

대수심 대구경 현장타설말뚝의 지지력에 대한 신뢰성 해석을 이용한 허용응력 설계의 파괴확률 평가 연구

A Study on Estimation of Failure Probability of Allowable Stress Design using Reliability Analysis to the Bearing Capacity the Deep Water Depth Large-diameter Drilled Shaft

한 유 식¹⁾ · 이 윤 규²⁾ · 최 용 규[†]
Yushik Han · Yunkyu Lee · Yongkyu Choi

Received: January 16th, 2014; Revised: February 5th, 2014; Accepted: March 10th, 2014

ABSTRACT : A Large-diameter drilled shaft of deep water depth composite foundation supporting a high rise pylon of the test designed super long span bridge was designed by allowable stress design method and failure probability through reliability analysis to bearing capacity was estimated. The allowable stress design results for the bearing capacity of a drilled shaft were analyzed by reliability analysis and the probability of failure shows 0.12 % in case of CFEM, 0.0002 % in case of Korea Highway Corporation criterion, and 0.003 % in case of structure foundation design criterion. In the allowable stress design, the bearing capacity of a large-diameter drilled shaft was obtained by applying to safety factor 3 and reliability analysis for the results was done. If the failure probability suggested by AASHTO(2007) specification is set to 0.02 %, the socketed length of a drilled shaft shows an increase of 25 % in CFEM, decrease of 60 % in KHCC, and decrease of 89 % in SFDC.

Keywords : Drilled shaft, Composite foundation, Allowable stress design, Reliability analysis, Failure probability

요 지 : 시험 설계된 초장대 사장교의 고주탑을 지지하는 대수심 대형 복합기초의 지중 대구경 현장타설말뚝을 허용응력 설계법으로 설계하고, 지지력에 대한 신뢰성 해석을 통해 파괴확률을 평가하였다. 말뚝의 지지력에 대한 허용응력 설계 결과를 신뢰성 해석으로 분석하였으며 파괴확률은 CFEM의 경우 0.12 %, 한국도로공사기준 방법의 경우 0.0002 %, 구조물기초설계기준의 경우 0.003 %였다. 허용응력 설계에서는 안전율 3을 적용하여 대구경 현장타설말뚝의 허용지지력을 구하였으며, 그 결과에 대한 신뢰성 해석을 실시하였다. AASHTO(2007)에서 제시하고 있는 파괴확률(P_f) 0.02 %일 때 CFEM 방법에서는 근입 깊이가 25 % 만큼 증가하였으며 한국도로공사기준(KHCC)에서는 근입깊이를 60 %, 구조물기초설계기준(SFDC)에서는 근입 깊이를 89 % 만큼 감소시킬 수 있었다.

주요어 : 현장타설말뚝, 복합기초, 허용응력 설계, 신뢰성 해석, 파괴확률

1. 서 론

최근 토목공학의 여러 분야에서는 신뢰성 해석 기법을 이용한 설계법이 세계적인 추세이다. 1920년대 러시아의 Khotsialov와 Streletski에 의해 구조분야의 설계 기준으로서 파괴확률 개념이 적용된 이후 유럽을 중심으로 북미의 미국과 캐나다 등 선진국에서는 신뢰성에 기반을 둔 구조물 설계 기준에 관한 연구가 활발히 진행되었다(Fig. 1).

이런 추세에 발맞추어 국내의 지반공학 분야에서도 신뢰성 해석 기법을 적용한 연구가 많이 진행되고 있는 상태이다.

현재 국내의 지반공학에서 사용하고 있는 설계법은 허용

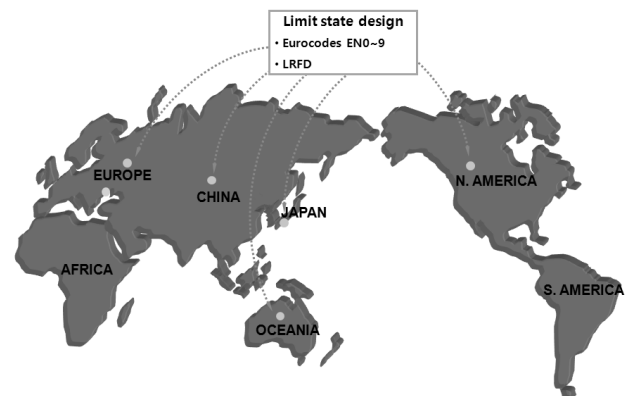


Fig. 1. Status of application of reliability analysis techniques

1) Department of Civil Engineering, Kyungshung University

2) R&D Team, Research Institute of Technology, TAEYOUNG E&C

† Department of Civil Engineering, Kyungshung University (Corresponding Author : ykchoi@ks.ac.kr)

응력 설계법이며, 이 설계법은 재료가 허용응력이라고 정의한 응력 범위 내의 상태에 있도록 설계하는 방법으로 지반 또는 재료의 극한강도에 경험적인 계수(안전율, FS)를 나누어 허용응력의 범위를 정한다. 허용응력 설계법의 경우 여러 가지의 설계변수(하중, 강도)와 관련된 불확실성들을 고려하지 않아 합리적인 설계를 할 수 없는 것으로 알려져 있다(KICT, 2008).

이 논문에서는 시험 설계된 초장대 사장교의 고주탑을 지지하는 대수심 대형 복합기초에 대해 허용응력 설계법으로 대구경 현장타설말뚝의 지지력을 산정하고, 지지력에 대한 신뢰성 해석을 통해 파괴확률을 평가하였다.

2. 초장대 사장교의 대상사례 및 현장조건 검토

이 논문에서는 초장대 교량의 상부구조에 대한 시험설계 자료(ENVICO & DM, 2008)를 활용하였다. 중앙경간장이 1.5 km를 상회하는 국내 유일의 현수교 교량인 광양대교를 대상 사례로 선정하였으며 여기에 초장대 사장교 교량을 설계하였다. 또한 대수심 대심도 대구경 현장타설말뚝 조건을 모사하기 위하여 인천대교 건설현장의 지반조건을 설정하였다. 기타의 가정들도 대수심 대심도 대형복합기초의 조건을 모사하기 위하여 설정되었다.

