

도로교 기초 말뚝에 대한 간편한 내진 설계절차 제안

The Proposal of Simple Seismic Design Procedure for Pile Foundation

서정혜¹⁾, Jeonghae Seo, 전완기¹⁾, Wan ki Jeon, 최용규²⁾, Yongkyu Choi,

¹⁾ 경성대학교 건설·환경공학부 대학원 석사과정, Graduate Student, Dept of Civil Engrg, Kyung Sung University

²⁾ 경성대학교 건설·환경공학부 부교수, Associate Professor, Dept of Civil & Environmental Engrg, Kyung Sung University

SYNOPSIS : A simple seismic design procedure for pile foundation using PAR and LPILE^{PLUS} was proposed. A case of pile foundation under a simple bridge was selected and analyzed. The calculated horizontal movements, shear forces and moments were compared with those evaluated by the numerical exact solutions, and the formers had similar trends with the latters.

Key words : Seismic design, Group pile, Lateral load, Seismic load,

1. 서론

국내의 경우 지진에 대한 피해가 다른 나라들에 비해 그 영향이 적은 관계로 내진설계가 보편화되어 있지 않고 제한적으로만 실시되었다. 그러나 최근 우리 나라에서도 지진의 발생빈도가 증가하면서 내진설계의 필요성이 부각되고 있다. 현재 여러 가지 내진설계법이 제안되었는데, 이들 방법들은 AASHTO 시방서, 일본도로교시방서, 한국도로교표준시방서등 각종 시방서의 내진설계법에도 채택되어 사용되고 있다. 현재, 동적해석법과 같은 복잡한 해석절차에 의한 해석은 적용성에서 한계가 있을 수 있고, 실무에서의 적용상 많은 어려움이 예상되므로 간편하게 적용시킬 수 있는 내진해석절차에 대한 필요성이 대두되었다. 본 연구에서는 간편한 내진설계절차를 제안하였으며, 이미 시공된 사례에 적용하여 기존의 방법 (수식적 정해)과 해석코드인 LPILE^{PLUS}, PAR등을 이용한 해석결과들을 비교·분석하였다.

2. 말뚝기초의 내진설계절차 요약

본 연구에서 제안하는 간편한 내진설계절차는 다음과 같다.

- 1) 말뚝군에 작용하는 하중 계산 : 상부구조, 하부구조, 확대기초등의 자중과 등가 지진하중을 계산하고 이들에 의한 모멘트를 계산하고 이 하중들은 말뚝군의 중심에 작용한다고 가정하였다.

- 2) 군말뚝의 해석 : 대부분의 교각아래의 기초는 군말뚝 형태를 취하고 있으나 말뚝기초의 설계는 단일 말뚝의 제원을 결정하기 위한 것이다. 이를 위해 군효과를 고려한 해석이 필요하다. 동일한 확대기초 아래에서 하중을 받고 있는 군말뚝이라 하더라도 각각의 말뚝이 지지하는 하중이 다를 것이므로 군말뚝에 의한 해석을 통해 각 말뚝이 부담하고 있는 하중을 계산할 수 있으며, 이 중 제일 큰 하중을 받는 단일 말뚝을 선정하는 단계이다. 본 연구에서는 변위법 (진도법)을 이용하여 해석하였으나 지반공학적인 측면에서는 3DPILE과 같은 군말뚝 해석코드를 사용하는 것이 바람직할 수 있으므로 이에 관한 연구를 계속 수행할 것이다.
- 2) 단일말뚝의 해석 : 군말뚝해석에서 최대하중이 작용되는 말뚝에 대하여 PAR, LPILE^{PLUS}등과 같은 수평하중 해석코드들을 이용한 해석을 수행한다. 여기서, 각 말뚝에 발생하는 수평변위, 전단력, 휨모멘트등을 계산하여야 하며 말뚝머리 고정조건에 따라 다양한 해석을 수행하여야 한다.
- 3) 말뚝기초의 설계 : 허용응력법의 경우에는 말뚝머리의 고정조건에 따라 계산된 수평변위와, 전단력 및 모멘트에 의해 발생된 응력들이 허용치 이내에 들도록 하여야 한다. 그러나, AASHTO 시방서에서는 LRFD (Load Resistance Factor Design)방법이 제안되어 사용되고 있으므로 국내 설계에서도 기초분야에서 LRFD 방법을 이용한 설계를 채택할 필요도 있을 것이다.

