말뚝기초 설계 최적화 방안

제공처 : 한국도로공사 설계처

출처 : 2012년도 고속도로 설계 실무자료집(2013, 한국도로공사)

1. 일반현황

(1) 그간 구조물 설계 시 시공능력, 품질관리, 재료의 불균일성, 공사기간 등을 감안하여, 관행적으로 보수적 설계를 하고 있음.

(2) 그러나 현재 국내 토목 기술은 현수교 설계 · 시공 자체기술을 세계 6번째로 보유하는 등 비약적인 발전이 있었고, 과거 국가경제 발전을 위해 고속도로 조기개통을 독려하는 건설문화에서 현재는 환경, 안전, 품질 등을 중요시하는 선진국형 건설문화로 변화하고 있음.

(3) 따라서 이러한 시대 변화를 고려하여, 말뚝기초의 안전 신뢰도를 향상시키면서, 보다 경제적인 설계를 유도하고자 함.

2. 현황 및 문제점

2.1 말뚝기초 관련 그간 추진경위

(1) 2001. 10 : PHC말뚝의 적용성 분석[설계구13202-576]

(1.1) 선굴착공법 시공되는 교각, 가시설기초, 옹벽기초 등에 선별적 적용

(2) 2003. 8 : 강관말뚝 두부보강 신기술 적용방안 검토[건설기10308-73]

(3) 2007. 12 : 강관말뚝 선단보강밴드 두께 검토[설계처-3672]

(3.1) 선반보강두께 9mm 표준, 지반조건 등에 따른 손상 예상되는 경우 추가 검토

(4) 2009. 12 : 복합말뚝 설계적용 및 설계도서 표기방안 검토[설계처-6005]

(4.1) 말뚝에 작용하는 수평력 및 모멘트 만족, 경제성 확보시 복합말뚝 적용(매입)

2.2 말뚝기초 설계개요

말뚝기초는 말뚝본체와 지반지지력이 연계되고, 두 가지 조건 모두가 만족하도록 설계하고 있음.

(1) 말뚝본체

(1.1) $f_{max} \leq f_a$ (말뚝에 생기는 응력이 허용응력 이하가 되도록)

f_{max} : 말뚝의 최대발생응력, f_a : 말뚝의 허용응력

(2) 지반지지력

(2.1) $Q_u = Q_p + Q_s$ (선단지지력 + 주면마찰력) $\rightarrow$ $Q_a = \frac{Q_u}{F.S.}$

$Q_d \leq Q_a$ (설계지지력이 허용지지력 이하가 되도록)

Q_u : 말뚝의 극한지지력, Q_d : 말뚝의 설계지지력,

Q_a : 말뚝의 허용지지력, F.S. : 안전율(3)

2.3 여건 변화 및 현 실태

2.3.1 여건 변화

과 거		현 재
- 토목기술력 미미 : 현수교를 일본기술력으로 건설 ・남해대교(1973, 최초) - 1인당 국민소득 1,645달러(80년대) - 고속도로 공사기간 4년 - 원조수혜국(1995년까지) - 조기 개통을 장려하는 개발도상국형 건설문화	⟹	- 토목기술력 발전 : 현수교를 국내 자체기술력으로 건설 ・이순신대교(2012) - 1인당 국민소득 22,489달러(2011년) - 고속도로 공사기간 7~8년(2011년 이후) - 원조지원국(2009년 이후) - 환경, 안전, 품질 등을 우선시하는 선진국형 건설문화
※ 공기단축 등을 위해 말뚝기초의 조속한 시공 필요		※ 공사기간 연장에 따라 말뚝기초의 정밀 시공 가능

2.3.2 설계 및 시공 현 실태

2.3.2.1 최적설계에 대하여

(1) 말뚝본체 단면력을 최대한 활용하지 못하고 있음

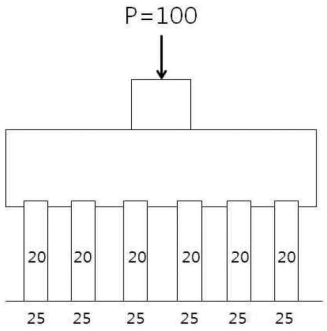
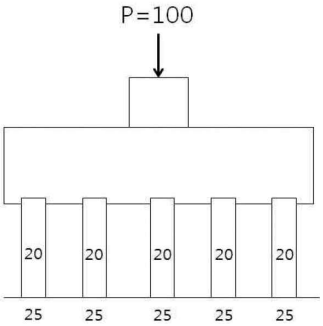
(1.1) 부산외곽순환선 기성말뚝 50개소 설계 조사 결과 말뚝본체 단면력을 90% 이상 활용하지 못한 사례 다수 발생(82%)