시험 설계된 초장대 사장교의 가상교량(Fig. 2 참조)은 중앙경간장이 1,545 m, 고주탑의 높이는 약 400 m였으며 기타 주요 제원은 여수산단 3공구지역에 건설된 광양대교의 제원을 참조하였다.

초장대 사장교 고주탑 복합기초의 허용응력 설계를 위해서는 상부구조의 하중규모 및 설치 대상 지역의 현장조건을 검토하여야 했는데 허용응력 설계 시 다음의 조건을 가정하여 설계에 적용하였다.

- (1) 초장대 사장교 고주탑부의 복합기초에 작용하는 설계 하중으로는 고정하중, 활하중, 풍하중, 온도하중에 대해

여 검토하였으며, 고주탑부의 복합기초 상부에 작용하는 하중은 Table 1과 같다.

- (2) 지반조건은 인천대교 현장의 서측 주탑부의 대표적인 지반조건과 동일한 것으로 가정하였으며 지반조건 및 복합기초의 특성치를 Table 2 및 Table 3에 각각 나타내었다.
- (3) 초장대 사장교 고주탑의 복합기초 설계 시 지중대구경 현장타설말뚝기초의 두부는 수중기초에 강결함 되었으며 수중부 기초하부는 지반과 접촉된 상태였다.
- (4) 대수심에서 세굴에 대해 안정성이 확보 되어야 하며, 세굴방지 대책으로는 연약지반을 사석으로 치환하는 공법을 사용하였다. 세굴에 대한 안정성 검토 시 사용한 사

Table 1. Loads applied to on the deep water depth composite foundation

Classification		Nx (kN)	My (kN·m)	Mz (kN·m)
Dead load		-749,266	-	288,734
Live load	Nx_max	666	-	37,533
	Nx_min	-61,745	-	-236,029
	My_max	-	-	-
	My_min	-	-	-
	Mz_max	-27,110	-	356,512
Wind load	Mz_min	-34,830	-	-544,717
	Nx_max	11,082	-	-679,099
	Nx_min	-10,879	-	682,873
	My_max	-8,838	2,891,233	-25,184
	My_min	-8,838	-2,891,233	-25,184
Temperature load	Mz_max	-10,879	-	682,873
	Mz_min	11,082	-	-679,099
	Nx_max	915	-	30,246
	Nx_min	-908	-	-29,805
	My_max	-	-	-
Temperature load	My_min	-	-	-
	Mz_max	915	-	30,246
	Mz_min	-908	-	-29,805

Remarks : N_x : Axial force
 M_y : Moment of throttle direction
 M_z : Moment of throttle perpendicular direction

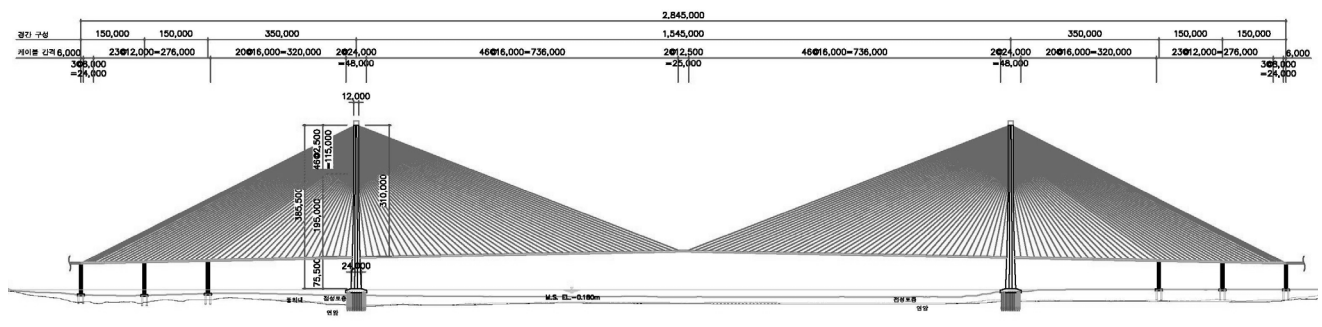


Fig. 2. The tested designed super long span bridge (ENVICO & DM, 2008)

석의 물성치를 Table 4에 나타내었다.

(5) 복합기초의 설치 수심은 50 m로 가정하였고, 파랑조건은 인천지역을 목표지역으로 가정하였다. 여기서 유의파고($H_{1/3}$)는 3.9 m, 주기(T)는 15.08 sec, 최대유속(V)은 0.8 m/s를 적용하였다. 파랑에 의한 설계파압은 고다에 의해 제안된 직립벽에 작용하는 파력공식(Goda, 1973)으로 산정하였으며, 유수압은 AASHTO(2007)에 의한 방법 및 도로교설계기준(KSCE, 2008)에 의한 방법으로 계산하여 이 중 큰 값을 채택하였다.

① 고다에 의해 제안된 직립벽에 작용하는 파력공식(Goda, 1973)

$$P_1 = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta)(\alpha_1 + \alpha_2 \cos^2 \beta)w_0 H_{\max} \quad (1)$$

$$P_2 = \frac{P_1}{\cosh(2\pi h/L)} \quad (2)$$

$$\alpha_1 = 0.6 + \frac{1}{2} \left\{ \frac{4\pi h/L}{\sinh(4\pi h/L)} \right\}^2 \quad (3)$$

$$\alpha_2 = \min \left\{ \frac{h-d}{3h} \times \frac{H_{\max}}{d}, \frac{2d}{H_{\max}} \right\} \quad (4)$$

여기서 P_1 : 정수면에서의 파압강도(kPa)
 P_2 : 해저면에서의 파압강도(kPa)
 w_0 : 해수의 단위중량(10.1 kN/m^3)

h : 수심(m)

L : 수심(h)에서의 설계계산에 쓰이는 파장(m)

② AASHTO(2007)에 의한 유수압 산정식

$$P = 5.14 \times 10^{-4} \times C_L \times V^2 \quad (5)$$

여기서 P : 유수압(MPa)