본 연구에서 사용한 해석 방법은 다음과 같다.

1) 수식적 정해 (closed-form solution)

등가수평하중을 받는 단일말뚝의 해석에 적용할 수 있으며, 수치해석적 방법으로 해를 구하였다. 본 연구에서는 수식적 정해에 의한 결과를 기준값으로 설정하였다.

2) 변위법 (진도법)

일본도로교시방서에서 채택하고 있는 내진설계기법으로 등가정적해석법이라고도 한다. 이 해석법은 지진에 의해 생기는 힘을 정적인 등가수평하중으로 변환하여 구조물에 작용시킨다. 본 연구에서는 3×4 열로 배치된 군말뚝의 해석에 적용하였으며, 각 열의 말뚝에 작용하는 수직력, 수평력, 그리고 모멘트를 계산하였다.

3) PAR (Pile Analysis Routine)

PAR은 단일말뚝 해석프로그램으로 지진하중을 작용시켜 해석할 수 있는데, 여기서 사용된 지진진동은 지진규모 7.0인 Elcentro 지진 (1940)이 사용되었다. PAR에서는 흙-말뚝-상부구조물과의 상호작용 (Soil-Pile-Superstructure Interaction)에 대한 해석도 가능하다.

4) LPILE^{PLUS}

P-y 곡선을 이용한 해석코드이며 단일말뚝 해석코드로 Ensoft사에서 개발하였으며, 수평하중이 작용된 말뚝기초의 해석에 흔하게 사용되고 있다.

표 1. 해석 조건

| 해석코드 | 단계 | 말뚝머리 고정조건 | 연직력 | 수평력 | 모멘트 | 지진진동 | SPS Interaction | 기호구분 |
|-----------------------|----|-----------|-----|-----|-----|------|-----------------|------------------|
| LPILE ^{PLUS} | 1 | 고정 | × | ○ | ○ | × | × | BC 1 |
| | 2 | 고정 | ○ | ○ | ○ | × | × | BC 2 |
| | 3 | 고정 | ○ | ○ | × | × | × | BC 3 |
| PAR | 1 | 고정 | × | ○ | ○ | × | × | BC 1 |
| | | 고정 | × | × | ○ | ○ | × | BC 1 (지진진동) |
| | | 고정 | × | ○ | ○ | × | ○ | BC 1 (SPS) |
| | | 고정 | × | × | ○ | ○ | ○ | BC 1 (SPS, 지진진동) |
| | 2 | 고정 | ○ | ○ | ○ | × | × | BC 2 |
| | | 고정 | ○ | × | ○ | ○ | × | BC 2 (지진진동) |
| | | 고정 | ○ | ○ | ○ | × | ○ | BC 2 (SPS) |
| | | 고정 | ○ | × | ○ | ○ | ○ | BC 2 (SPS, 지진진동) |
| | 3 | 힌지 | ○ | ○ | × | × | × | BC 3 |
| | | 힌지 | ○ | × | × | ○ | × | BC 3 (지진진동) |
| | | 힌지 | ○ | ○ | × | × | ○ | BC 3 (SPS) |
| | | 힌지 | ○ | × | × | ○ | ○ | BC 3 (SPS, 지진진동) |

본 연구에서는 진도법에 의해 각 말뚝에 작용하는 하중들을 계산하였으며, 최대하중이 작용되는 말뚝에 대하여 LPILE^{PLUS}와 PAR을 사용하여 말뚝머리 고정조건과 시공조건등을 고려하여 해석조건을 설정하였으며, 표 1에 요약하였다. LPILE^{PLUS}에서의 기본적인 경계조건으로 BC 1, BC 2, BC 3로 나누었는데, BC 1은 확대기초만 시공되어 수평력과 모멘트만 작용된 경우이고, BC 2는 상부구조물까지 시공되어 수직력, 수평력, 모멘트가 모두 작용된 경우이다. 그리고 BC 3는 지진시 확대기초와 말뚝기초의 연결부가 힌지 상태로 되어 수직력과 모멘트만이 작용된 경우이다. 그러나, PAR에서는 지진진동을 입력시켜 해석할 수 있을 뿐만 아니라, 지반-말뚝기초-상부구조 (Soil-Pile-Superstructure)와의 상호작용을 고려한 해석도 가능하므로 해석조건을 표 1에서와 같이 설정하였다.