구 분	말뚝본체 효율	지반지지력 효율	비 고
90% 이상	9개소	11개소	※지반지지력 지배로 말뚝본체 단면력을 활용하지 못한 사례가 다수 발생(62%)
70~90%	19개소	26개소	
50~70%	19개소	10개소	
50% 미만	3개소	3개소	

(2) 효율적/비효율적 말뚝기초 설계 예

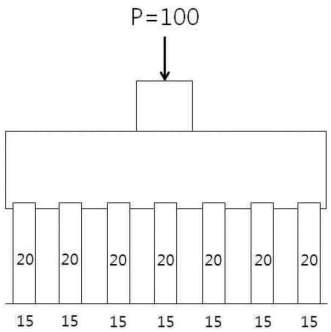
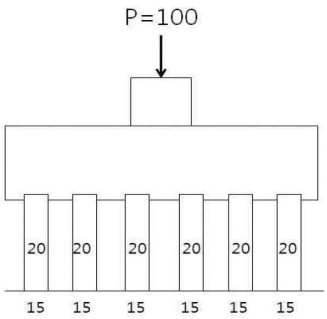
(2.1) 지반지지력 여유가 말뚝본체 여유보다 큰 경우

(2.1.1) 현 설계기준 내에서 말뚝기초 최적화 가능

현 설계	최적화 설계
	
말뚝본체 20×6개 = 120ton 지반지지력 25×6개 = 150ton	말뚝본체 20×5개 = 100ton 지반지지력 25×5개 = 125ton

(2.2) 지반지지력 여유가 말뚝본체 여유보다 작은 경우

(2.2.1) 현 설계기준 내에서 말뚝기초 최적화 불가능

현 설계	최적화 설계
	
말뚝본체 20×7개 = 140ton 지반지지력 15×7개 = 105ton	말뚝본체 20×6개 = 120ton 지반지지력 15×6개 = 90ton(N.G)

2.3.2.2 (설계 · 시공 연계에 대하여)

(1) (설계) 주면마찰력을 고려한 설계(시간경과 효과 고려)

(1.1) $Q_u = Q_p + Q_s$

Q_u : 말뚝의 극한지지력, Q_p : 말뚝의 선단지지력, Q_s : 말뚝의 주면마찰력

(2) (시공) 주면마찰력을 고려하지 못하는 평가(시간경과 효과 미흡)

(3) 동재하시험 중 초기동재하시험(E.O.I.D.)을 설계 반영하고, 시간 경과 후 Restrike재하시험은 설계 반영되지 않음

E.O.I.D(End of initial Driving)

- 초기항타라고 하며, 타격에 의해 말뚝에 발생하는 응력, 타격 시의 지지력 등을 측정하여 시공관리 기준을 정하는 시험
  (항타 후 시간 경과 없이 시행하는 시험)

Restrike재하시험

- 시간경과에 따른 주면마찰력의 증감, 지지력의 시간경과 효과 확인과 함께 말뚝의 허용 지지력을 산정하기 위해 실시하는 시험
  (Set-up효과 또는 Relaxation 효과 확인)

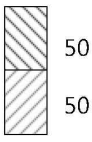
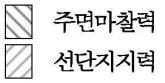
(4) 따라서, E.O.I.D 재하시험으로만 현장 관리하여, 시간경과 효과에 따른 말뚝의 최종 지지력 확인이 불가하므로, 지반을 과소 평가(과다 설계 가능성) 또는 과대 평가(지반 안전성 문제)함.

