

해상 돌출형 말뚝기초의 허용 수평변위에 대한 고찰



신현강
(주)포스코건설 토목사업본부
토목기술그룹 과장
(geoth98@poscoenc.com)



한근택
(주)포스코건설 토목사업본부
토목기술그룹 부장
(bonanza@poscoenc.com)



김병국
(주)포스코건설 토목사업본부
토목기술그룹 대리
(bkkim98@poscoenc.com)



박사원
(주)에스코아이에스티 이사
(pingside@escoeng.com)

1. 서론

최근 들어 연도교 및 연륙교 건설을 위한 장대교량 계획이 증대되면서 대규모 하중을 견딜 수 있으면서 경제성을 고려한 말뚝기초계획이 수립되고 있다. 이러한 해상기초의 경우 현장 특성상 육상기초보다 시공효율성 및 안정성 분야에서 정위치 시공, 해상 돌출말뚝에 대한 안정성 및 품질확보 등 고려되어야 할 사항이 많이 발생한다.

특히, 지반공학적 측면에서는 하부구조인 말뚝기초의 연직 및 수평방향의 지지력과 변위에 대해 안정성을 확보하도록 국·내외의 각종 기준 및 시방서에서 규정하고 있다.

기초저면 하부에서 지지층 깊이까지 말뚝길이를 구성되는 육상구간 말뚝기초와 달리 해상구간 말뚝기초의 경우 수심과 지지층까지의 깊이가 말뚝길이가 되는 돌출형 말뚝기초이므로 말뚝의 주면지지를 위한 지반이 짧게 되

어 안정성 확보가 더욱 중요시 되고 있다. 또한, 해상 돌출 말뚝의 경우에는 지층조건에 따라 상이하겠지만 기반암이 일찍 출현하여 지지될 경우 수평하중 작용시 말뚝머리 부에서 큰 변위가 발생하여 구조물 전체의 안정성을 확보하기 곤란한 경우도 있다.

국내 실무에서 해상 돌출형 말뚝기초 설계시 간과되는 부분 중 하나는 국·내외에서 규정된 허용 수평변위의 적용개념과 기초 하부구조물만을 고려하는 고정관념이다. 이러한 부분은 설계시 기준서 등에서 규정하고 있는 적용수치는 그대로 적용하면서 규정된 문맥상에서 허용수치만을 인용하여 설계시 적용하면서 그 의미가 다소 퇴색되고 있는 이유이다.

따라서, 본 고에서는 국·내외에서 규정하고 있는 허용 수평변위의 기준값을 정리하고, 해상 돌출말뚝 안정 검토시 고려해야 할 사항과 수평변위 검토시 허용 기준값에서 규정하는 수평변위 발생위치 등에 대해 정리해 보고자 한다.

2. 수평변위 기준

말뚝기초에 대한 국내 기준이 정립되기 이전에 해외 기준이 국내로 도입되면서 실질적으로 해당 기준값이 나오게 된 의미보다는 단순히 각 기준서에 명기된 수치를 그대로 준수하도록 실무에 적용하면서 그 의미 또한 퇴색되고 있는 것으로 판단된다. 해외 참고 기준서의 내용은 대부분 이론식 혹은 실험을 통해 도출된 값을 비교, 검토하

면서 정립된 내용이며, 이러한 부분은 국내 지반 및 공사 여건 등이 상이한 부분을 어느정도 간과된 상태에서 보수적으로 도입되어 발생된 문제점인 것으로 판단된다.

따라서, 본 절에서는 국내·외 기준서의 내용을 그대로 인용하여 기관별 및 문헌 등에 나타난 허용 수평변위 기준을 정리해보고 문맥상 의미도 파악해보도록 한다.