3. 설계사례

3.1 설계조건

본 해석사례의 대상은 교량의 기초말뚝이며, 구체 형식은 그림 1에서 보여주는 바와 같이 철근 콘크리트제의 내밀음이 있는 기둥식 교각이다. 기초의 형식은 현장타설 콘크리트말뚝으로 말뚝지름은 1.0m, 말뚝길이는 22.0m이다. 기초말뚝은 3행 4열로 구성되었으며 합계 12개 말뚝이 사용되었고 상부구조와 하부구조 그리고 기초부의 형상과 치수는 그림 1에 나타내었다.

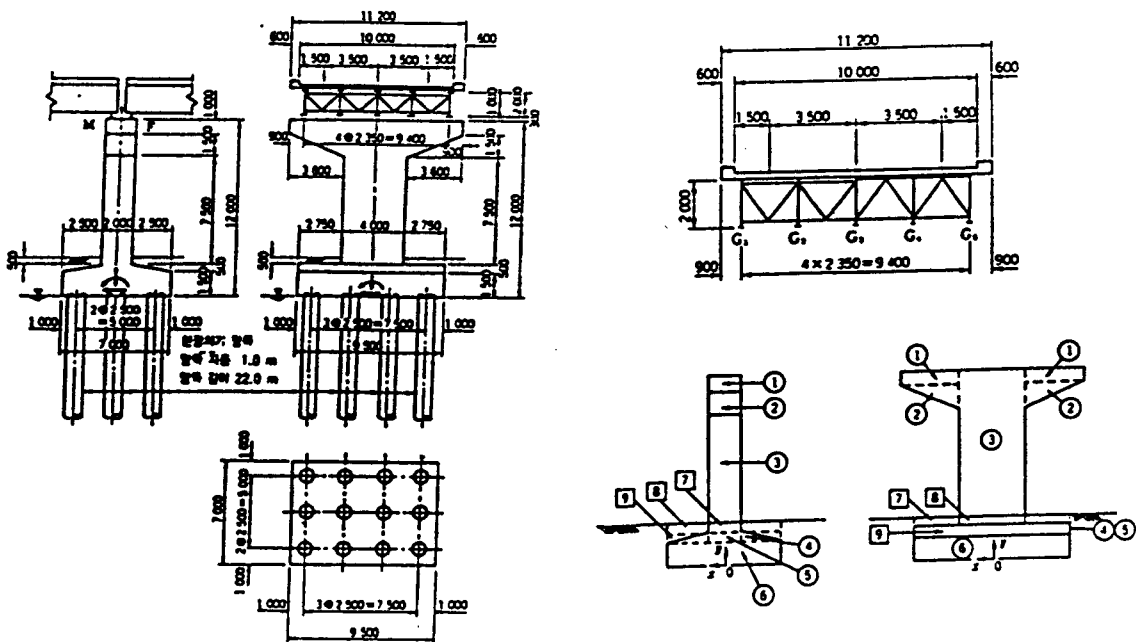


그림 1. 교량의 종·횡 단면도

3.2 군말뚝의 해석에 이용된 하중

기초에 작용하는 하중은 상부구조의 반력과 하부구조의 자중으로 나눌 수 있다. 상부구조의 거더반력 및 전체 반력은 표 2에 나타내었으며 하부구조의 자중은 표 3에 나타내었다.