(5) 사업단 조사 실태

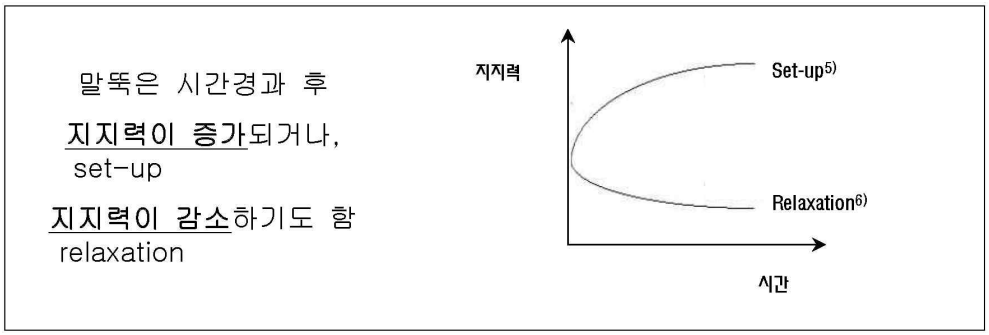
(5.1) 9개 사업단 811개소 조사결과 E.O.I.D 재하시험만으로 설계지지력에 만족하고 있음.

(5.1.1) 시간경과 효과 고려 시 높은 허용지지력 기대

<지반지지력의 설계, 시공(평가) 관계>

설계	시공(평가)		범례
	E.O.I.D.	Restrike	
			

<말뚝시공 후 시간경과에 따른 지지력 상승 · 감소>



(5.2) Set-up 효과 : 말뚝 항타 후 시간의 경과에 따른 말뚝 지지력 증가 효과로서 과거에는 점성토 지반에서 나타나고, 사질토 지반에서는 무관한 것으로 알려져 왔으나, 최근에는 사질토 지반에서도 지지력이 변화하는 것으로 확인되었음. 거의 대부분의 지반에서 나타남

(5.3) Relaxation : 말뚝 항타 후 시간의 경과에 따른 말뚝 지지력 감소 효과로서, 극히 일부 지층(Shale 과 Siltstone층)과 층리가 급한 암반, 말뚝간격이 좁은 무리말뚝 등에서 간혹 나타남.

2.3.2.3 안전율에 대하여

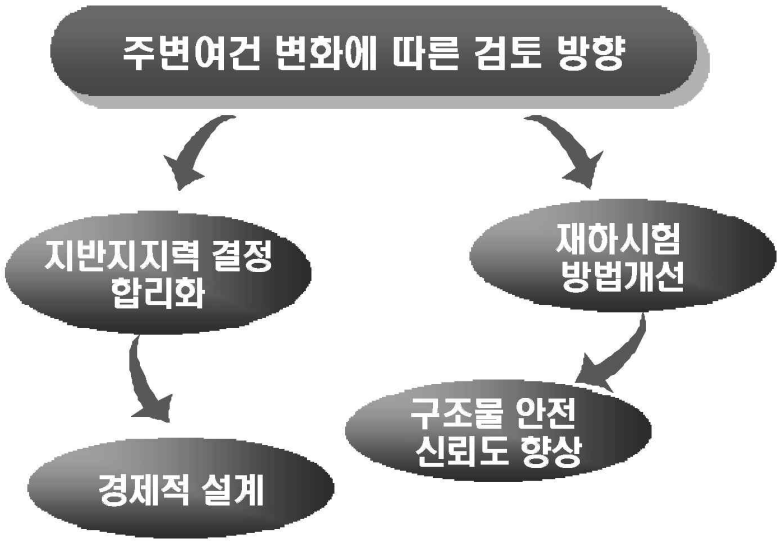
(1) 현 고속도로 설계 여건 상 말뚝 설계는 예비설계 단계로서 재하시험 등을 통한 지반 여건이 반영되는 설계가 아님.

<이상적인 말뚝기초 설계 절차>

예비(또는 추정) 설계 ※현 설계 단계	→	시험말뚝에 대한 검증시험	→	예비설계 수정 또는 재설계

(2) 따라서, 설계 단계(예비설계) 안전율(F.S.=3.0)은 의미있는 숫자가 아님에도 불구하고, 그 동안의 시공실적과 연계되지 못하고 Feedback 과정 없이 일률적으로 사용하여 왔음

3. 개선내용



3.1 합리적 허용지지력 산정을 위한 검토

3.1.1 허용지지력 산정을 위한 안전율 적용 기준 비교

$Q_a = Q_u/F.S.$(안전율)

(1) 국내 (구조물기초설계기준 해설 2009)

조 건	안전율
"지반조사 + 토질시험" → 정역학적 지지력 공식 이용	3이상
"지반조사 + 표준관입시험" → 정역학적 지지력 공식 이용	3이상
시험시공된 말뚝의 재하시험 결과 활용	
극한하중 조건	3
항복하중 조건	2

(1.1) 예외(P304) : 말뚝재하시험 횟수가 일반적 기준보다 많이 실시되었고, …… 지반공학 전문가의 판단을 얻어 안전율을 3.0보다 작게 적용 할 수도 있다.