C_L : 항력계수(사각형일 때 1.4)

V : 접근유속(m/s)

③ 도로교설계기준(KSCE, 2008)에 의한 유수압 산정식

$$P = KV^2 w_0 \quad (6)$$

여기서 P : 유수압(kPa)

V : 접근유속(m/s)

w_0 : 해수의 단위중량(kN/m^3)

K : 저항계수(사각형일 때 0.07)

3. 고주탑을 지지하는 복합기초의 대구경 현장타설말뚝에 대한 허용응력 설계

3.1 하중조합

허용응력 설계법에서 구조물의 안정성 검토는 도로교설

Table 2. Properties of ground

NO	Classification	Thickness (m)	Elastic modulus (kPa)	Poisson's ratio	Unit weight (kN/m^3)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)
1	Sand	8.0	5,830	0.32	17.7	-	30
2	Clay	10.0	7,680	0.40	17.5	135	0
3	Weathered soil	4.0	48,230	0.30	18.1	-	34
4	Soft rock	78.0	1,300,000	0.26	22.6	100	35

Table 3. Properties of composite foundation

Classification	Elastic modulus (kPa)	Poisson's ratio	Unit weight (kN/m^3)	Diameter (m)
Raft	28,570,000	0.18	24.52	-
Drilled shafts	27,200,000	0.18	24.52	3.0

Table 4. Properties of gravel

Classification	Thickness (m)	Elastic modulus (kPa)	Poisson's ratio	Unit weight (kN/m^3)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)
Granular	4.0	34,000	0.35	20.0	-	39

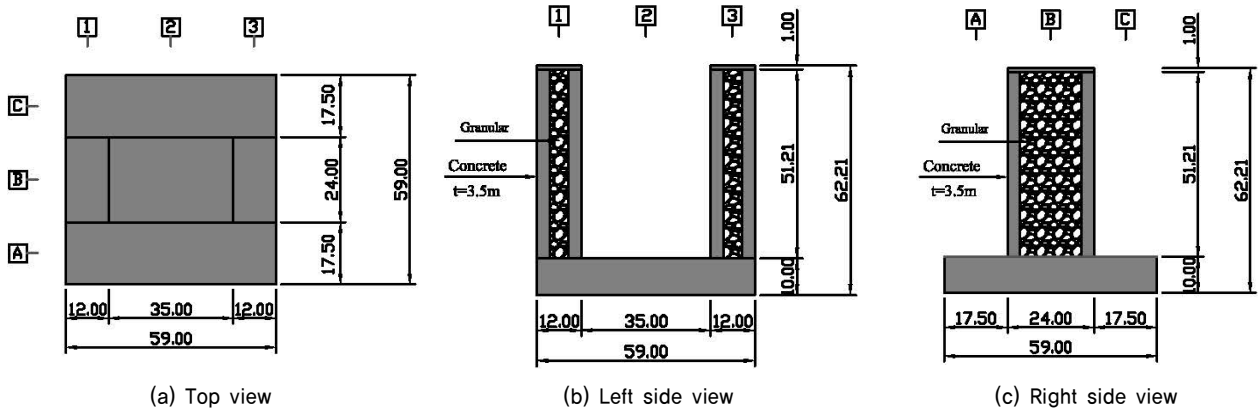


Fig. 3. Design of underwater foundation (unit : m)

Table 5. Load combination and load factor of geotechnical design (KSCE, 2008)

Case	Load combination	Load amplification factor
1	P + PP + T	1.15
2	P + PP + W	1.25
3	P + PP + T + W	1.35

계기준(KSCE, 2008)에 제시되어 있는 하중조합방법에 따라 검토하였다. 즉 기본 하중조합방법 및 증가계수를 고려한 하중조합방법으로 검토하였으며 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 하부기초의 부재나 단면은 이 하중조합방법에 의해 계산되는 가장 불리한 하중조건에 대하여 설계단면력 이상의 설계강도를 갖도록 설계하였다(KSCE, 2008). 여기서 주하중(P)은 고정하중(D), 활하중(L), 주하중에 해당하는 특수하중(PP)인 파압(WA), 유수압(S)을 적용하였으며 T는 온도변화의 영향으로 인한 하중, W는 풍하중을 적용하였다.

3.2 고주탑 복합기초 단면

고주탑을 지지하는 복합기초의 최적단면은 상부구조물의 안정성을 확보할 수 있는 범위에서 결정하였다.

말뚝은 장기간의 지속하중에 대하여 안전하게 하중을 받도록 배열하였으며, 군말뚝의 지지력이 각 말뚝의 지지력의 합보다 적지 않도록 말뚝을 배치하였다.

대구경 현장타설말뚝 중심간격은 말뚝직경의 2.5배로 하였으며, 수중기초 측면과 말뚝 중심 간 거리를 말뚝 직경의 1.1배로 결정하였고 대구경 현장타설말뚝을 8×8로 배열하여 수중기초 바닥 판 크기를 59 m×59 m로 정하였다. 대수심(50 m)에서 고파광으로부터 상부구조물(고주탑)의 경제적인 시공이 가능할 수 있도록 하기 위하여 천단고는 유의파고의 60%로 선정하였으며(Korea Ports & Harbours Association, 2004) 따라서 복합기초의 높이를 62.21 m로 적용하였다. 고

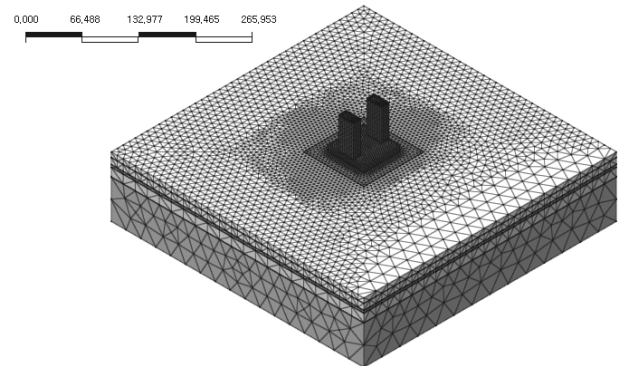


Fig. 4. 3-D finite element meshes for analysis

주탑을 지지하는 대수심 대형 복합기초의 단면을 Fig. 3에 나타내었다.

