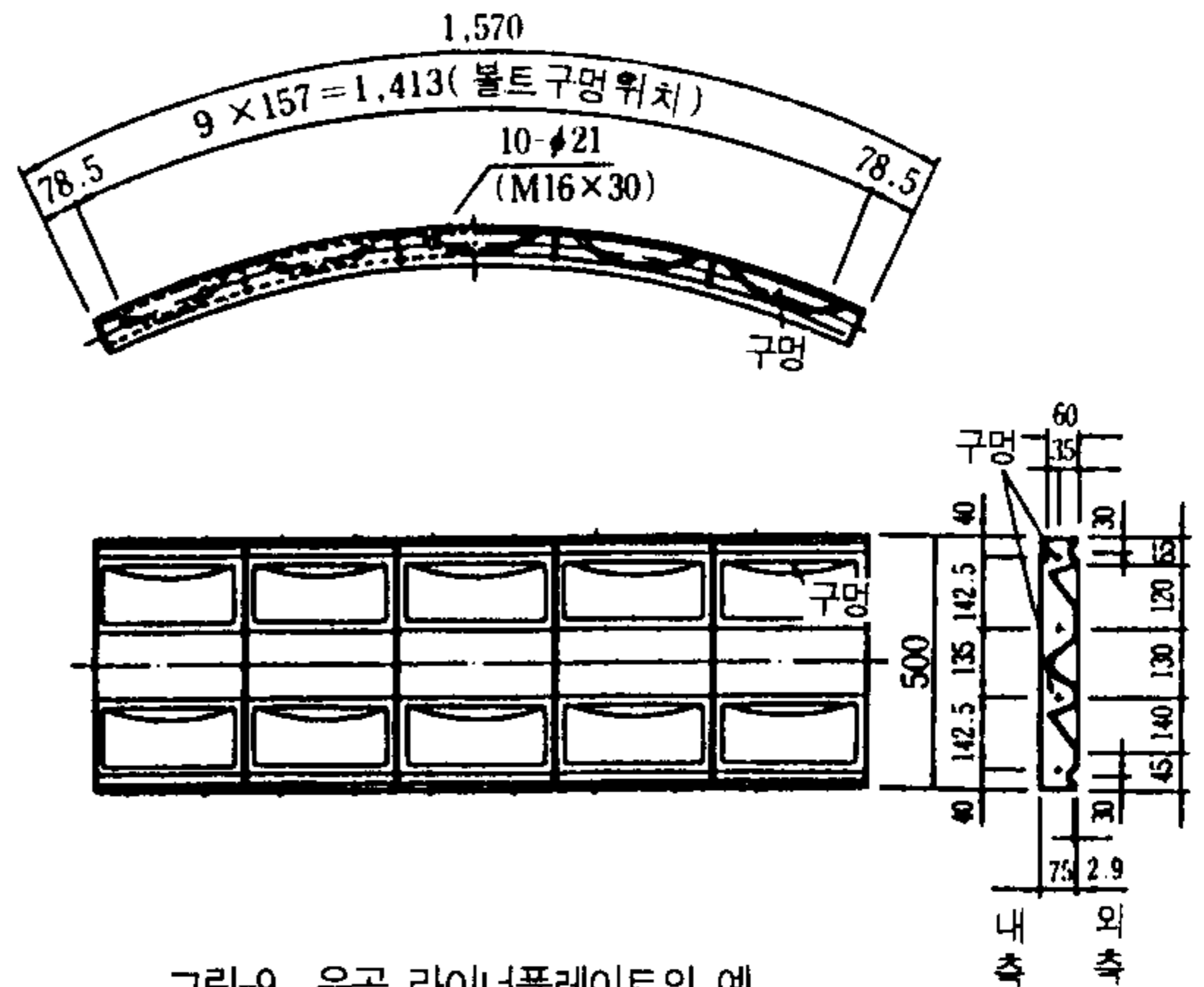


그림-9 유공 라이너플레이트의 예

3. 심초말뚝의 시공현황과 과제

1) 흙막이 지보공

일본 木田建業(株)이 1935년~1941년까지 20여 항목에 걸친 특허를 취득했을 때 상표등록한 "심초"라는 용어가 현재는 보편적인 토목용어로 사용되고 있다. 당시의 흙막이재는 그림-7과 같이 파형강판과 보강링 등으로 이루어져 있었다. 이후, 굴착공법과 흙막이 지보공이 세트가 된 몇가지 심초공법이 개발되었다.

현재 가장 일반적인 흙막이재는 1962년 오바야시구미(大林組)에서 개발한 것으로서

그림-8과 같이 강제 라이너플레이트를 이용하며 볼트 등으로 서로 연결하고 긴장시켜 큰 토압에도 견딜 수 있는 구조로 되어 있다. 또한 작업의 안전을 위해 흙막이재를 철거하지 않는 경우가 늘어남에 따라 흙막이재 뒷쪽 공극에 대한 그라우트재 주입이 일반화되었다. 또 그라우트재 주입을 대체하는 공법으로 타설콘크리트가 플레이트의 외측으로도 돌아갈 수 있도록 유공 라이너플레이트가 개발되어 실적도 늘어나고 있다.