2.1 국내 설계기준에 명시된 수평 변위 기준

표 1. 국내 수평 변위 기준

구 분	내 용
도로교 설계기준 해설 (하부구조 편) 2008.1	<ul style="list-style-type: none"> • 탄성체 기초의 경우에 과대한 기초의 수평변위량은 유해한 잔류변위의 원인이 된다. 이 때문에 설계상 기초의 안정성을 확보하는 의미에서 일반적인 탄성체 기초에서는 기초의 수평변위량을 탄성변위량 이내로 억제할 것을 원칙으로 한다. 즉 기초의 수평변위량을 탄성변위량 이내로 제한하는 의미로 규정하고 있는 것이 하부구조로부터 결정되는 허용변위량이며 다수의 재하시험 결과로부터 기초폭의 1%로 한다. 다만 기초폭이 5m를 넘는 대형탄성체기초의 허용변위량에 관해서는 재하시험 데이터가 적다는 것, 또 기초의 항복변위 영역을 쉽게 확인할 수 없다는 것 등과 같은 이유로 50mm를 한도로 하고 말뚝기초에서는 과거의 실적으로부터 안정성이 확인되어 있다고 생각되는 15mm를 최소값으로 한다. • 말뚝기초의 설계에서 허용변위량은, 5.5.3절의 (2)항에 규정되어 있는 바와 같이, 상부구조의 조건에 따라 정해지는 허용변위량과 하부구조의 조건에 따라 결정되는 허용변위량을 함께 고려해야 한다. • 하부구조의 조건에 따라 정해지는 허용변위량은 말뚝지름의 1%로 하는데, 지름이 1,500mm 이하인 말뚝은 이제까지의 실적을 고려하여 1.5cm로 한다. 다만, 편도압이 작용하는 경우 설계 지반면의 말뚝 지름이 크고 작용에 관계없이 평상시의 수평변위량을 1.5cm까지로 한다.
철도설계기준 (2004)	<ul style="list-style-type: none"> • 말뚝기초의 허용변위량은 상부구조의 조건에 따라 정해지는 허용변위량과 하부구조의 조건에 따라 결정되어지는 허용변위량을 모두 고려해야 한다. • 하부구조의 조건에 따라 정해지는 허용변위량은 말뚝지름의 1%로 하며, 지름이 1,500mm 이하인 말뚝의 허용변위량은 15mm로 한다. • 편도압이 작용하는 경우에는 설계 지반면의 말뚝지름에 관계없이 평상시의 수평변위량을 15mm까지로 억제하는 것이 좋다. • $1 < \beta < 2$인 케이스 기초에 대해서는 7.12의 규정에 따라 탄성계산을 하고, 수평 변위량에 대해서 검토한다. 이때 허용 변위량은 실제 설계 지반면에서 기초폭의 1% (최대 50mm)로 한다. • 편도압이 작용하는 교대에 $1 < \beta < 2$인 케이스 기초를 설계하는 경우에는 기초 폭에 관계없이 설계 지반면에서의 수평변위량을 평상시에 15mm로 억제하는 것이 좋다.
구조물 기초 설계기준 (2009)	<ul style="list-style-type: none"> • 말뚝머리의 수평방향 변위량이 상부구조에서 정해지는 허용변위량을 넘어서지 않는 조건을 만족 • 말뚝의 허용수평변위는 기초폭의 1%이며, 최소 15mm, 최대 50mm로 함
도로교 표준시방서 2000	<ul style="list-style-type: none"> • 기초의 수평방향 지반반력계수는 말뚝기초나 수평변위량의 검사를 필요로 하는 케이스 기초 및 강관널말뚝기초에서 환산재하폭 B_H를 $\sqrt{D/\beta}$에 의해 구한 후 해설식(5.5.22)를 사용하여 기준변위량에서의 탄성체 기초의 수평방향 지반반력계수를 산정하도록 하였다. 그런데 기준변위량은 탄성체 기초의 수평방향 지반반력계수를 산정할 때 기준이 되는 변위량이며, 기초 거동의 탄성한도에 있어 수평방향 지반반력계수를 산정하기위한 기준값으로 설정한 것이다. 기초의 기준변위량은 기초폭의 1% (≤ 50mm)로 한다.

표 1. 국내 수평 변위 기준(계속)

구 분	내 용
철도설계편람 (토목편) VI-콘크리트 하부구조 (2004)	• 탄성기초의 수평방향 지반반력계수를 산정할 때 기준이 되는 변위량은 기초폭의 1%(≤0.05m)로 한다.
	• 1(β) < 2인 케이스 기초에 대해서는 규정에 따라 탄성계산을 하고 수평변위량에 대해서 검토한다. 이때 허용변위량은 설계지반면에서 기초폭의 1%(≤0.05m)로 한다. 편토압이 작용하는 교대에 1(β) < 2인 케이스기초를 설치하는 경우에는 기초폭에 관계없이 설계지반면에서의 수평변위량을 평상시에 0.015m로 억제하는 것이 좋다.
	• (수평재하시험) → 시험방법의 해석은 극한하중이 판정되지 않은 경우 하중-변위량 곡선에 일반적인 변위량 기준 6.35mm(DM-7, 1982), 15mm(도로교 표준시방서, 1996)등을 적용하여 허용지지력을 구할 수 있지만 이것은 어디까지나 경험적이고 개략적인 분석방법임을 유념해야 한다. • (Chang방법에 의한 수평변위 검토결과) → 평상시, 지진시 15mm적용