3.3 대수심 대형 복합기초의 유한요소 해석

Midas GTS(Midas GTS, 2011a; 2011b)에서는 지반해석 시 고체요소를 사용하여 지반의 형상과 시공 상황을 최대한 반영할 수 있도록 모델링이 가능하며 재료의 다양한 비선형성, 이방성 및 원지반 응력 상태를 고려할 수 있다.

지반의 구성모델은 탄성 영역에서 선형탄성 모델을 적용하였고, 소성 항복영역에서는 Mohr-Coulomb 모델을 적용하였으며 말뚝은 인장 및 압축, 전단, 굽힘, 비틀림 등의 거동에 대한 강성을 갖도록 하여 직경 3 m의 단면을 가지는 빔 요소로 분할하여 선형탄성 모델을 적용하였다.

해석 시 거동변화가 큰 영역, 즉 구조물 영역 및 그 인접 지반 영역에서는 요소를 세분화하여 요소의 크기를 다르게 분할하였으며 요소의 수를 결정하였다. 유한 요소망의 요소 수는 74,556개, 절점 수는 15,513개로 구성하였다(Fig. 4 참조).

지반 모델에서는 원래 반 무한체인 해석영역을 복합기초 주변으로 한정시키기 때문에 복합기초 시공으로 인한 변위나 응력의 변화가 거의 없는 위치에서 해석경계를 정의하였

다(Prakoso & Kulhawy, 2001)(Fig. 4 참조). 지반 전체요소의 회전이나 이동과 같은 거동이 일어나지 않도록 하였다. 좌우경계에 위치한 절점에 대해서 X, Y 방향 자유도를 구

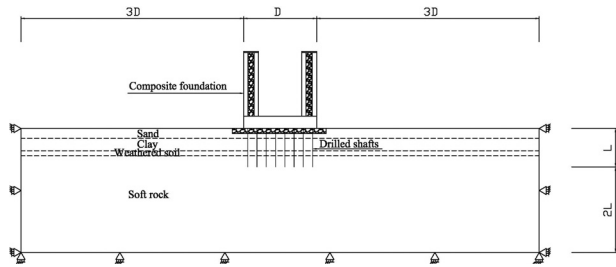
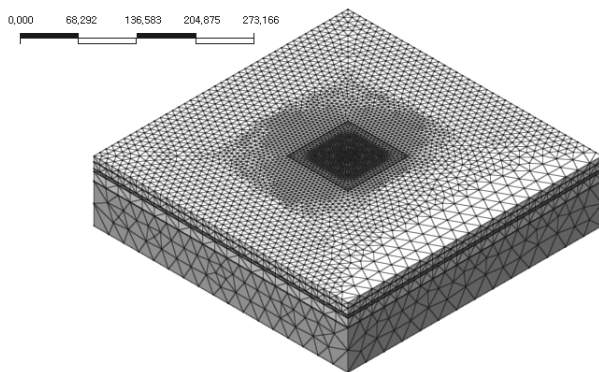
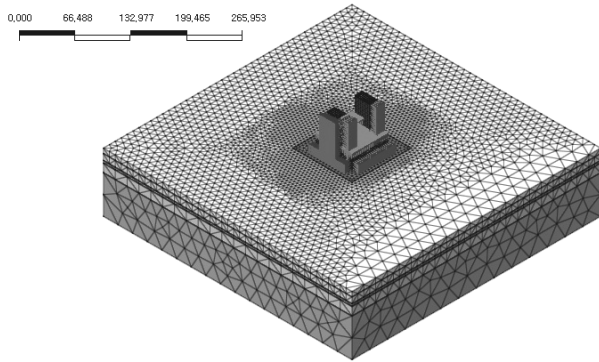


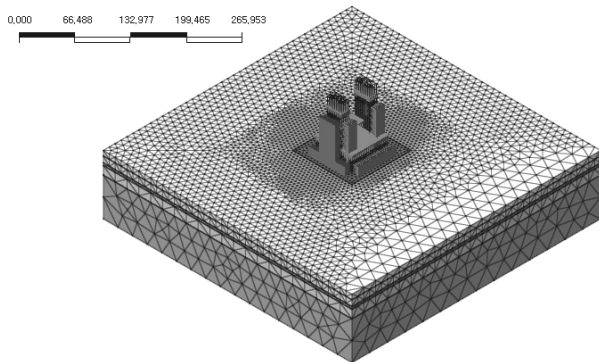
Fig. 5. Far-field boundaries



(a) Step 1. Ground modeling



(b) Step 2. Construction of structure



(c) Step 3. Loading

Fig. 6. Procedures of analysis

속하였고, 바닥경계에 위치한 절점에 대해서는 Z 방향 자유도를 구속하였으며 말뚝 두부에서는 Z 방향의 회전에 대하여 자유도를 구속하였는데 이를 통하여 말뚝 두부의 구속조건을 모사하는 것으로 하였다(Fig. 5 참조).

지반에 대한 해석은 보통 비선형해석이며, 비선형 특성은 지반 내부에 존재하는 초기조건으로부터 얻을 수 있었다. 초기조건은 현재 계획 중인 시공에 앞서 현장에 존재하는 응력 조건을 의미한다. 이 연구에서는 원지반 조건(초기 조건)에서 순차적으로 전 시공과정을 포함하여 해석을 수행하도록 하였다. 현장의 시공단계는 매우 복잡하고 가변적이기 때문에 해석에서는 이를 단순화 하여 비중이 큰 시공단계를 중심으로 해석을 수행하였으며, 시공단계를 Fig. 6과 같이 정의하였다.

