

## 다양한 예측기법을 이용한 현장타설말뚝의 최적길이 산정 Estimation of Optimum Pile length Using Various Prediction

최영석<sup>1)</sup>, Young-seok Choi, 임형준<sup>2)</sup>, Hyung-joon Iim, 송명준<sup>3)</sup>, Myung-jun Song, 장학성<sup>4)</sup>, Hak-sung Jang

1) 유신코퍼레이션 기초설계팀 과장, Intermediate Engineer, Yooshin Corporation Engineering

2) 유신코퍼레이션 기초설계팀 사원, Junior Engineer, Yooshin Corporation Engineering

3) 현대건설기술연구소 차장, Senior En3ngineer, Hyundai Institute of Construction Technology

4) 유신코퍼레이션 지반·터널2부 부서장, Senior Managing Director, 2<sup>nd</sup> Department of Geotechnical and Tunnel Design, Yooshin Corporation Engineering

**SYNOPSIS** : As plan connecting island to island or island to land is needed, a lot of long-span bridge is being designed lately in Southern part of Korea. With development of pile equipment, overhanging large-scaled concrete pile are adopted to foundation type of main tower or pylon.

About the number of 15~30 group piles per tower foundation is designed to resist long-spaning super-structure load, but by restricted condition of site investigation cost, a few boring-hole tests are performed to identify sub-ground layers.

Up to now, direct-curved method connecting two or three known boring logs and representative interval method are usually used to evaluate unknown depth and rock properties at locations where piles are constructed. Because this approach is not logical and so rough, much difference occurs between designed length of piles and real length of it.

In this paper, using a lot of various prediction method(reciprocal distance method, inverse square distance method and kriging method etc.), we suggest optimum length of group piles.

**Key words** : group pile, pile length, direct-curved method, representative interval method, reciprocal distance method(RDM), inverse square distance method(ISDM) and kriging method

### 1. 서 론

남서해안의 연육교와 연도교의 필요에 따라 장경간 해상교량이 다수 시공되고 있다. 해상조건에 대한 말뚝 시공기술의 향상으로 대구경 돌출식 현장타설말뚝이 주탑기초 형식으로 주로 적용되고 있다.

이러한 설계경향으로 인해 주탑기초 한 개소 당 15~30여 본의 무리말뚝이 계획되고 있지만, 지반조사 비용의 제약으로 인해 시추조사는 3~6공 정도로 제한되고 있다. 이에 따라 시추조사가 수행되지 못한 말뚝위치에서는 기시추된 자료를 이용하여 새로운 기반암선을 추정하고, 기시추된 위치에서의 기반암의 공학적 특성자료(일축압축강도, RQD, 변형계수 등)를 산술평균하여 활용하고 있다. 이 경우, 기존의 직선연장에 의한 내삽법 또는 구간대표법으로는 지지층의 불평탄성과 기반암의 공학적 특성차이를 고려하여 말뚝길이를 합리적으로 평가하기에 현실적인 어려움이 존재한다.

따라서, 본 논문에서는 다양한 예측기법을 통하여 소수의 시추공 자료를 활용하여 주탑기초 내 모든 말뚝길이를 평가하고, 이 중에서 가장 합리적으로 말뚝길이를 산정할 수 있는 방안을 모색하고자 한다.

## 2. 연구 방향

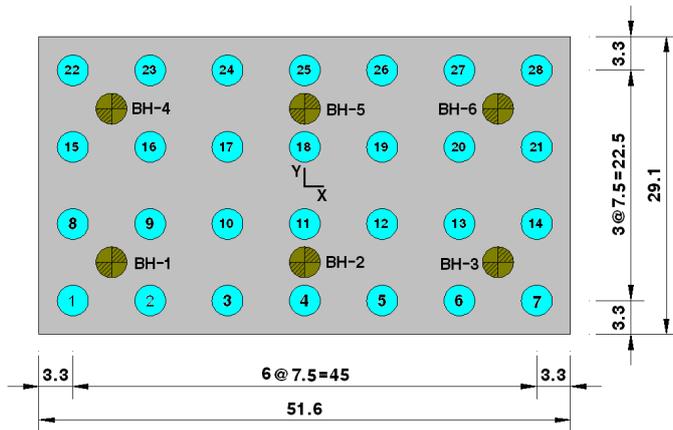
무리말뚝으로 시공된 교량기초를 대상으로 하여 기존 예측기법에 의한 개략예측과 새로운 예측기법에 의한 정밀예측 결과를 비교하였다. 이를 통하여 설계단계에서 고려할 수 있는 최적의 예측기법을 제안하고자 한다.