2.2 국내 실무 문헌에 명기된 수평변위 기준

표 2. 국내 실무 문헌에 명기된 수평변위 기준

구 분	내 용											
제3권 도로설계요령 (교량) (2002)	<ul style="list-style-type: none"> • 말뚝머리 허용변위량은 상시때 말뚝직경의 1%, 또는 15mm중 큰 값을 적용한다. • 하부조건에 따라 정해지는 허용변위량은 말뚝지름의 1%로 하는데, 지름이 1,500mm이하인 말뚝은 이제까지의 실적을 고려하여 15mm로 한다. • 허용수평변위량으로서는 구조물의 안정상 상한을 규정하는 경우와 설계상에서 지반의 탄성한계영역을 규정하는 경우가 있다. 수평변위량에 대해서는 받침변위량으로 정하는 것이 이상적이지만, 계산의 간략화를 위하여 말뚝머리 변위에 의해서 규정하는 것이다. • 「지표면에서 깊이방향으로 지반의 소성화가 진행된다」고 하는 L.Menard의 이론을 적용한다. (프레셔미터 등에 의한 원지반 시험을 실시한 경우) 											
	<ul style="list-style-type: none"> • 소성화 영역 즉 지반반력이 허용 수평지지력을 넘는 부분의 수평저항을 무시하여 설계하면 안전측의 설계가 되나 대단히 비경제적이다. 실제로는 소성화 영역의 흙덩어리가 붕괴하지 않는 한 외력에 대해 저항력을 가진다고 생각되므로 극한지지력과 같은 방법으로 소성화 영역의 저항력을 구하는 것으로 했다. 											
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>구 분</th> <th>D < 5m</th> <th>D > 5m</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>상 시</td> <td>15mm</td> <td>30mm</td> </tr> <tr> <td>지진시</td> <td>25mm</td> <td>50mm</td> </tr> </tbody> </table>	구 분	D < 5m	D > 5m	상 시	15mm	30mm	지진시	25mm	50mm		
구 분	D < 5m	D > 5m										
상 시	15mm	30mm										
지진시	25mm	50mm										
실무자를 위한 구조물기초 설계실무편람	<ul style="list-style-type: none"> • 말뚝의 허용수평지지력은 말뚝재하시험시 말뚝의 허용수평변위량(상시:15mm, 지진시:25mm)에 대한 수평하중을 구하여 이것을 말뚝1개의 수평지지력으로 한다. 											
	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">구 분</th> <th colspan="2">수평변위량(mm)</th> </tr> <tr> <th>상시</th> <th>지진시</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>기준변위량</td> <td>10</td> <td>15</td> </tr> <tr> <td>허용변위량</td> <td>15</td> <td>25</td> </tr> </tbody> </table>	구 분	수평변위량(mm)		상시	지진시	기준변위량	10	15	허용변위량	15	25
	구 분		수평변위량(mm)									
상시		지진시										
기준변위량	10	15										
허용변위량	15	25										
최신 흙과 기초의 설계계산연습 (2005)	<ul style="list-style-type: none"> • 말뚝의 수평지지력에는 지반의 성질이 지배적인 역할을 다한다. 지반은 변형의 증대에 수반하여 소성화되며 더구나 토질에 따라서 달라진다. 또한 말뚝의 길이와 강성에 따라서는 지반전체가 소성화되거나 말뚝체의 파괴에 수반하여 생기는 소성형지등 또는 실제의 말뚝기초는 하나의 기초에 복수의 말뚝이 사용되기 때문에 고려되는 등 토질공학적 으로 복잡하다. 											