시공단계 해석은 3단계로 구분하였는데 시공단계별로 앞 단계의 해석결과에 누적하여 해석을 수행하는 누적 모델 개념을 사용하였다. 단계 2에서 발생한 복합기초 시공에 의한 변화 및 하중이력이 단계 3의 해석 결과에 영향을 미치게 하였다. 이러한 시공단계별 해석을 통해 하중조합 중 가장 불리한 하중조건(Case 3의 N_x_min)에서 말뚝 두부에 작용하는 최대축력(L)은 118,820 kN이었다.

3.4 대구경 현장타설말뚝의 허용응력 설계 검토

대구경 현장타설 콘크리트말뚝의 극한지지력은 Table 6에 제시된 3가지 방법으로 산정하였으며 각각 단위면적당 선단지지력과 주변마찰력을 추정하여 산정하였다.

3가지 방법을 이용하여 직경 3 m의 대구경 현장타설말뚝의 근입깊이에 따른 극한지지력을 산정하기 위해 기반암(연암)층의 일축압축강도 및 RQD값은 인천대교 연결도로 구간(Fig. 8)의 평균 일축압축강도, 평균 RQD값을 사용하였다. 산정된 극한지지력에 안전율 3을 적용하여 허용지지력을 산정하였으며 Table 7에 나타내었다.

유한요소해석으로 산정한 대구경 현장타설말뚝 두부에 작용하는 하중은 118,820 kN이었으며, Table 7에 나타낸 극한지지력으로부터 대구경 현장타설말뚝의 허용지지력 산정 결과 지지력은 캐나다기초공학매뉴얼(CGS, 2006) 방법에서는 근입깊이 8 m, 한국도로공사기준(KHC, 2002) 방법에서는 근입깊이 15 m, 구조물기초설계기준(KGS, 2009) 방법에서는 근입깊이 27 m에서 만족되는 것으로 나타났다.

3가지 지지력 산정방법에서 구조물기초설계기준이 가장 보수적인 방법으로 나타났으며, 캐나다기초공학매뉴얼 방법에 비해 약 3배 정도 차이가 나는 것을 알 수 있었다.

Table 6. Ultimate bearing capacity equations of drilled shafts in rock

Classification	Ultimate end bearing capacity	Ultimate shaft resistance	
Canadian Foundation Engineering Manual (CGS, 2006)	$q_p = 3 \times q_u \times K_{sp} \times d \times A_p$	$q_s = \pi \times b_s \times L_s \times f_s$ $(q_u) \leq (\sigma_c) : \frac{f_s}{P_a} = b \times \left(\frac{q_u}{P_a}\right)^{0.5}$ $(q_u) > (\sigma_c) : f_s = 0.05\sigma_c$	
Korea Highway Corporation Criteria (KHC, 2002)	Peck et al. (1974) $q_p = q_u \times A_p$		Canadian Foundation Engineering Manual (CGS, 2006) $q_s = \pi \times b_s \times L_s \times f_s$
	RQD	Allowable bearing capacity (q_u, kPa)	
	90~100	21,520~32,280	
	75~90	12,910~21,520	
	50~75	6,990~12,910	
	25~50	3,230~6,990	
0~25	1,080~3,230		
Structural Foundation Design Criteria (KGS, 2009)	$q_p = 3 \times \left(\frac{1}{5} \sim \frac{1}{8}\right) \times q_u \times A_p$	NAVFAC (1986) $q_s = (f_s \times \pi \times b_s \times L_s)$ $f_s = (6.0 \sim 7.9) \sqrt{f'_w} \quad (b_s > 0.4 \text{ m})$ $f_s = (7.9 \sim 10.5) \sqrt{f'_w} \quad (b_s < 0.4 \text{ m})$	
Note	q_p : Ultimate end bearing capacity (kN), q_s : Ultimate shaft resistance(kN) q_u : Unconfined compressive strength of rock (kPa), σ_c : Unconfined compressive strength of concrete (kPa) b_s : socket diameter (m), A_p : socket area (m ²), P_a : atmospheric pressure (101.3 kPa) f'_w : uniaxial compressive strength of weak material (rock or concrete) L_s : depth of the drilled shaft socket measured from the top of the rock surface (not from the ground surface) (m) K_{sp} : dimensionless bearing capacity factor based on geomaterial jointing characteristics, given by (0.1~0.4) d : depth factor $d = 1 + 0.4(L_s/b_s \leq 3)$, b : roughness factor (rough : 1.9, normal : 1.41, smooth : 0.63)		

Table 7. The calculated allowable bearing capacity of 3 m-diameter drilled shaft

L_s (m)	Method	Ultimate end bearing capacity (kN)	Ultimate shaft resistance (kN)	Allowable bearing capacity (kN)
8	CFEM	213,950	147,533	120,494
	KHCC	83,404		76,979
	SFDC	80,629		54,272
15	CFEM	302,359	276,624	192,995
	KHCC	83,404		120,010
	SFDC	80,629		78,244
27	CFEM	302,359	497,924	266,761
	KHCC	83,404		193,776
	SFDC	80,629		119,337

4. 대구경 현장타설말뚝의 허용응력 설계법에 대한 파괴확률 산정

4.1 신뢰성 해석 및 Monte-Carlo 추출법 개요

신뢰성 해석법은 설계변수의 확률분포 고려방법과 신뢰함수의 확률분포 산정 및 이용방법에 따라 다양하게 구분될 수 있으며 확률적 개념을 얼마나 엄밀하게 반영하는지에 따라 레벨 I, 레벨 II 그리고 레벨 III으로 구분할 수 있다.

레벨 I 방법은 가장 하위적인 신뢰성 해석방법으로 설계변수의 확률분포를 반영하기보다는 설계변수의 공칭값(대표 값)에 부분안전율을 적용하여 설계변수를 결정하거나 혹은 하중함수와 저항함수에 각각 하중계수와 저항계수를 적용하여 안정성을 평가하는 방법이다.

레벨 II 방법은 중간 정도의 신뢰성 해석방법으로 설계변수의 실제 확률분포를 적용하기보다는 정규분포와 같은 임의의 확률분포를 따르는 것으로 가정하여 파괴확률을 산정해 내는 방법이다.