(2) 미국 AASHTO Standard specification for highway bridges

시공관리 방안	시행여부				
지반조사	√	√	√	√	√
정역학적 지지력 공식	√	√	√	√	√
동적 지지력 공식	√				
파동 방정식		√	√	√	√
동적 분석 및 측정(PDA 등)			√		√
정재하시험				√	√
권장 안전율	3.5	2.75	2.25	2.0	1.9

(3) 미국 ASCE(American Society of Civil Engineers)

지지력 결정 방법에 따른 구분	축하중에 따른 권장 안전율			
	133kN 미만	133kN~ 356kN	356kN~ 889kN	889kN 이상
재하시험 + 파동방정식 + 정역학적 공식	1.5	1.5	1.6	1.8
동적 분석 + 파동방정식 + 정역학적 공식	1.5	1.6	1.7	2.0

(4) 캐나다(Canadian Foundation Engineering Mannual)

조 건	안전율
초기설계단계로 최종파일과 상이할 가능성이 높은 경우	2.5
최종설계로 추가적인 정보가 있는 경우	2.2
실제 파일에 대하여 추가적인 시험이 수행된 경우	2.0
확인시험(proofing test)가 진행된 경우	1.8

3.1.2 사업단 재하시험 결과

대 상	시험 갯수	시험방법	안전율	시험결과
9개 사업단	811	E.O.I.D	2.5	모든 대상이 설계 지지력 이상 도출
	27	정재하시험	2.0 이상	"

3.1.3 타기관의 허용지지력 산정 비교

(1) 허용지지력 산정은 타 기관과 비교 시 우리공사가 가장 작은 값(안전측)으로 산정함.

<허용지지력 산정비교(부산외곽순환선 하계교 P2)>

강관말뚝(508mm, 9t, L=9.7m) 풍화암 지지층의 본당 허용지지력(단위:kN)						
구분	선단 지지력	주면 마찰력	전체 지지력	안전율	허용 지지력	증 감
우리공사	1,995	768	2,763	3.0	921	
LH공사 말뚝기초 설계개선(안)	2,993	1,337	4,330	3.0	1,443	57% ↑
일본 건축기초구조 설계지침	2,394	1,671	4,065	3.0	1,355	47% ↑

3.1.4 적정 안전율 적용

(1) 국내 · 외 기준, 타 기관 허용지지력 산정방법, 사업단 재하시험 결과를 종합적으로 고려하여, 설계 시 안전율을 조정함

(당초) 3.0 → (개선) 2.5

(1.1) 타 기관의 허용지지력 공식 준용과 안전율 조정을 검토한 결과 안전율 조정이 보다 안전측으로 산정되므로, 향후 데이터 축적 전까지는 안전율 조정으로 설계 시 지반지지력 결정을 높이도록 유도함

(1.1.1) 타기관 사례 적용 : 현행 대비 지반지지력 50% 정도 증가

(1.1.2) 안전율 조정 적용 : 현행 대비 지반지지력 20% 증가

(2) 또한 말뚝본체 및 지반지지력 효율은 가급적 90% 이상이 되도록 설계함

<안전율 조정 및 효율 개선를 통한 설계 예>

당 초(F.S=3.0)	개 선(F.S=2.5)
말뚝본체 효율 : 54% 지반지지력 효율 : 82%	말뚝본체 효율 : 75% 지반지지력 효율 : 96%
· 강관말뚝 : 36본 = 6 × 6	· 강관말뚝 : 25본 = 5 × 5
151백만원	116백만원(감 35백만원)
- 단위공사비 : 강관말뚝(25만원/m), 말뚝길이 12m 가정 - 별첨 공사비 산출근거	

※ 대상조건 : 00-00간 고속도로 제0공구 00교 교각 P1(별첨)