해상 돌출형 말뚝기초의 허용 수평변위에 대한 고찰

표 2. 국내 실무 문헌에 명기된 수평변위 기준(계속)

구 분	내 용
최신 흙과 기초의 설계계산연습 (2005)	<ul style="list-style-type: none"> • 대개의 말뚝 수평재하시험에서 밝힌 바와 같이 수평력이 작은 범위에서는 말뚝체는 탄성적 거동을 표시하며 지반반력도 지표면 부근을 제외하는 말뚝의 수평변위에 따른 지반반력이 생긴다. • 수평력이 커지면 지표면에서 발생된 지반의 소성영역은 아래쪽으로 확대되어 말뚝의 수평변위에 비례되지 않는 지반반력의 범위가 확대된다. 한편 말뚝에 생기는 휨 응력위치에서 소성힌지가 생기고 수평력이 거의 증가되지 않더라도 급격히 수평변위가 증가되어 극한상태에 이른다. • 그러나 말뚝길이가 짧고 말뚝체 내력이 크면 말뚝체의 파괴이전에 지반의 소성영역이 말뚝 전장에 생기는 수도 있다.
	<ul style="list-style-type: none"> • 변위에 관해서는 말뚝머리변위가 일정한 수치일때의 k_n값을 기준으로 임의의 말뚝머리 변위일때의 k_n값을 정하는 수가 많다. 기준의 말뚝변위로서는 1cm로 하는 방법이나 말뚝지름의 1%로 하는 방법이 있다.
	<ul style="list-style-type: none"> • 허용수평변위량으로서 상부구조에서 정하는 수평변위량과 하부구조에서 정하는 허용변위량이 있다. 전자는 상부구조가 부정정 구조물의 경우에는 기초의 변위량과 상부구조에서 생기는 응력도의 관계에서 정하는 값이며 또 정정구조물의 경우는 교각상단이나 발판자리 위치의 허용되는 변위량에서 정하는 값이다. 한편, 후자는 상부구조에서 변위량이 제한되지 않는 경우에 지반의 불확정요소를 고려하여 제한을 주기 때문에 설계지반면에 있어서 정한 값이다. • 허용변위량은 구조의 경우 지반이 현저한 소성변형이 생기지 않기 때문에 정해진 값으로 말뚝지름의 1% 하였다. 단 말뚝직경 1500mm이하의 말뚝에 대해서는 15mm로 하였다. 또 편토압이 작용하는 교대의 경우에 대해서는 말뚝 지름에 의하지 않고 평상시에 있어서 15mm로 하였다.

2.3 국외 수평변위 기준

가. 해외 기관별 설계기준

표 3. 해외 기관별 설계기준

구 분	내 용
AASHTO (미국 도로교통협회) (1996)	<ul style="list-style-type: none"> • 매입말뚝의 수평변위 기준은 연직변위와 수평변위를 결합시킬 수 있는 경우 수평변위를 25mm이하, 연직 변위가 작은 경우 수평변위는 50mm이하로 규정. • 예측 변위가 위의 규정을 초과하였다면, 정밀분석이 필요함
AASHTO (미국 도로교통협회) (2004)	<ul style="list-style-type: none"> • 말뚝의 수평변위는 Barker방법 또는 p-y해석 절차 적용 • 수평변위는 지반-말뚝 상호작용을 고려해야 함 • 말뚝의 수평변위는 선택된 허용수평변위 이내 • 수평방향 변위는 38mm 이내로 제한(Moulton et al, 1985)
일본 도로교 시방서	<ul style="list-style-type: none"> • 상시 : 15mm • 지진시 : 22.5mm
FHWA (미연방도로국)	<ul style="list-style-type: none"> • 상시 : 15mm • 지진시 : 25.0mm