28본의 돌출식 무리말뚝으로 시공된 OO대교 주탑기초 PY2를 분석대상으로 선정하였다. 기초제원은 직경 3000mm 현장타설말뚝이며, 희생강관을 이용한 RCD굴착으로 말뚝을 기반암에 근입시켰다. 설계 단계에서는 무리말뚝기초 영역 내에 6공의 시추조사를 실시하였으며, 각 공변별 평면좌표, 기반암의 분포심도 및 공학적 특성(일축압축강도, RQD)은 다음 [표 1]과 같다.

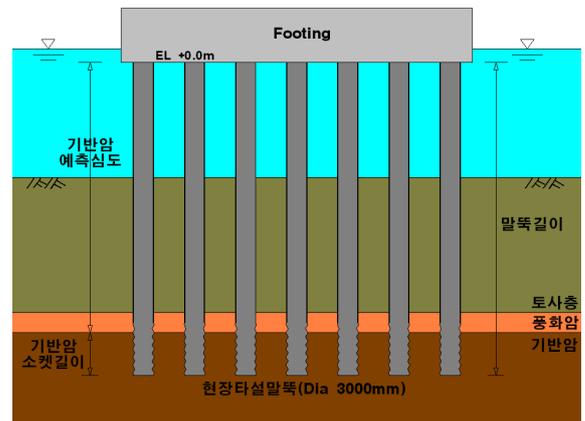
[표 1] 각 공변별 평면좌표, 기반암의 분포심도 및 공학적 특성(일축압축강도, RQD)

공 변	X 좌표	Y 좌표	기반암 출현심도	일축압축강도(MPa)	RQD(%)
BH-1	-18.75	-7.5	EL. (-)39.1m	22.2	37
BH-2	0.00	-7.5	EL. (-)39.2m	39.2	61
BH-3	18.75	-7.5	EL. (-)37.2m	29.0	48
BH-4	-18.75	7.5	EL. (-)40.5m	37.8	27
BH-5	0.00	7.5	EL. (-)41.3m	7.9	43
BH-6	18.75	7.5	EL. (-)41.9m	20.0	70

주탑기초는 총 28본의 무리말뚝으로 시공되어 있으며, 말뚝중심간격은 교축방향과 교축직각방향 모두 7.5m이다. 말뚝번호와 시추공번호는 다음 [그림 1]과 같이 순차적으로 부여하였다.



[그림 1] 말뚝번호 및 시추조사 위치도



[그림 2] 말뚝길이 산정 개요도

6공의 시추조사 자료를 바탕으로 각 예측기법에 따라 기반암 분포심도와 주변마찰력과 선단지지력을 예측하였다. 이로부터 각 말뚝별 소켓길이를 산정하고, 앞서 예측한 기반암 분포심도와 합산하여 각 말뚝별 최종 말뚝길이를 평가하였다.(그림 2 참조)

풍화암층 두께가 얇고(1.0~6.4m, 평균 3.3m), RCD 굴착시 풍화암 1~2m까지 희생강관을 삽입해야 하므로, 풍화암 소켓부분의 주변마찰력은 고려하지 않았다.

### 3. 예측 기법

현장타설말뚝의 길이를 산정하기 위해서는 각 말뚝별 기반암 분포심도가 필요하며, 말뚝의 주면마찰력과 선단지지력을 평가하기 위한 기반암의 공학적 특성(일축압축강도, RQD 등)을 파악하는 것이 중요하다. 기반암 분포심도를 판단할 수 있는 6공의 시추자료(BH-1~6)와 일축압축강도 및 RQD를 이용하여 산정한 단위 주면마찰력과 선단지지력의 자료를 바탕으로 말뚝길이를 설계하였다.