그 후 지지하는 상부구조물이 대규모화 됨에 따라 심초말뚝의 기초구경이 점차 대구경화 되었다. 일반적인 라이너플레이트 방식에서는 경제성과 시공면을 고려하여 대략 5m 미만이

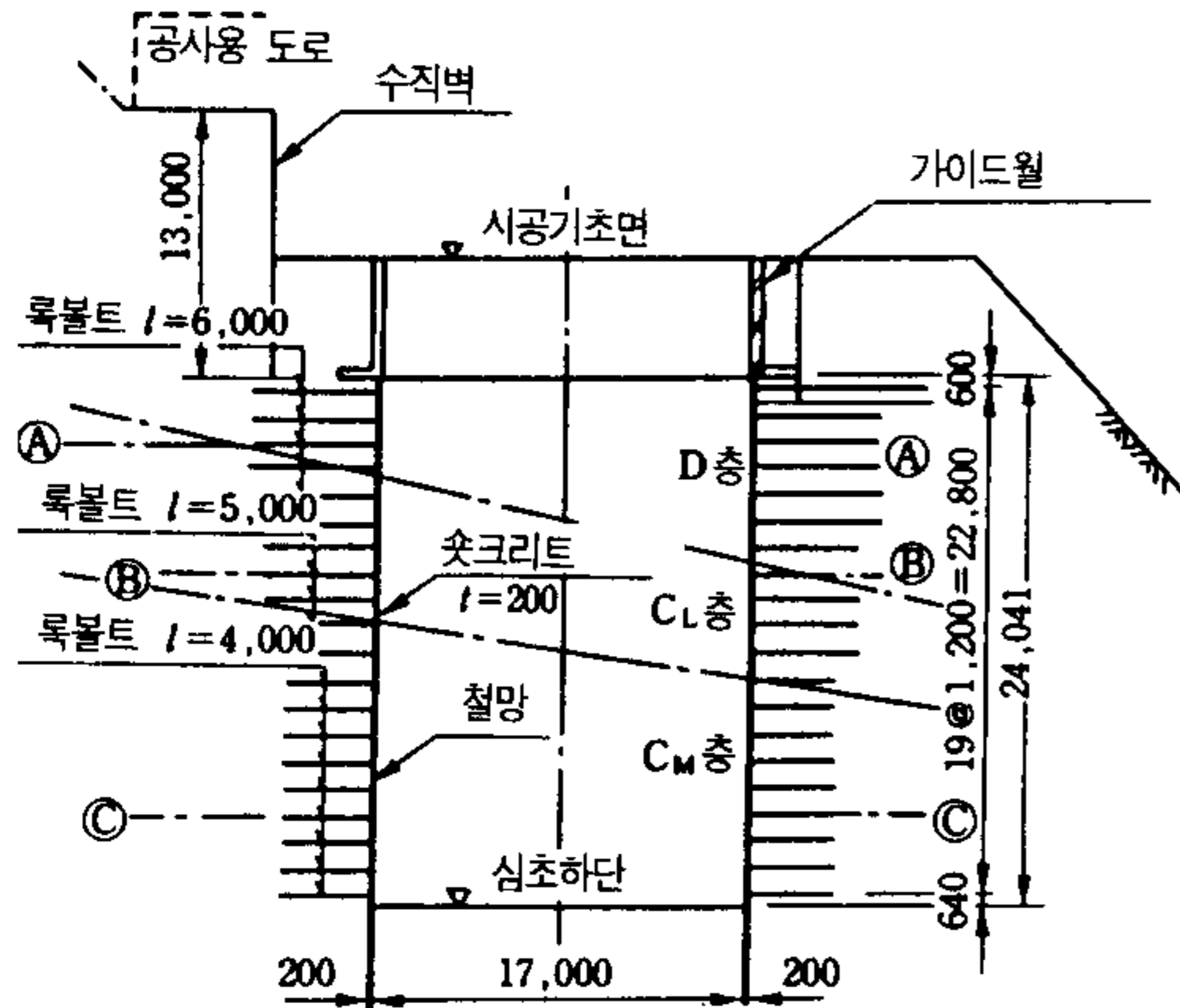


그림-10 대구경 심초의 흠막이공

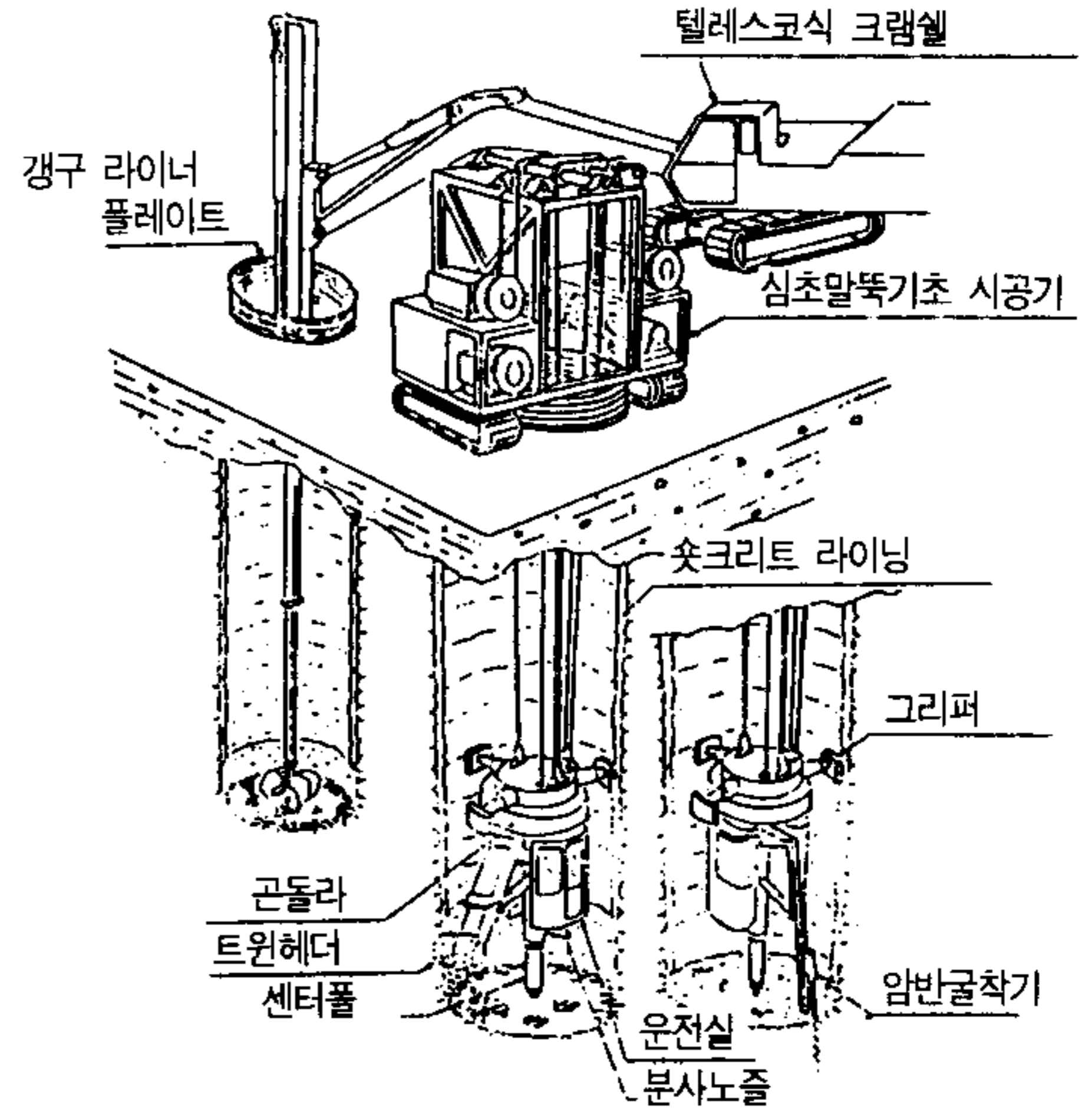


그림-11 심초말뚝기초의 시공

적용한계이다. 이 때문에 1970년대 중반부터 슛크리트 라이닝과 록볼트의 앵커를 병용한 대구경 심초말뚝공법이 시공되게 되었는데 일종의 NATM공법이라고 할 수 있다. 그림-10은 그 예인데 흠막이를 위한 설계방법은 아직 확립되지 않았으며 현재 발전하고 있는 중이다. 상부구조의 대규모화를 위해 앞으로 채용사례가 늘어날 것으로 예상된다.

2) 굴착공법 등

심초공법은 인력굴착을 기본으로 출발하였으나 그 후 그램셀이나 트랙쇼벨류 굴착기계의 개량 및 소형화에 의해 굴착의 기계화도 진행되고 있다. 또 최근에는 심초공법의 모든 공정을 기계화 하려는 시험적인 공사가 고속도로 건설에서 진행중인데, 건설근로자의 감소에 대한 대책과 노동재해 방지 차원에서 기대되고 있다. 그림-11은 그 개념도이다.

4. 맺음말

심초공법의 현황과 그 기술적 과제에 관해 그간의 경험을 토대로 필자의 주관적인 견해를 기술하였다. 이 글중에서 특히 설계면에서

기술한 사항은 심초공법의 말뚝 뿐만 아니라 구조물 기초 전반에 관련된 것이며 또 나머지 해결해야 할 과제도 기술적으로 상당히 고도의 난제이다. 앞으로의 한계상태 설계의 도입을 위해 이러한 부분의 해결이 시급하다고 할 수 있다. **토목**