나. 해외 수평변위 연구문헌

표 4. 해외 수평변위 연구문헌

구분	내용																		
Barker	• 각 교대의 변위가 51mm, 또는 그 이하, 다소 큰 변위도 가능																		
FHWA-TS-85-228 (1986)	• 사용성기준으로 교대의 수평변위를 1.5inch(38mm)로 제한 • 현장조사 결과를 바탕으로 구조물의 손상이 매우 작은 범위가 1in ~ 2in이므로 1.5inch(38mm)를 제안																		
NCHRP report 343 (1991)	• 수평변위는 제안자 및 조건에 따라 1.0in(25mm), 1.5in(38mm), 2.0in(51mm)로 나타났으며, 최종적으로 38mm(Moulton 등)를 제안함																		
	<table border="1"> <thead> <tr> <th>수평변위량(mm)</th> <th>판 단</th> <th>제안자</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>25</td> <td>not harmful</td> <td>Bozozuk(1978)</td> </tr> <tr> <td>38</td> <td>tolerable in most cases</td> <td>Moulton et al(1985)</td> </tr> <tr> <td>51</td> <td>structural distress</td> <td>Malkinshaw(1978)</td> </tr> <tr> <td>51</td> <td>harmful but tolerable</td> <td>Bozozuk(1978)</td> </tr> <tr> <td>51</td> <td>usually in tolerable</td> <td>Wahis(1990)</td> </tr> </tbody> </table>	수평변위량(mm)	판 단	제안자	25	not harmful	Bozozuk(1978)	38	tolerable in most cases	Moulton et al(1985)	51	structural distress	Malkinshaw(1978)	51	harmful but tolerable	Bozozuk(1978)	51	usually in tolerable	Wahis(1990)
	수평변위량(mm)	판 단	제안자																
	25	not harmful	Bozozuk(1978)																
	38	tolerable in most cases	Moulton et al(1985)																
	51	structural distress	Malkinshaw(1978)																
51	harmful but tolerable	Bozozuk(1978)																	
51	usually in tolerable	Wahis(1990)																	
Canadian Geotechnical Society (1992)	• 수평지지력은 3가지 조건에 의해 제한 • 그 중 말뚝 두부변위에 의해 상부 구조의 존립이 가능하여야 함																		
FHWA-IF-99-025 Drilled Shafts (1999)	• 교대의 수평변위는 연직변위보다 구조물 손상에 더 큰 영향을 미치며, 사용성 예측에 의해 38mm보다 작아야 함																		

다. 해외 기준을 반영하여 구조물기초 설계기준에 명기된 규정

표 5. 해외 기준을 반영하여 구조물기초 설계기준에 명기된 규정

구분	내용
AASHTO LRFD Bridge Design Specification(2007)	• 말뚝의 수평변위는 Barker방법 또는 p-y해석절차 적용 • 수평변위는 지반-말뚝 상호작용을 고려하여야 함 • 말뚝의 수평변위는 선택된 허용수평변위 이내 • 수평방향 변위는 38mm 이내로 제한
AASHTO Standard Specification for Highway Bridges (1996)	• 말뚝의 수평변위 기준은 연직변위와 수평변위를 결합시킬 수 있는 경우, 수평변위를 25mm이하, 연직변위 가 작은경우 수평변위는 50mm이하로 규정 • 예측변위가 위의 규정을 초과하였다면, 정밀분석이 필요함
Canadian Foundation Engineering Manual (1992)	• 수평지지력은 3가지 조건에 의해 제한 • 그 중 말뚝 두부변위에 의해 상부구조의 존립이 가능해야 함
FHWA-IF-99-025 Drilled Shafts (1999)	• 교대 수평변위는 연직변위보다 구조물 손상에 더 큰 영향을 미치며, 사용성 예측에 의해 38mm보다 작아 야 함

3. 국내·외 기준을 통해 알아본 설계기준 적용의 문제점

국내 설계기준이 미흡하던 초창기 시절, 해외 선진기술을 국내로 도입하면서 국내 실정에 맞도록 규정을 보완하기 보다는 해외 설계기준을 그대로 국내로 인용하였으며, 직접기초의 허용침하량의 경우 25mm 라는 기준은 해외 설계기준인 “1 inch(25.4mm)”라는 보수적인 허용 변위량 기준이 그대로 국내로 도입되어 CGS 단위계로 변환되어 사용되었다.

즉, 해외의 경우 허용 변위량을 해당국가에서의 표현할 수 있는 최소 수치인 1 inch로 보수적으로 규정하였으며, 이는 어떠한 시험이나 이론식에 근거한 수치가 아닌 말 그대로 최소 단위이며, 말뚝기초의 허용 수평변위 15mm 라는 기준 또한 단서조항이 “말뚝직경의 1%에 해당되는 변위”로 규정하고 있어 말뚝 직경에 대한 최소치의 기준임을 추정할 수 있다.

최근 들어 국내 설계기준들이 재정립되면서 이러한 부분을 대폭 보완하고는 있으나, 기존의 방식, 즉 기존 국외 사례를 예를 들어 보수적으로 적용하고 있는 현실이다.