각 말뚝위치에 해당되는 미지점의 기반암 분포심도와 단위 주면마찰력 및 선단지지력은 다음의 예측 기법을 통하여 평가하였다.

#### 3.1 직선연장에 의한 내삽법

기지의 시추공과 시추공 사이를 직선으로 연결하여 그 내부에 존재하는 말뚝에 대해서 개략적인 기반암 분포심도를 가정하는 방법이다. 계산상의 편의로 인해 설계단계에서 가장 많이 사용되고 있지만, 다음과 같은 단점으로 인하여 실제 말뚝길이를 예측하는데 많은 문제점을 내포하고 있다.

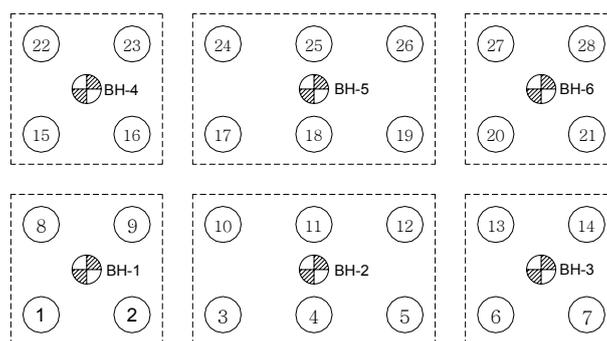
- ① 시추공과 말뚝이 동일 일직선상에 존재하지 않을 경우에 대한 판단의 어려움
- ② 시추공 밖에 존재하는 말뚝위치의 예측 어려움(외삽)
- ③ 기반암의 일축압축강도와 RQD 등과 같은 공학적 특성자료를 추정하기 어려움

본 연구대상에서는 시추조사 위치가 말뚝 제위치가 아니고, 시추공 밖에 말뚝이 존재하는 관계로 직선연장에 의한 내삽법을 적용하지 않았다.

#### 3.2 구간대표법

각 말뚝위치에서 가장 가까운 시추공의 기반암 분포심도와 공학적 특성을 이용하여 말뚝을 설계하는 방법으로, 시추조사 자료가 적을 경우 적용하기에 적합하다. 이 방법은 지층과 기반암의 공학적 특성값이 불연속적으로 존재한다는 단점을 내포하고 있다.

본 연구대상에서는 시추조사 위치와 말뚝의 기하학적 관계에 따라 다음 [그림 3]과 같이 구간대표법의 적용성이 비교적 좋은 것으로 판단되었다.



[그림 3] 구간대표법 적용 현황

#### 3.3 역거리 가중치법

서로 다른 시추공이 한 말뚝위치에 미치는 영향은 말뚝위치로부터 시추공까지의 거리에 따라 감소한다는 기본가정을 내포하고 있는 예측기법으로, 실무적으로 가장 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다.

말뚝위치에서의 기반암의 분포심도 및 공학적 특성값은 다음의 식(1)과 같이 표현할 수 있다. (Tabios & Salas, 1985)

$$z^* = \frac{\sum_{i=1}^n z_i / d_i^m}{\sum_{i=1}^n d_i^m} \quad \dots\dots\dots \text{식 (1)}$$

여기서,  $z^*$  : 말뚝위치에서의 기반암 분포심도 또는 공학적 특성값(qu, RQD)  
 $z_i$  : i번째 시추공의 기반암 분포심도 또는 공학적 특성값(qu, RQD)  
 $d_i$  : 말뚝위치에서 i번째 시추공까지의 거리  
 $m$  : 가중치를 평가하는 상수

m이 0에 가까운 값이면 역거리 가중치법의 결과는 산술평균값이 되고, m이 무한대로 커지면 다각형법의 추정결과와 같아진다. m이 커질수록 가까운 점의 영향이 커지며 되며, 가까운 점의 영향이 지나치게 크게 나타나는 현상(Bull's Eye 효과)이 발생한다.

m=1일 때를 상호거리법(Reciprocal Distance Method)이라고 하며, 직선연장에 의한 내삽법이 이를 1차원적으로 단순화시킨 것이다. 일반적으로 m=2일 때를 가장 많이 사용하는데, 이 예측기법을 역제곱거리법(Inverse Square Distance Method)라 한다.