3.2 시간경과 효과를 고려한 지지력 확인 방안

3.2.1 재하시험 현 기준

(1) 고속도로 전문시방서 및 도로공사표준시방서 : 기성말뚝 초기동재하시험(E.O.I.D.) 실시 빈도

구 분	시험빈도	시험말뚝 위치
행선별 기초(footing)별 말뚝본수 1~80본까지	2	대각선상이나 감독원이 지정하는 위치
행선별 기초(footing)별 말뚝본수 81~160본까지	3	
행선별 기초(footing)별 말뚝본수 161본 이상	4	

(2) 구조물기초설계기준 해설 2009

(2.1) 시공 중 동재하시험(E.O.I.D, End Of Initial Driving test) : 지반조건에 큰 변화가 없는 경우 전체 말뚝 개수의 1%이상(말뚝이 100개 미만인 경우에도 최소 1개)

(2.2) 재항타 동재하시험(Restrike test) : 시간경과효과 확인을 위하여 지반조건에 따라 시공 후 일정한 시간이 경과한 후 실시

(2.2.1) 빈도는 시공 중 동재하시험과 동일

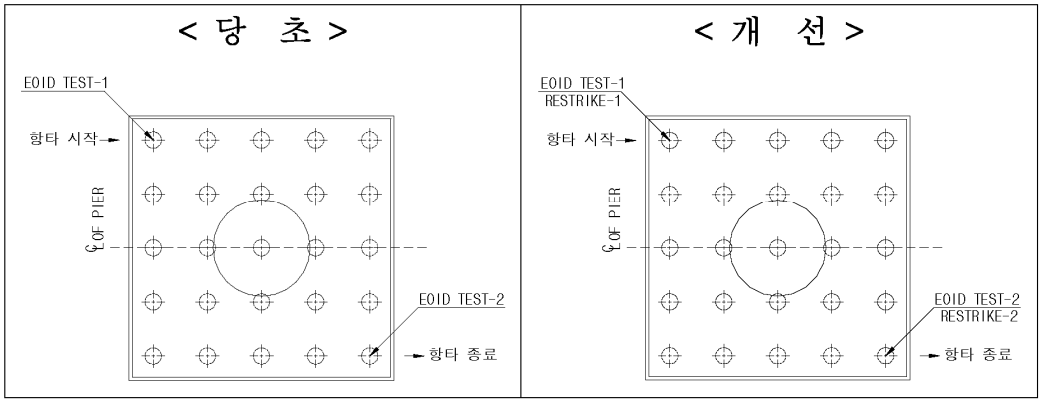
(2.2.2) 현재 우리공사에서는 고속도로전문시방서를 따르고 있음.

3.2.2 재하시험 개선방안

(1) 시간경과 효과를 고려한 Restrike재하시험 실시

(1.1) E.O.I.D.시험(현행) + Restrike시험(추가)

구 분	시험빈도		시험말뚝 위치
	당초	개선(안)	
행선별 기초(footing)별 말뚝본수 1~80본까지	E.O.I.D. 2회	E.O.I.D. 2회 Restrike 2회	대각선상이나 감독원이 지정하는 위치로서
행선별 기초(footing)별 말뚝본수 81~160본까지	E.O.I.D. 3회	E.O.I.D. 3 Restrike 3회	
행선별 기초(footing)별 말뚝본수 161본 이상	E.O.I.D. 4회	E.O.I.D. 4 Restrike 4회	



(2) 동재하시험의 신뢰도 향상 방안

(2.1) PDA의 검교정 의무화(검교정 주기 2년)

(2.2) Restrike재하시험의 중요성을 감안하여 시험결과 분석 · 확인, 관련 구조검토 등은 전문기술사(토질및기초, 토목구조 각각 1인)가 수행토록 함.

(2.3) 또한, 자료 축척 및 시험자 · 검토자의 책임감 부여를 위해 시험결과 및 시험자 · 검토자를 준공도서에 명기함

(2.4) Restrike재하시험 확인 · 분석 비용은 P.S 단가로 지정

(3) 말뚝기초의 장기 거동에 관한 연구 추진

(3.1) 2013년 연구과제 추진

(3.1.1) 새로운 말뚝지지력 공식 제안

3.3 말뚝시공 및 시험절차 개선

과 거	개 선
① E.O.I.D.시험 : 지지력 100% 이상 확보 확인 ② 나머지 말뚝 시공	① E.O.I.D.시험 : 지지력 80% 이상 확보 확인 ② 나머지 말뚝 시공 ③ 말뚝 시공 후 최소 7일 이상 경과 후 Restrike시험 : 지지력 100% 이상 확보 확인 ④ 지지력 미확보 시 추가시험(정재하 등)을 통한 지지력 확인 - 최종 지지력 확보가 곤란한 것으로 판단된 경우 지지력 향상 방안 검토 조치 (별첨 재하시험에 따른 말뚝기초 처리방안) ※ 말뚝기초 공사비 일부(5%)를 설계단계에서 추가 반영하고, 시공단계에서 말뚝관련 여건 변동에 따라 정산조치 (추가 재하시험, 공법변경 등)