하지만, 국내·외에서 발표되고 있는 논문이나 연구자료를 살펴보면 설계기준보다 더 큰 값을 허용변위로 규정하려는 노력을 하고 있으며, 특히 현장 재하시험이나 기존 계측사례를 통해 설계 기준치를 변경을 요구하는 논문들이 발표되고 있는 추세이다. 국내의 경우도 인천대교의 대규모 기초공사를 수행하면서 이론식 및 경험식을 통해

수행된 통상적인 설계가 아닌 현장재하시험을 통해 설계와 시공을 수행한 것으로 볼 때 앞으로 해외의 설계기준을 답습하여 적용되었던 보수적인 설계기준의 변경이 필요할 것으로 판단된다.

4. 말뚝기초의 수평변위 검토시 고려사항

4.1 설계지반면

국내 수평변위 허용기준이 명기된 기준서 중에서 “도로교 설계기준”과 “철도 설계기준”에는 말뚝의 수평 변위량은 설계지반면을 기준으로 허용변위량을 산정하도록 명기하고 있다.

표 6에 나타난 바와 같이 설계기준에서 명기된 설계지반면은 말뚝이 포함된 지반면의 최상부를 나타내며, 이때 장래의 지반변동(세굴 등을 고려한 성토부 혹은 굴착면)을 고려하여 최종적으로 위치되는 최상부면을 나타낸다. 따라서, 설계기준서에서 명시된 설계지반면을 육상과 해상구간을 구분하여 도식적으로 나타내면 그림 1과 같다.

그림 1에서 표현된 바와 같이 육상구간의 경우 말뚝이 지중에 위치하므로 설계지반면은 말뚝머리 부위가 될 것이고, 해상구간의 경우에는 돌출된 경우이므로 설계지반면은 수심하부의 말뚝주면부와 맞닿는 지반상부가 될 것이다.

표 6. 국내 설계기준에 기술된 설계 지반면 정의

도 서	내 용
도로교 설계기준 (하부구조편) (2008)	• 현 지반면에 대하여 장래 지반이 변하는 상태 등을 고려하여 정한 설계상의 지반면
철도 설계기준 (2004)	• 기초구조물의 설계지반면은 오랫동안 걸쳐서 안정된 지층으로 지지력을 기대할 수 있어야 하며, 다음사항을 고려하여 정하여야 한다. 확대기초의 저면은 기본적으로 설계지반면 아래에 위치시켜야 하며, 시가지나 하천 등에서는 필요로 하는 흙 두께로부터 그 위치가 정해지는 경우도 있다. 따라서, 얇은 기초나 말뚝기초에서는 장래의 지반변동이나 매립토의 시공성 등을 고려하여 확대기초 저면을 설계지반면으로 하는 경우가 많다.