### 3.4 크리깅

크리깅(Kriging)은 관심있는 지점에서 특성값을 알기 위해 이미 값을 알고 있는 주위값들의 선형조합으로 그 값을 예측하는 지구통계적 기법이다. 이를 간단한 수식으로 정의하면 다음 식(2)와 같다.

$$z^* = \sum_{i=1}^n \lambda_i z_i \quad \dots\dots\dots \text{식 (2)}$$

여기서,  $z^*$  : 위치가 알려진 지점에서 크리깅을 이용한 예측치  
 $\lambda_i$  : i번째 시추공의 자료값의 가중치

가중치를 구하는 방법에는 여러 가지가 있을 수 있는데, 단순히 예측오차가 최소로 하는 가중치를 구하는 미지값을 예측하는 경우를 단순크리깅(Simple Kriging)이라 하며, 크리깅 추정식이 편향되지 않으면서(unbiased) 오차분산을 최소로 하는 경우를 정규크리깅(Ordinary Kriging)이라 한다.

정규크리깅의 행렬방정식으로 구체적으로 표현하면 다음 식(3)과 같다.

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11}^2 & \sigma_{12}^2 & \dots & \sigma_{1n}^2 & -1 \\ \sigma_{21}^2 & \sigma_{22}^2 & \dots & \sigma_{n2}^2 & -1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sigma_{n1}^2 & \sigma_{n2}^2 & \dots & \sigma_{nn}^2 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \dots \\ \lambda_n \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma_{01}^2 \\ \sigma_{02}^2 \\ \dots \\ \sigma_{0n}^2 \\ 1 \end{pmatrix} \quad \dots\dots\dots \text{식 (3)}$$

여기서,  $\sigma_{ij}^2 = Cov(z_i, z_j) = \sigma^2 - \gamma(h_{ij})$  : 기지점 i와 j의 공분산  
 $\sigma_{0l}^2 = Cov(z_0, z_l) = \sigma^2 - \gamma(h_{0l})$  : 미지점 0과 기지점 l의 공분산  
 $\omega$  : 라그랑제인자