표 2. 상부 구조의 반력표

| 거더 번호 G _i | 거더 반 | | | 발 침 | | 전체 반력 (승보물 포함하지 않음) | | | |
|----------------------|--------------------|-----------------------|------|-------|-------|---------------------|----------------|---------|-------------|
| | 사하중 R _h | 활하중 (R _h) | 합 계 | 가 등 | 고 정 | 하중의 종류 | 기 호 | 반력 (tf) | 전체포당 (tf/m) |
| G ₁ | 50.6 | 25.4 | 76.1 | BP· | BP· | 사 하 중 | R _h | 230.0 | 20.5 |
| G ₂ | 42.9 | 31.9 | 74.8 | A-106 | A-105 | | | | |
| G ₃ | 42.9 | 31.1 | 74.0 | | | 활 하 중 | R _v | 93.0 | 8.3 |
| G ₄ | 42.9 | 31.9 | 74.8 | 높이 mm | 높이 mm | | | | |
| G ₅ | 50.6 | 25.4 | 76.1 | 170 | 170 | 합 계 | - | 323.0 | 28.8 |

표 3. 교각 자중의 계산

| 번호 <i>i</i> | 계 산 식 | 수직력 V_i (tf) | 수평력* H_i (tf) | 수평 거리 x_i (m) | 수직 거리 y_i (m) | <i>z</i> 축 모멘트 $M_z = V_i \cdot x_i$ (tf·m) | <i>y</i> 축 모멘트 $M_y = H_i \cdot y_i = V_i \cdot y_i$ (tf·m) |
|----------------|--|-------------------|--------------------|--------------------|--------------------|---|--|
| ① | $3.6 \times 1.0 \times 2.0 \times 2.5 \times 2$ | 36.00 | 36.00 | 0.0 | 11.50 | 0.0 | 414.00 |
| ② | $\frac{1}{2} \times 3.6 \times 1.5 \times 2.0 \times 2.5 \times 2$ | 27.00 | 27.00 | 0.0 | 10.50 | 0.0 | 283.50 |
| ③ | $4.0 \times 10.0 \times 2.0 \times 2.5$ | 200.00 | 200.00 | 0.0 | 7.00 | 0.0 | 1400.00 |
| ④ | $\frac{1}{2} \times 2.5 \times 0.5 \times 9.5 \times 2.5 \times 2$ | 29.69 | 29.69 | 0.0 | 1.67 | 0.0 | 49.58 |
| ⑤ | $2.0 \times 0.5 \times 9.5 \times 2.5$ | 23.75 | 23.75 | 0.0 | 1.75 | 0.0 | 41.56 |
| ⑥ | $7.0 \times 1.5 \times 9.5 \times 2.5$ | 249.38 | 249.38 | 0.0 | 0.75 | 0.0 | 187.04 |
| ⑦ | $2.0 \times 0.5 \times 2.75 \times 1.8 \times 2$ | 9.90 | — | 0.0 | — | 0.0 | — |
| ⑧ | $2.5 \times 0.5 \times 9.5 \times 1.8 \times 2$ | 42.75 | — | 0.0 | — | 0.0 | — |
| ⑨ | $\frac{1}{2} \times 2.5 \times 0.5 \times 9.5 \times 1.8 \times 2$ | 21.38 | — | 0.0 | — | 0.0 | — |
| Σ | — | 639.85 | 565.82 | — | — | 0.0 | 2375.68 |

* 실제 수평 진도 $k_h=1.0$ 으로 가정한다.

3.3 지반조건

본 해석에 사용된 지반 특성치는 표 4에 나타내었다.

표 4. 지반특성치

| LAYER | 심도 (m) | 토질명 | 유효단위중량 (kN/m ³) | 내부마찰각 (°) |
|-------|-------------|-----------|-----------------------------|-----------|
| 1 | 0.0 ~ 7.5 | 실트질 가는 모래 | 7.35 | 27.6 |
| 2 | 7.5 ~ 13.5 | 가는 모래 | 8.82 | 29.1 |
| 3 | 13.5 ~ 19.5 | 중간 모래 | 9.80 | 31.5 |
| 4 | 19.5 ~ 23.5 | 자갈혼합된 모래 | 10.70 | 40.0 |

3.4 변위법에 의한 균말뚝 해석 결과

변위법에 의한 균말뚝의 해석 결과는 표 5에 나타내었다.