4. 결론

4.1 적용

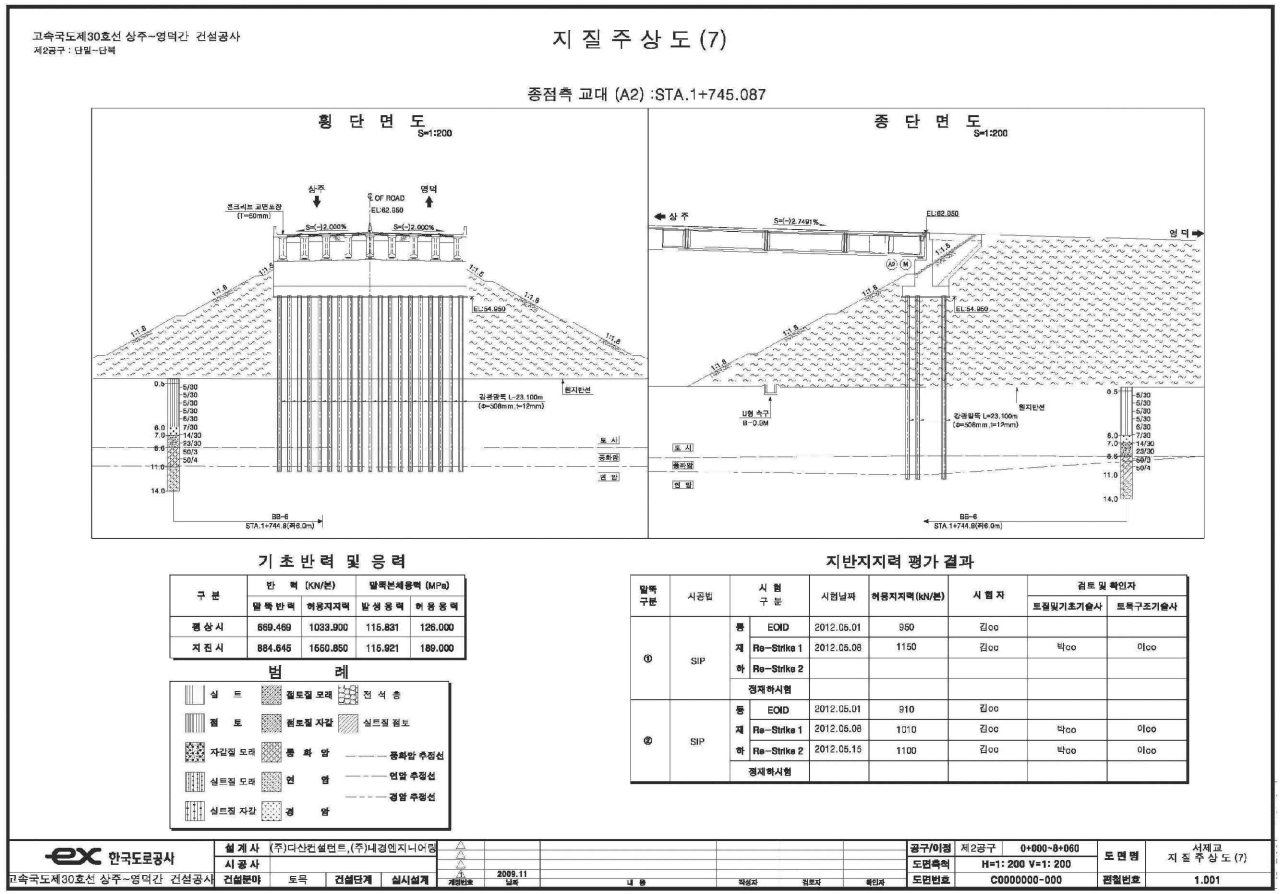
(1) 설계 중 노선 : 본 방침 적용

4.2 기대효과

(1) 구조물 안전의 신뢰도 향상
(2) 함양~울산 외 5개 노선 적용 시 공사비 절감(약 550억원)
(3) 말뚝기초 설계기술 향상 유도
(4) 건설현장의 새로운 일자리 창출