## 4. 말뚝길이 예측

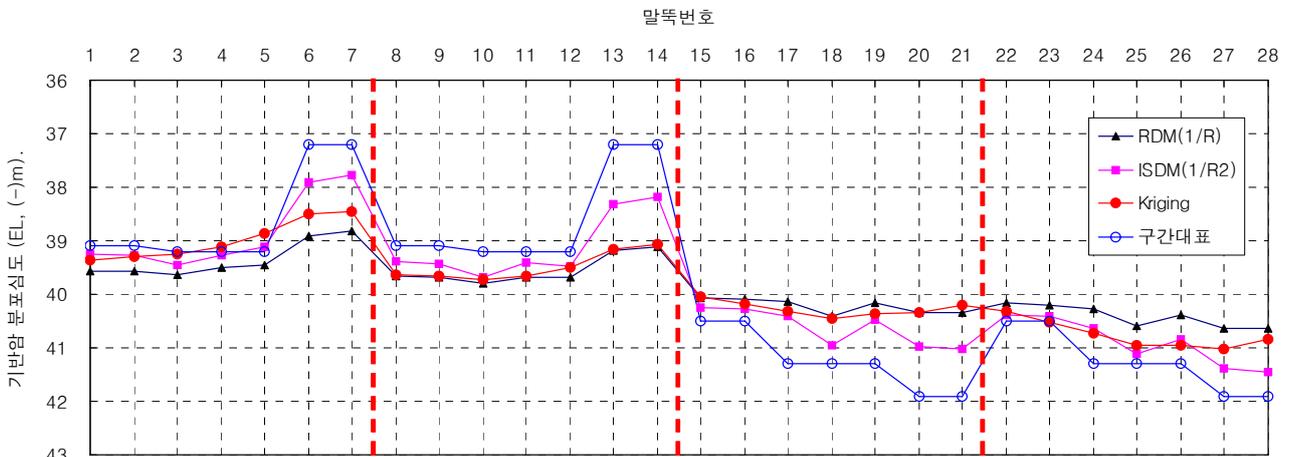
### 4.1 기반암 분포심도

[그림 1]과 같이 시추조사 위치가 말뚝 제위치가 아니고, 시추공 밖에 말뚝이 존재하는 관계로 직선 연장에 의한 내삽법을 사용하지 않고, 대표구간법을 적용하였다. 기반암 심도는 EL. (-)37.2~41.9m 범위이며, BH-6 주변부의 기반암 심도가 상대적으로 깊고 BH-3 주변부는 기반암이 일찍 출현한다.

크리깅기법에 의한 예측시 베리오그램은 다음 식 (4)와 같이 상관거리 60, 문턱값 4, 너깃 1인 구형 모델을 적용하였다.

$$\gamma(h) = 1 + 3Sph_{60}(h) = 1 + 3 \left\{ 1.5 \left( \frac{h}{60} \right) - 0.5 \left( \frac{h}{60} \right)^3 \right\} \dots\dots\dots \text{식 (4)}$$

대표구간법, 역거리가중치법(RDM, ISDM) 및 크리깅기법을 이용한 기반암 분포심도 예측결과는 다음 [그림 4]와 같다.



[그림 4] 기반암 분포심도 예측결과

거리의 역수로 가중치를 나타내는 상호거리법(RDM)은 가중치에 대한 고른 평가로 기반암의 지형적 특성을 상대적으로 약하게 반영하는 경향이 있다. 이에 반해 거리제곱의 역수로 가중치를 나타내는 역거리제곱법(ISDM)은 가장 가까운 시추공자료의 특성을 비교적 잘 반영하여 기반암의 굴곡진 지형을 표현하는 것으로 판단된다.

구간대표법은 시추공자료를 가장 가까운 해당말뚝 위치로 이동하는 관계로 기반암의 불연속적 분포를 나타내므로, 실제 지반을 적절히 표현하기에 어려움이 있다. 크리깅기법에 의한 예측결과는 상호거리법과 역거리제곱법의 예측결과 사이 범위를 나타낸다.

구간대표법은 기반암의 분포심도를 과대평가하는 경향이 있으며, 역거리제곱법(ISDM)에 의한 예측결과가 비교적 합리적인 결과를 제시하는 것으로 판단된다.

### 4.2 말뚝 소켓길이

본 교각기초 내에서 수행된 말뚝재하시험 결과를 바탕으로, 주변마찰력은 일축압축강도를 이용하는 Horvath and Kenney(1979) 방법을 적용하였고, 선단지지력은 RQD를 이용하는 Peck, et al(1974) 방법을 적용하였다.

[표 2] 말뚝의 단위 극한주면마찰력( $f_s$ ) 및 허용선단지지력( $q_a$ ) 산정법

구분	산정식
단위 극한주면마찰력	$f_s = 0.21 \sqrt{q_u}$ $q_u$ : 암반의 일축압축강도와 콘크리트강도 중 작은 값(MPa)
단위 허용선단지지력	$q_a = 1.1036 \times e^{0.0324RQD}$ RQD : 말뚝선단아래 2D 깊이의 평균값(%)

직경 3000mm인 현장타설말뚝( $f_{ck} = 28MPa$ )에 대해 설계반력 45MN으로 가정하여 말뚝 소켓길이를 설계한 과정은 다음과 같다.