표 5. 계산 결과의 일람표

| 착안점 | 변위·용력 | 단위 | 교 축 방 향 | | 교 축 직 각 방 향 | |
|--------|------------|------|---------|------------|-------------|------------|
| | | | 평상시 | 지진시 | 평상시 | 지진시 |
| 0점의 변위 | δ_z | cm | 0 | 0.78044 | 0 | 0.68772 |
| | δ_y | cm | 0.21900 | 0.19313 | 0.21900 | 0.19313 |
| | α | rad. | 0 | 0.00097883 | 0 | 0.00060627 |
| 제 1 점 | P_{v1} | tf | 103.93 | 207.78 | 103.93 | 199.55 |
| | P_{h1} | tf | 0 | 21.371 | 0 | 21.371 |
| | M_{a1} | tf·m | 0 | -29.057 | 0 | -38.242 |
| 제 2 점 | P_{v2} | tf | 103.93 | 91.654 | 103.93 | 127.62 |
| | P_{h2} | tf | 0 | 21.371 | 0 | 21.371 |
| | M_{a2} | tf·m | 0 | -29.057 | 0 | -38.242 |
| 제 3 점 | P_{v3} | tf | 103.93 | -24.477 | 103.93 | 55.689 |
| | P_{h3} | tf | 0 | 21.371 | 0 | 21.371 |
| | M_{a3} | tf·m | 0 | -29.057 | 0 | -38.242 |
| 제 4 점 | P_{v4} | tf | — | — | 103.93 | -16.240 |
| | P_{h4} | tf | — | — | 0 | 21.371 |
| | M_{a4} | tf·m | — | — | 0 | -38.242 |

3.5 단일말뚝에 작용되는 하중

제 1열에 배치된 말뚝에 교축직각방향으로 하중이 작용하는 경우가 최대하중조건이었으므로 해석수행 대상으로 선정하였다. 표 1에서 설명하였듯이 동적지진하중이 작용되는 경우에는 수평력을 지반의 지진 진동으로 대신하였으며, SPS 상호작용의 경우 수직하중인 상부구조의 자중과 기둥 및 확대기초의 자중을 집중질량 (Lumped mass)으로 처리하였다. 상부구조물의 자중은 균말뚝 해석결과에 따라 각 말뚝에 작용하는 비율대로 분배하였으며 기둥과 확대기초의 자중은 각 말뚝에 균등하게 분배하였다. 표 6에는 해석할 하중 조건을 요약하였다.

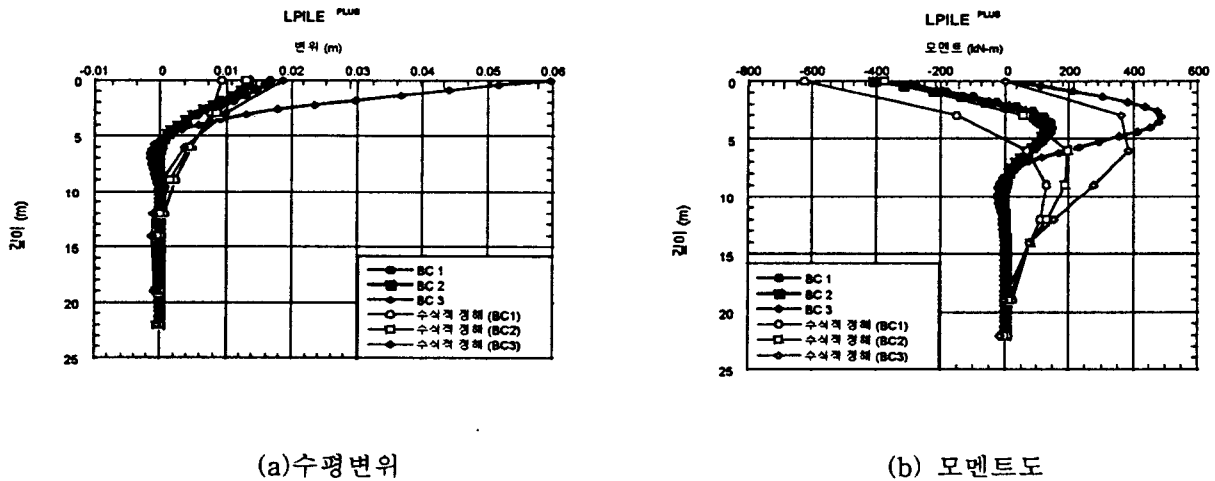
표 6. 각 사례에 적용된 하중의 크기

| | 수직력 (kN) | | 수평력 (kN) | 모멘트 (kN·m) |
|----------|----------|---------|----------|------------|
| 일반 | 1955.59 | | 209.43 | 374.75 |
| SPS 상호작용 | 569.70 | 1128.09 | 209.43 | 374.75 |