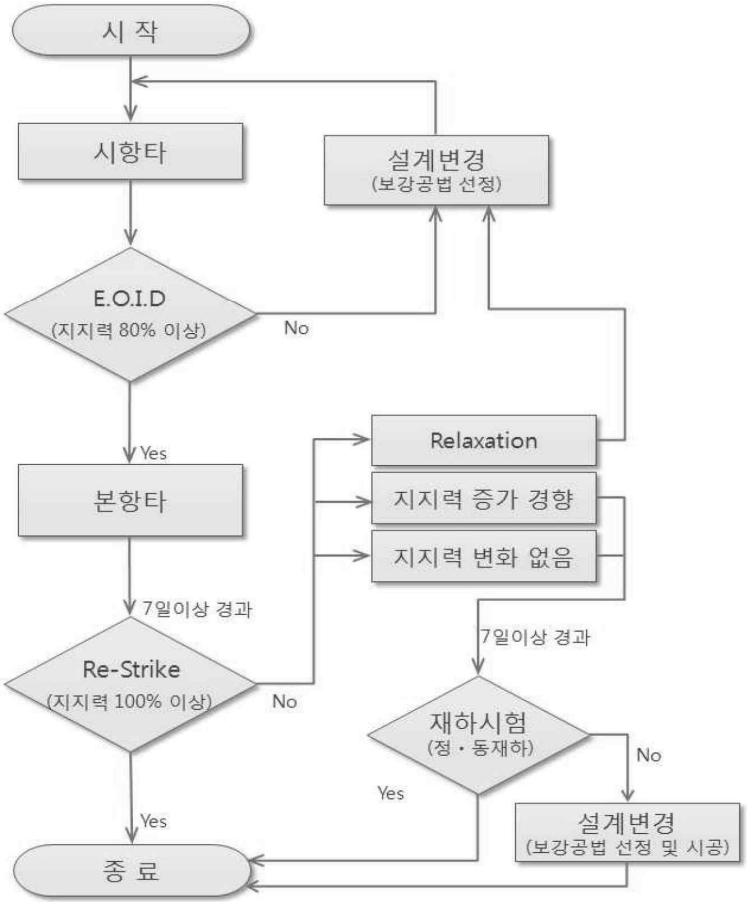
5. 기타

5.1 지질 주상도


고속국도제30호선 상주~영덕간 건설공사
제2공구 : 단일~단북
지 질 주 상 도 (7)
종점측 교대 (A2) :STA.1+745.087
횡 단 면 도
S=1:200
종 단 면 도
S=1:200
상주
영덕
C.L OF ROAD
EL:62.950
EL:54.950
기 초 반 력 및 응 력
구 분
반 력 (KN/본)
말뚝본체응력 (MPa)
말뚝반력
허용지지력
발생응력
허용응력
평 상 시
669.469
1033.900
115.831
126.000
지 진 시
884.645
1550.850
115.921
189.000
범 례
지반지지력 평가 결과
말뚝 구분
시공법
시 험 구 분
시험날짜
허용지지력(kN/본)
시 험 자
검토 및 확인자
토질및기초기술사
토목구조기술사
SIP
EOID
2012.05.01
950
김oo
Re-Strike 1
2012.05.08
1150
박oo
이oo
Re-Strike 2
2012.05.15
1100
정재하시험
910
1010
한국도로공사
(주)다산컨설턴트,(주)내경엔지니어링
고속국도제30호선 상주~영덕간 건설공사
건설분야
토목
건설단계
실시설계
2009.11
제2공구
0+000~8+060
H=1: 200 V=1: 200
C0000000-000
서제교
지 질 주 상 도 (7)
1.001

5.2 재하시험에 따른 말뚝기초 처리방안

(1) 흐름도



(2) Restrike재하시험의 허용지지력 판정은 Davisson(안전율 2.0) 판정법을 기본으로 하고 타 공식 등을 참고하여 결정할 수 있다.

(3) 추가시험(정재하 등)을 통한 지반지지력의 신뢰도 높이는 방안을 최우선으로 고려하며, 말뚝기초 보강공법은 가장 나중에 선택한다.