레벨 III 방법은 가장 엄밀한 신뢰성 해석방법으로 설계변수의 실제 확률분포를 신뢰함수에 적용함으로써 여러 확률변수들의 상호작용을 엄밀하게 고려하여 파괴확률을 정확하게 산정해내는 방법이다.

이중 레벨 III 방법은 확률변수에 대한 정확한 확률특성을 기초로 하여 분석하므로 가장 정확하고 신뢰할 수 있는 결과를 획득 가능한 방법으로 알려져 있다.

이 논문에서는 레벨 III 방법을 이용하였으며 매트랩 프로그램으로 신뢰성 해석을 실시하였다. 레벨 III 방법에서 파괴확률 산정을 위해 가장 많이 이용되고 있는 방법이 MCS (Monte-Carlo Simulation)이다.

MSC는 균등분포를 가질 수 있도록 일정한 난수 N개를 발생시켜 이 난수를 한계상태식에 대입하여 한계상태식이

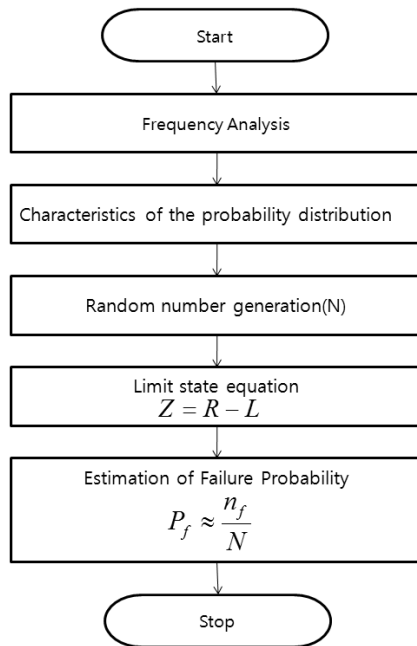


Fig. 7. Flowchart for estimation of failure probability

0보다 작은 경우를 n_f 번 관측한 후 파괴확률(P_f)을 상대적으로 정확하게 추정할 수 있는 방법이다. 파괴확률을 산정하는 과정을 정리하면 Fig. 7과 같다.

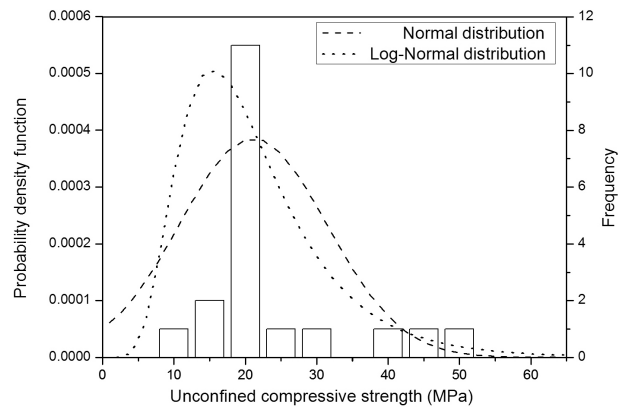
파괴확률을 산정하기 위하여 Fig. 7의 순서에 의해 매트랩 프로그램을 이용하여 코딩하였으며, 균등분포를 가질 수 있도록 randn 함수를 이용하여 N개의 난수를 생성할 수 있었다. 이와 같이 MCS는 기본 개념이 단순할 뿐만 아니라 한계상태식에 대해 어떠한 변형도 가하지 않고 원래의 형태를 그대로 보존하여 파괴확률을 구할 수 있다는 장점이 있으며, 특히 한계상태식이 확률변수의 수학적함수로 명백한 형태로 주어지지 않은 경우에도 파괴 여부에 대한 판단을 내릴 수만 있다면 쉽게 이용할 수 있다. 그러나 한계상태식으로 추정한 파괴확률의 정확성을 보장하기 위해서는 전체 추출횟수 N의 값이 충분히 클 필요가 있으며, 특히 파괴확률이 적을수록 파괴된 경우의 수가 작게 되므로 동일한 수준의 정확성을 위해서는 전체 추출횟수 N의 크기가 대단히 중요하게 된다. 이론적으로는 N의 값이 무한대이어야 추정된 파괴확률이 정확하다고 할 수 있으나, 이는 현실적으로 불가능하므로 적절한 범위 안에서 전체 추출횟수 N의 크기를 결정하는 것이 MCS의 정확성과 효율성을 결정하는 중요한 변수가 된다(Yang et al., 2006).

4.2 신뢰성 해석을 위한 기초자료 분석

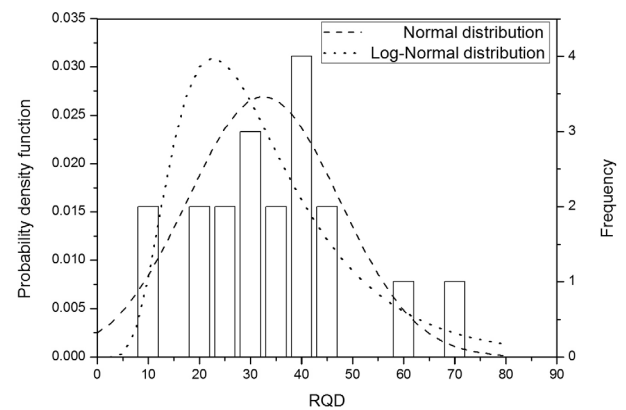
대구경 현장타설말뚝의 정역학적 극한지지력 공식의 확률변수인 일축압축강도 및 RQD에 대한 통계적 특성치를 산정하기 위해서 서해안 지역의 인천대교 연결도로의 구간



Fig. 8. Site investigation of west coast location



(a) Unconfined compressive strength



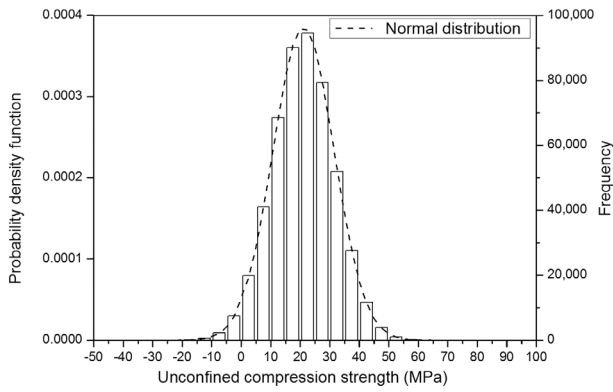
(b) RQD

Fig. 9. Probability density function of strength from soft rock of in some areas of west coast