4. 해석결과

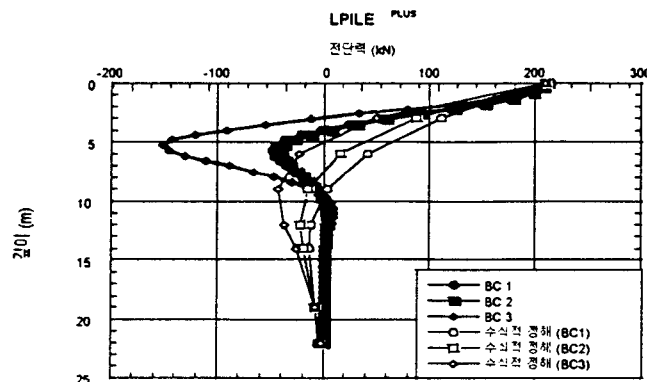
4.1 LPILE^{PLUS}에 의한 결과

LPILE^{PLUS}에 의한 해석결과는 수식적 정해에 의한 결과와 비교하여 그림 2에 도시하였다.



(a) 수평변위

(b) 모멘트도



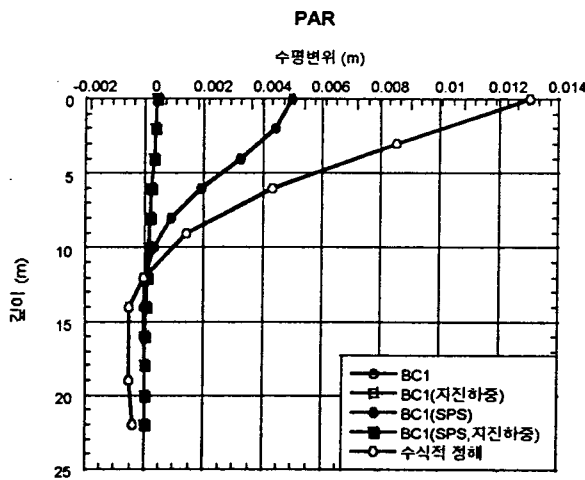
(c) 전단력도

그림 2. LPILE^{PLUS}에 의한 결과와 수식적 정해에 의한 결과

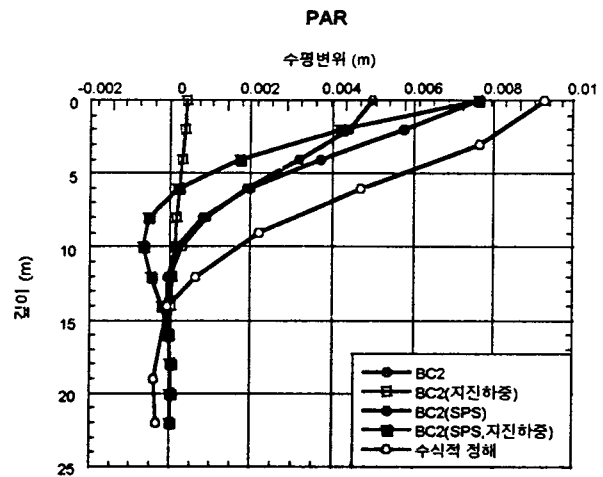
LPILE^{PLUS}에 의한 결과는 대체적으로 수식적 정해와 비슷한 양상을 보였다. 말뚝머리가 힌지된 경우, LPILE^{PLUS}에 의한 해석결과는 수식적 정해와 다소 차이를 보이고 있었으나 말뚝머리가 고정된 경우에는 수식적 정해와 비슷한 결과를 보여주었다. 수식적 정해에서는 말뚝의 전 길이에서 수평거동의 영향이 나타나고 있으나, LPILE^{PLUS}에서는 말뚝상부의 40%의 길이에서만 수평거동이 나타나는 것을 볼 수 있는데 이는 말뚝의 실제 거동을 반영하는 것으로 볼 수 있었다. LPILE^{PLUS}에 의한 해석치와 수식적 정해를 비교하였을 때, 말뚝머리 변위가 힌지된 경우를 제외하면, 최대모멘트와 전단력의 크기는 비슷하였으나 그 발생위치는 다소 상이하였다.