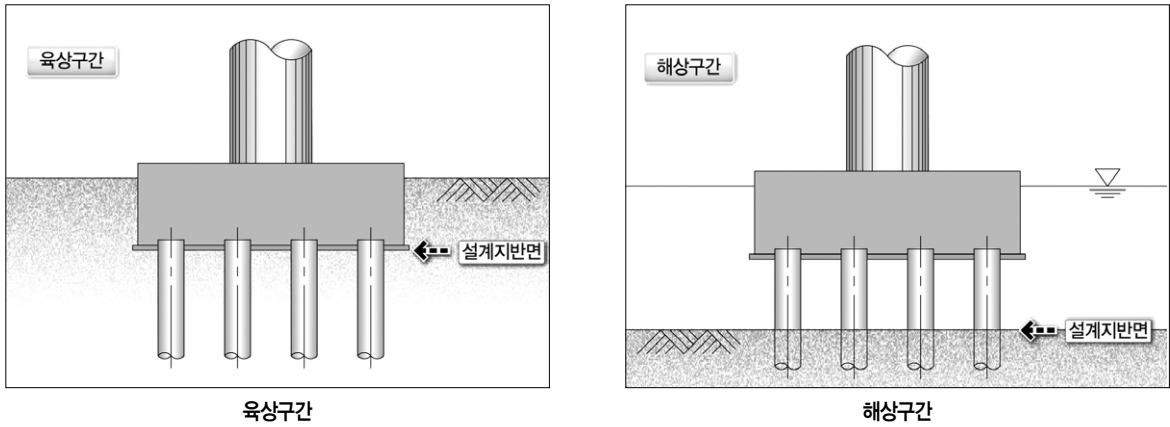


그림 1. 육상 및 해상구간 설계지반면

표 7. 말뚝기초 수평방향 안정성 검토 방법

검토 방법		검토 내용	
현장수평재하시험		• 설계단계 또는 시공단계에서 실제규모의 수평재하 시험을 수행하여 말뚝기초의 p-y (하중-변위) 관계를 평가하여 안정검토 수행	
해석적 검토	지지력	탄성지반반력법 (Chang 방법)	• 기초저면으로부터 1/β심도까지의 평균 수평지반반력계수를 적용하여 허용탄성변위를 기준으로 수평지지력을 역산하여 산정
		극한지반반력법 (Broms 방법)	• 말뚝에 작용하는 본당 최대수평반력에 대한 지반의 반력 특성 및 말뚝의 강성에 의한 지지력을 산정
	변위	선형탄성 해석법 (Chang 방법)	• 기초저면으로부터 1/β심도까지의 평균 수평지반반력계수를 적용하여 말뚝두부에 작용하는 하중에 의한 탄성변위 산정
		비선형 해석방법 (p-y Curve)	• 각 층의 응력-변형특성을 고려한 p-y 곡선을 작성하여 말뚝두부에 작용하는 하중에 의한 탄소성변위 산정

표 8. 말뚝 기초 수평변위 안정 검토 방법

구분	Chang의 방법	p-y곡선을 이용한 비선형 해석
개요도	<p>상부중 지지중 Stress Distribution Before Loading After Loading Chang Method</p>	<p>상부중 지지중 Stress Distribution Before Loading After Loading P-y Curve Method</p>
해석개요	<ul style="list-style-type: none"> • 단일층 해석 • 말뚝머리에서 발생한 수평방향 소성변형이 하부로 전달되는 것에 착안하여 말뚝이 근입된 상부지반 즉, 지반으로부터 1/β 범위의 영역에서의 지반특성을 이용하고 말뚝두부에 발생하는 탄성변위 산정 	<ul style="list-style-type: none"> • 복합층 해석 • 말뚝변위 증가에 의한 지반반력과의 관계는 비선형성을 보인다는 사실에 근거한 해석방법 • 임의의 깊이에서의 응력-변형특성을 고려한 p-y 곡선을 작성하여 말뚝두부에 발생하는 탄소성변위 산정

4.2 말뚝 기초의 수평방향 안정 검토

말뚝 기초의 수평방향 안정성 검토항목은 수평 지지력과 변위를 검토하여야 한다. 수평지지력의 경우 말뚝 머리 최대 수평력보다 허용 수평지지력이 상회할 때 안정한 것으로 평가하며, 이를 검토하는 방법으로 Broms법, Chang방법 등을 사용하고 있다.

수평변위 검토를 위해서는 허용 수평변위와 말뚝 머리 최대 수평변위를 산정후 말뚝의 안정성 검토를 하며, 이를 수행하는 방법으로는 Chang방법, p-y법(L-Pile), 군 말뚝 수평력 검토(Group-Pile) 등을 사용한다.

상기 해석법 중에서 단일층으로 해석되는 Chang의 방법을 적용할 경우 상부 지반에 연약한 토사층이 존재할 경우 과도한 변위가 발생하는 것으로 검토되곤 하므로 실제 암반에 근입된 말뚝이 상부지층보다는 말뚝의 강성에 의해 수평변위가 좌우되므로 복합층을 반영하여 해석할 수 있는 p-y곡선을 이용하는 비선형 해석을 수행하여 안정성 여부를 판단하곤 한다. 기타 해석방법으로는 수치해석적인 방법을 이용하기도 한다.

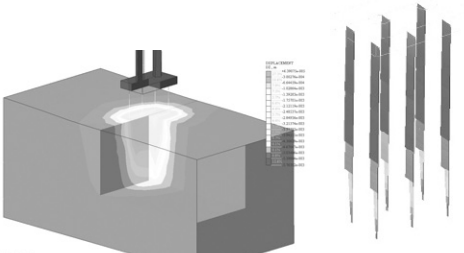
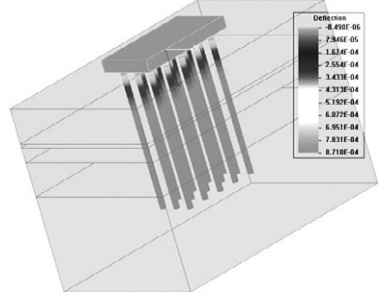
말뚝 수평변위의 국·내외 설계기준 및 각종 문헌, 연구자료를 정리, 분석한 결과 설계적용에 있어서 지나치게 각 기준의 수치만을 적용하여 그 수치가 지니고 있는 보수적 의미는 다소 퇴색된 것으로 판단된다.