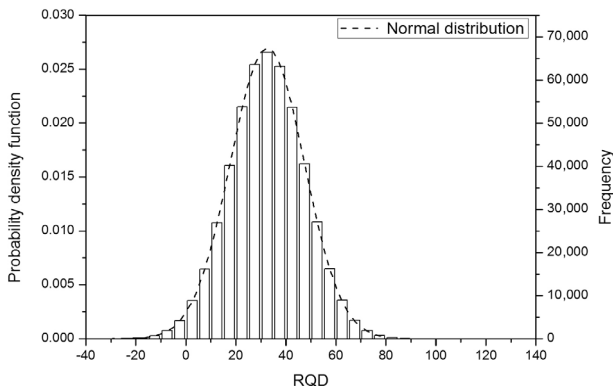
(Fig. 8 참조)에 대한 지반조사 자료를 분석하였다.

시추조사는 인천대교 연결도로 노선의 진행방향을 따라 실시되었다. 동일한 현장의 지반을 대상으로 하였으며 일정한 심도 범위(22~40 m)의 기반암(연암)층을 대상으로 19개의 데이터를 선정하여 통계 분석하였고, 그 결과를 Fig. 9에 나타내었다.

인천대교 연결도로 구간의 기반암층에 대한 일축압축강도 및 RQD를 분석하였다. 일축압축강도의 평균(μ_x)은 21,065 kPa, 표준편차(σ_x)는 10,346이었으며 RQD의 평균(μ_x)은 32.5, 표준편차(σ_x)는 14.8이었다. 또한 대수분포의 일축압축강



(a) Unconfined compressive strength



(b) RQD

Fig. 10. A random variable having normal distribution characteristics

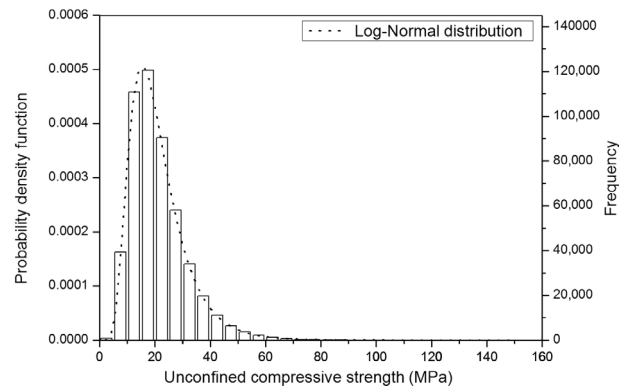
도의 평균($\mu_{\ln X}$)은 9.854, 표준편차($\sigma_{\ln X}$)는 0.459였으며 RQD의 평균($\mu_{\ln X}$)은 3.374, 표준편차($\sigma_{\ln X}$)는 0.503이었다.

4.3 대구경 현장타설말뚝의 파괴확률 산정

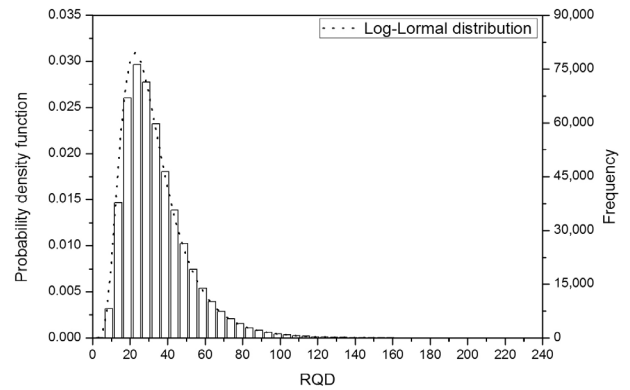
기초자료(일축압축강도와 RQD)를 통해 통계 분석된 정보를 매트랩 프로그램의 randn 함수를 이용하여 N개의 난수를 생성하였다. 여기서 교량의 설계수명 75년에 대하여 AASHTO(2007)에서 제안하고 있는 목표파괴확률 0.02 %에 대해서 파괴확률의 역수의 100배인 500,000개를 추출 횟수로 하였다. 500,000개의 새롭게 생성된 데이터의 확률변수는 정규분포로 나타낼 수 있었으며, 정규분포에 따른 MCS 확률분포를 Fig. 10에 나타내었다.

Fig. 10에서 알 수 있듯이 동일 현장에서 조사된 일축압축강도와 RQD는 분산 정도가 커 정규분포 형태를 가지는 N개의 난수 발생에서는 음의 값을 가져 신뢰성 해석을 통한 정확한 파괴확률을 산정할 수 없었다. 따라서 확률변수가 양의 값을 가지도록 대수정규분포를 가지는 난수 500,000개를 새롭게 생성하였으며 그에 따른 MCS 확률분포를 Fig. 11에 나타내었다.

대수정규분포에 의하여 새롭게 생성된 500,000개의 확률



(a) Unconfined compressive strength



(b) RQD

Fig. 11. A random variable having log-normal distribution characteristics

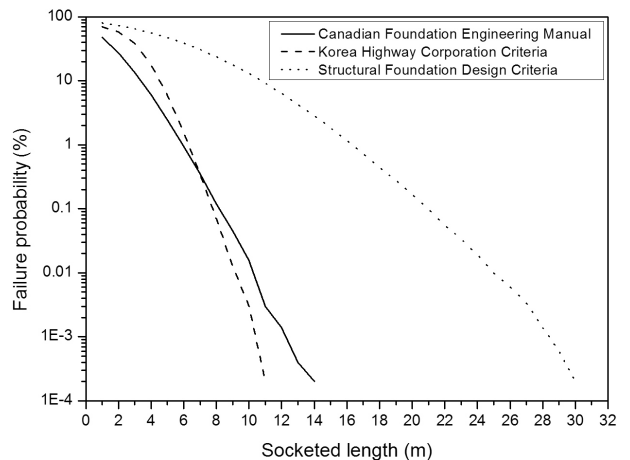


Fig. 12. Failure probability based on a embedded depth of rock socketed pile

변수를 Table 6에 제시된 3가지 방법의 극한지지력 산정식에 대입하여 한계상태식이 0보다 작은 경우를 n_f 번 관측하여 파괴확률(P_f)을 산정하였다(Fig. 12).