- ① 대표구간법, 역거리 가중치법, 크리깅기법을 통하여 각 말뚝위치에서의 단위 극한주면마찰력과 허용선단지지력을 예측한다.
- ② 최소 소켓길이는 말뚝의 직경(3.0m)으로 결정하여 허용지지력을 산정한다.
- ③ 허용지지력이 설계반력 45MN보다 크면 소켓길이를 3.0m로 결정하고, 허용지지력이 설계반력보다 작으면 소켓길이를 연장하여 설계반력보다 크도록 반복 계산한다.

[표 3] 말뚝소켓 3m일 때의 허용지지력

공 변	$q_u$ (MPa)	RQD(%)	$f_s$ (MPa)	$q_a$ (MPa)	허용지지력(MN)
BH-1	22.2	37	0.99	3.66	32.2 (소켓연장)
BH-2	39.2 (28.0적용)	61	1.11	7.96	60.8
BH-3	29.0 (28.0적용)	48	1.11	5.23	43.3 (소켓연장)
BH-4	37.8 (28.0적용)	27	1.11	2.65	26.8 (소켓연장)
BH-5	7.9	43	0.59	4.44	33.6 (소켓연장)
BH-6	20.0	70	0.94	10.66	76.4

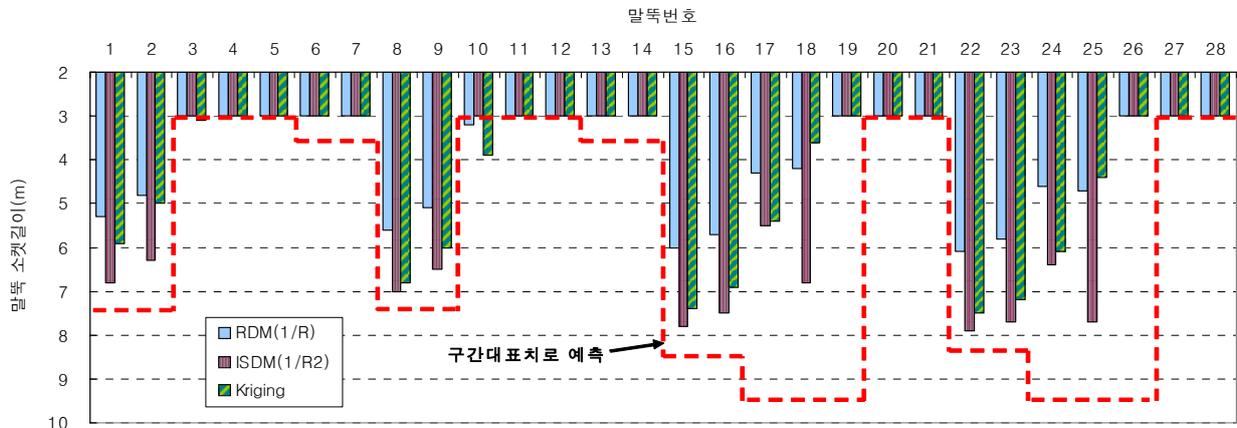
다음 [표 4]는 여러 가지 예측기법 중에서 크리깅기법에 의한 말뚝별 단위 극한주면마찰력과 허용선단지지력값이다.

[표 4] 크리깅기법에 의한 말뚝별 단위 극한주면마찰력과 허용선단지지력

(단위 : MPa)

No.	$f_s$	$q_a$									
1	1.03	4.25	8	1.02	3.83	15	1.03	3.51	22	1.02	3.52
2	1.02	4.70	9	1.00	4.29	16	0.99	3.90	23	0.97	3.84
3	1.03	5.59	10	0.98	5.28	17	0.91	4.76	24	0.87	4.58
4	1.05	6.46	11	0.98	6.33	18	0.85	5.65	25	0.80	5.43
5	1.05	6.56	12	0.98	6.76	19	0.89	6.78	26	0.84	6.73
6	1.06	6.36	13	1.01	6.91	20	0.94	7.82	27	0.89	8.01
7	1.07	6.35	14	1.03	7.02	21	0.98	8.12	28	0.94	8.40