지반공학적 측면에서의 말뚝기초의 허용 수평변위는 '도로교 설계기준' 및 '철도 설계기준' 을 참고할 때 말뚝 머리에서의 변위가 아닌 '설계지반면' 에서의 변위로 판단된다. 또한, 대다수의 말뚝기초는 육상구간에 설치되어 설계지반면이 지중에 있으므로 말뚝 허용수평변위를 말뚝머리로 보아도 무방하나 해상 돌출형 말뚝에 대해서는 말뚝머리가 아닌 말뚝의 변형으로 인한 설계지반면의 탄성영역 한계치 변위량으로 판단하는 것이 적절한 것으로 판단된다. 단, 모든 설계기준서에서 나타난 바와 같이 말뚝 자체의 수평변위만을 놓고 판단하는 것이 아니라 구조물 전체의 안정성을 확보하는 한도내에서 말뚝의 허용 수평변위량의 산정이 의미가 있는 것이므로 이는 반드시 상부구조물과 복합적인 검토를 통해 안정성 확보여부를 판단하여야 함을 인지하여야 한다.

말뚝의 안정성 검토를 수행하기 위해서는 수평변위를 산정할 수 있는 다양한 해석법의 주요 특성과 전제조건을 고려하여, 적절한 해석법을 통한 종합적인 분석이 뒷받침되어야 하며, 구조공학적 측면에서의 단면력 확보방안 등

5. 결론

표 9. 말뚝 기초 수평방향 안정성 검토 방법

구 분	수치해석 방법	군말뚝 해석
개요도		
해석개요	<ul style="list-style-type: none"> 다양한 지층을 모델링할 수 있고, 이를 구성방정식을 이용하여 응력-변형 특성을 고려하여 말뚝과 지반과의 상호 복합적인 요소를 고려하여 지반 및 말뚝에 대한 탄소성 해석을 수행 	<ul style="list-style-type: none"> 말뚝간의 간격이 충분히 이격되어 있지 않으면 하중재하시 간섭효과가 발생하여 단독말뚝의 경우보다 안정성이 저하되는 군말뚝효과에 대하여 검토하고 군말뚝 거동을 분석

도 반드시 검토되어야 할 것이다.

이러한 설계기준 검토를 통해 기준값 자체보다는 해당 기준값이 가지는 의미를 되새겨야 할 것이며, 지반공학적 측면에서 불균질한 지반조건의 문제와 설계시와 실제 시공시 조건이 상이한 경우가 대다수이므로 이를 고려하여 구조물 전체 안정성 확보를 위한 방안을 수립하여야 한다. 최근에는 해외에서 발표되고 있는 논문이나 연구자료를 살펴보면 보수적으로 적용되어 있는 설계기준을 변경하려는 노력을 하고 있으며, 현장 재하시험이나 기존 계측사례를 통해 설계 기준치를 변경을 요구하는 논문들이 발표되고 있는 추세이다. 국내의 경우도 인천대교의 대규모 기초공사를 이론식 및 경험식을 통한 설계가 아닌 현장재하시험을 통해 설계와 시공을 수행한 것으로 볼 때 앞으로 해외의 설계기준을 답습하여 적용되었던 보수적인 설계기준의 재정립이 필요할 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 건설교통부(2000), 도로교 표준시방서, (사)대한토목학회
2. 건설교통부(2004), 철도설계기준 철도교편, (사)대한토목학회
3. 건설교통부(2004), 철도설계편람 토목편, 콘크리트 하부구조, (사)대한토목학회
4. 국토해양부(2009), 구조물기초설계기준 해설, (사)한국지반공학회
5. 국토해양부(2008), 도로교 설계기준 해설 하부구조편, (사)대한토목학회
6. 전성기(1998), 실무자를 위한 구조물기초 설계실무편람, 도서출판 과학기술
7. 조천환(2006), 매입말뚝공법, 이엔지·북
8. 한국도로공사(2002), 도로설계요령 교량편, 한국도로공사
9. AASHTO(1996), "Standard Specifications for Highway Bridges", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
10. AASHTO(2007), "LRFD Bridge Design Specifications", American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
11. Canadian Geotechnical Society(1992), Foundation Engineering Manual.
12. FHWA(1999), "Drilled Shafts : Construction Procedures and Design Methods", Publication No. FHWA-IF-99-025