허용응력 설계법을 이용하여 계산된 대구경 현장타설말뚝의 지지력은 계산식에 따라 다르게 나타났다. CFEM의 방법에서는 8 m 깊이에서 지지력이 만족되었으며 신뢰성 해석을 통해 검토된 파괴확률은 0.12 %였다. 한국도로공사

기준(KHCC) 방법에서는 15 m의 근입깊이에서 만족되었으며, 파괴확률은 0.0002 % 이하였다. 또한 구조물기초설계기준(SFDC)에 의한 방법에서는 27 m의 근입깊이에서 만족되었으며, 파괴확률은 0.003 %였다. 3가지 경험식의 방법에서 구조물기초설계기준에 의한 방법이 가장 보수적인 방법임을 알 수 있었다.

신뢰성 해석에서는 구조물의 특성과 지역 특성을 고려하여 파괴확률을 적절하게 제안하고 있다. AASHTO(2007)에서는 교량설계에 있어 설계수명을 75년으로 목표하고 있으며 파괴확률(P_f)을 0.02 %로 설정하고 있다. 이 논문에서 파괴확률 0.02 %에 대한 말뚝의 근입깊이는 CFEM 방법에서는 10 m, 한국도로공사기준(KHCC) 방법에서는 9 m, 구조물기초설계기준(SFDC) 방법에서는 24 m에서 만족하였다. 이는 안전율 3을 적용하여 실시한 허용응력 설계에 비해 근입깊이가 CFEM 방법에서는 25 % 증가하였으며 한국도로공사기준에서는 60 %, 구조물기초설계기준에서는 89 %만큼 감소하였다.

5. 결론 및 제언

시험 설계된 초장대 사장교의 고주탑을 지지하는 대수심 대형 복합기초에서 대구경 현장타설 말뚝의 허용응력 설계를 통하여 구한 지지력에 대한 신뢰성 해석을 실시하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 허용응력 설계 시 대구경 현장타설말뚝의 허용지지력 산정을 위한 3가지 경험식 중에서 구조물기초설계기준(SFDC)이 가장 보수적인 설계방법이었으며, 동일 현장의 지반에 대한 자료를 통계 분석한 결과 안전율 3에 대한 파괴확률은 0.003 %였다.
- (2) 허용응력 설계에서는 안전율 3을 적용하여 대구경 현장타설말뚝의 허용지지력을 구하였으며 그 결과에 대한 신뢰성 해석을 실시하였다. AASHTO에서 제시하고 있는 파괴확률(P_f) 0.02 %일 때 CFEM 방법에서는 근입 깊이가 25 % 만큼 증가하였으며 한국도로공사기준(KHCC)에서는 근입깊이를 60 %, 구조물기초설계기준(SFDC)에서는 근입 깊이를 89 % 만큼 감소시킬 수 있었다.
- (3) 지반에 대한 자료가 충분하지 않아 분산 범위가 커 해석결과에 대한 높은 신뢰도를 얻을 수 없었지만 향후 양질의 충분한 자료를 획득할 수 있다면 해석결과에 대한 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 초장대 교량 사업단(08기술혁신E01)의 지원에 수행되었으며, 이에 깊은 감사드립니다. Midas GTS 소프트웨어 사용의 편의를 제공해 준 (주)마이다스아이티에 심심한 감사를 드립니다.

References

1. AASHTO (2007), AASHTO LRFD bridge design specifications 4th edition, AASHTO, Washington D.C., pp. 2~16, 3~37, 10~40.
2. Canadian Geotechnical Society (2006), Canadian foundation engineering manual 4th edition, Bitech Publishers, Vancouver, BC., pp. 296~298.
3. ENVICO & DM (2008), Basic design of long span bridge, pp. 1-77 (in Korean).
4. Goda, Y. (1973), A new method of wave pressure calculation for the design of composite breakwater, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol. 12, No. 3, pp. 31~69 (in Japanese)
5. Korean Geotechnical Society (2009), Structural foundation design criteria, Goomibook, pp. 320~322 (in Korean).
6. Korea Highway Corporation (2002), Guidelines for design of drilled shafts in rock, pp. 6~7 (in Korean).
7. Korea Institute of Construction Technology (2008), Determination of resistance factors for foundation structure design by LRFD, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, p. 2 (in Korean).
8. Korea Ports & Harbours Association (2004), Ports & Harbours design criteria, Ministry of Oceans and Fisheries, pp. 701~702 (in Korean).
9. Korean Society of Civil Engineers (2008), Highway bridge design criteria, Kimoondang, pp. 41, 64~66 (in Korean).
10. Midas GTS (2011a), Getting started, Midas Information Technology Co., Ltd, pp. 1~104 (in Korean).
11. Midas GTS (2011b), Analysis reference, Midas Information Technology Co., Ltd, pp. 1~300 (in Korean).
12. NAVFAC (1986), Foundation and earth structures (Design manual 7.2), Department of the Naval Facilities Engineering Command, pp. 234.
13. Peck, R. B., Hanson, W. E. and Thornburn, T. H. (1974), Foundation engineering, 2nd. Edition, John Wiley & Sons Inc., New York, pp. 361~371.
14. Prakoso, W. A. and Kulhawy, F. H. (2001), Contribution to piled raft foundation design, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Vol. 127, No. 1, pp. 17~24.
15. Yang, Y. S., Suh, Y. S. and Lee, J. O. (2006), Structural reliability engineering, Seoul National University Press, pp. 51~68 (in Korean).