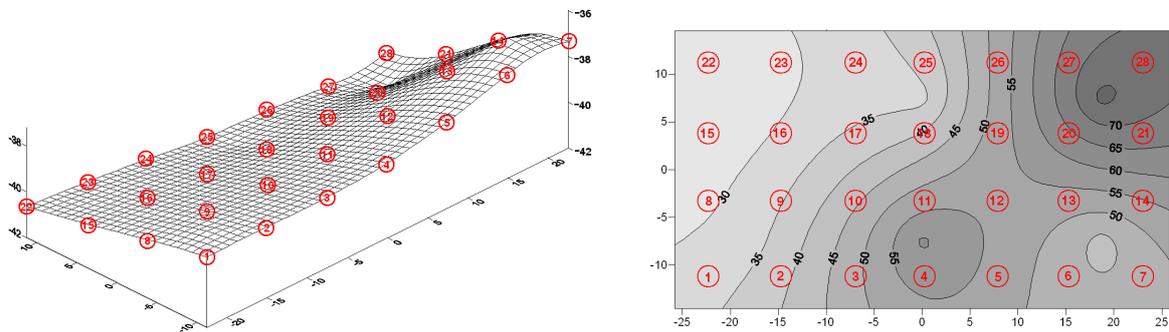
위와 같은 계산과정을 통해 산정한 말뚝 소켓길이는 다음 [그림 5]와 같다. 구간대표법으로 말뚝 소켓을 설계할 경우 소켓길이가 과대해지는 경향이 있으며, 상호거리법(RDM)에 의한 말뚝소켓길이 예측값은 다소 작아 위험측 설계가 될 수 있다. 역거리제공법(ISDM)과 크리깅기법에 의한 말뚝소켓길이 예측결과가 비교적 합리적인 설계를 제시하는 것으로 판단된다.



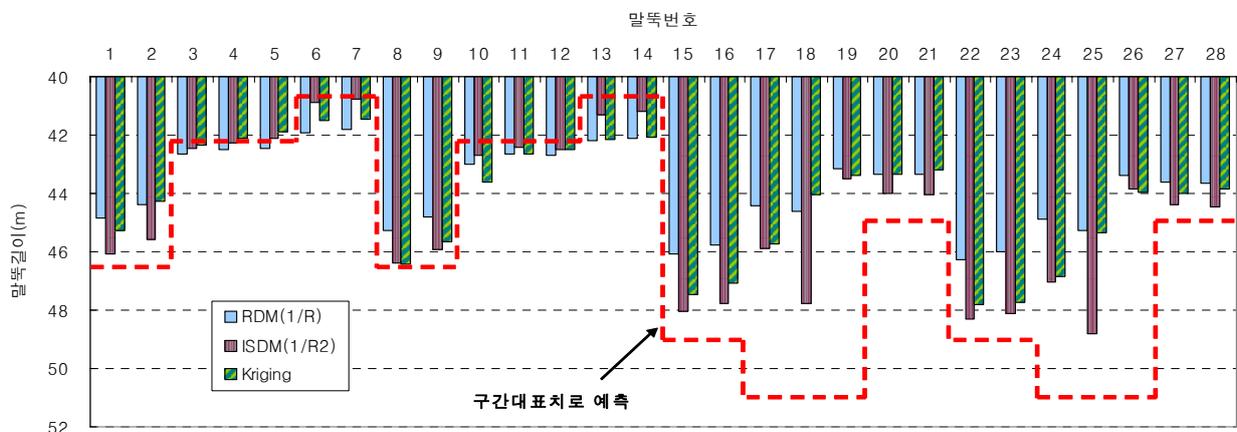
[그림 5] 말뚝소켓길이 예측결과

### 4.3 말뚝길이 결정

말뚝길이는 말뚝머리(EL + 0.0)에서 기반암을 지나 소켓된 근입깊이 만큼의 전체길이를 정의한다. 본 연구대상 지역의 기반암 분포심도와 암질에 따른 허용지지력 분포 양상은 [그림 6]과 같으며, 이를 반영한 말뚝길이 예측결과는 다음 [그림 7]과 같다.



[그림 6] 기반암 분포심도와 소켓길이 3m일 때의 허용지지력 분포 현황



[그림 7] 말뚝길이 예측결과

기반암 출현심도가 깊은 윗 1~행 구간의 말뚝들(15~8번)의 길이가 길게 평가되었고, 기반암의 일축 압축강도와 RQD가 낮은 좌측 1~열 구간의 말뚝들(1,2,8,9,15,16,22,23번)의 길이가 길게 평가되었다. 이를 통하여 본 연구에서 제시한 예측기법이 실제지반의 형상과 공학적 특성을 비교적 잘 반영한 것으로 판단할 수 있다.

기반암 분포심도와 공학적 특성을 함께 고려하여 예측할 경우, 각각의 예측기법에 따른 차이는 비교적 적었으나, 구간대표법으로 설계할 경우 적용시추대상 선정의 주관성 차이에 따라 말뚝길이가 크게 달라질 수 있다.(인접한 11번 말뚝과 18번 말뚝의 경우 거리차이는 7.5m인데, 말뚝길이 차이는 8.6m임)

[표 5] 예측기법에 따른 전체 말뚝길이

구 분	구간대표법	상호거리법	역거리제공법	크리깅기법
말뚝길이(m)	1,283	1,227	1,249	1,238
설계비율(%)	100	95.6	97.3	96.5

## 5. 결 론

무리말뚝으로 시공된 OO대교 주탑기초에 대해 6공의 시추자료를 활용하여 28본 모든 말뚝의 소켓길이를 설계하여 각각의 말뚝길이를 산정하였다. 기반암 분포의 굴곡과 지지암반의 공학적 특성의 차이를 통계적 예측방법으로 접근하여 말뚝길이를 예측함으로써 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 각 말뚝위치에서 가장 가까운 시추공의 자료를 이용하여 말뚝을 설계하는 구간대표법은 기반암의 불연속적인 분포와 말뚝위치에서의 기반암의 공학적 특성을 제대로 평가하지 못하여 말뚝위치에 따라 설계결과가 큰 차이를 나타낼 수 있다.

둘째, 거리의 역수를 가중치로 활용하는 상호거리법(RDM)은 굴곡진 지반을 평탄하게 평가하고, 기반암의 공학적 특성을 보수적으로 예측하여 위험측 설계를 유도한다.(말뚝소켓길이 과소평가)

셋째, 크리깅기법은 자료분석시 주관성을 배제할 수 있는 지구통계적 방법으로 기반암 분포양상과 말뚝소켓길이 측면에서 가장 합리적인 결과를 제시하는 것으로 판단된다. 그러나, 크리깅 접근시 베리오그램과 공분산 및 행렬식 등 실무에서 접근하기에 다소 복잡한 계산과정이 요구된다.

넷째, 역거리제공법(ISDM)은 지반의 굴곡 형상을 잘 표현하고, 크리깅기법보다 다소 말뚝소켓길이를 크게 평가하는 것으로 나타났다. 설계단계에서는 말뚝길이를 보수적으로 평가하고, 실무적으로 접근하기 쉬운 역거리제공법에 의한 말뚝길이 예측기법이 가장 합리적인 방법이라 사료된다.

마지막으로, 본 연구는 설계단계에서 소수의 시추공을 활용하여 모든 말뚝의 길이를 예측하기 위한 것으로, 설계자의 주관적 판단에 따른 설계편차를 최소로 할 수 있는 방안을 모색하는데 그 의의가 있다. 따라서, 실제 말뚝공사시 사전 시추조사 결과와 상이하게 나타나는 기반암의 굴곡이나 약층의 존재를 예측하기에는 어려움이 있다. 이 경우 추가 지반정보를 활용한 재예측을 실시하여 말뚝길이를 변경하는 것이 타당하리라 판단된다.

## 참고문헌

1. OO대교 PY1, PY2 말뚝기초 설계변경 제안서, 2004, 현대기술연구소
2. 지구통계학, 시그마프레스, 최종근
3. 구조물 기초설계기준 해설, 2003, (사)한국지반공학회
4. AASHTO LRFD BRIDGE DESIGN SPECIFICATION, 2002