4.2 PAR에 의한 결과

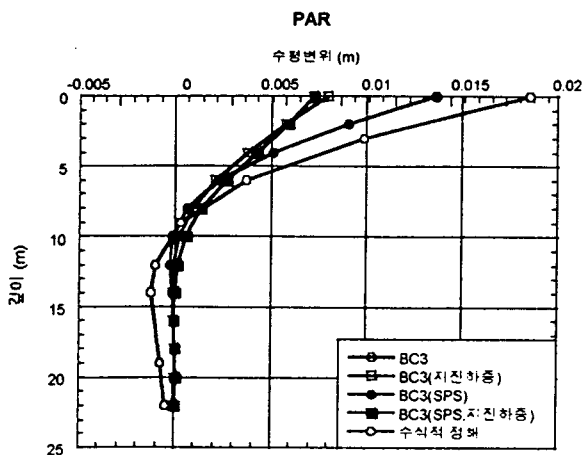
PAR은 두 가지 해석방법으로 해석하였으며, 그림의 복잡성으로 인하여 각 경우에 대한 결과를 동일한 그림에 도시하는 것이 곤란하여 말뚝머리의 경계조건(BC 1, BC 2, BC 3) 별로 도시하였다.



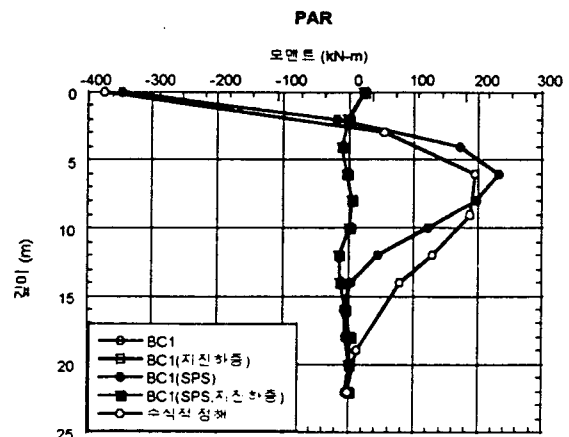
(a) BC 1 (수평 변위)



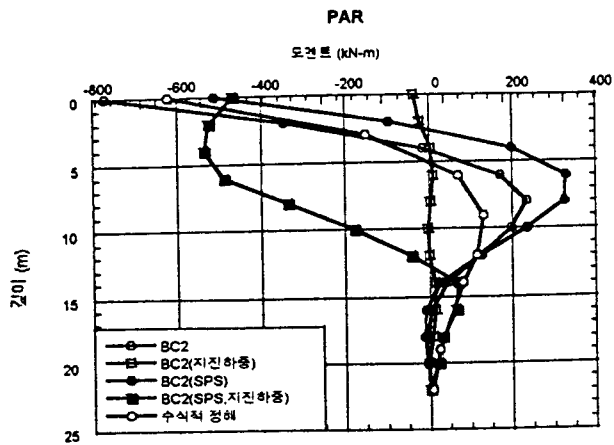
(b) BC 2 (수평 변위)



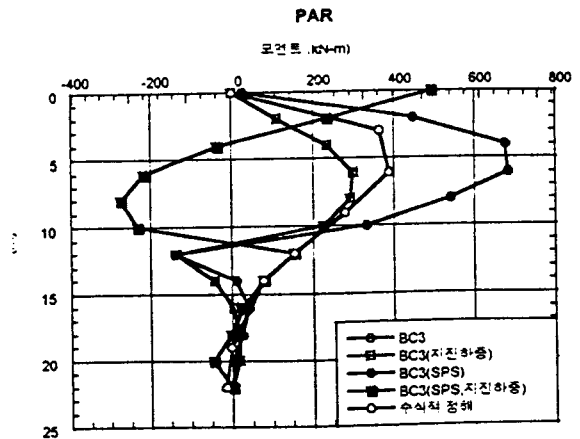
(c) BC 3 (수평 변위)



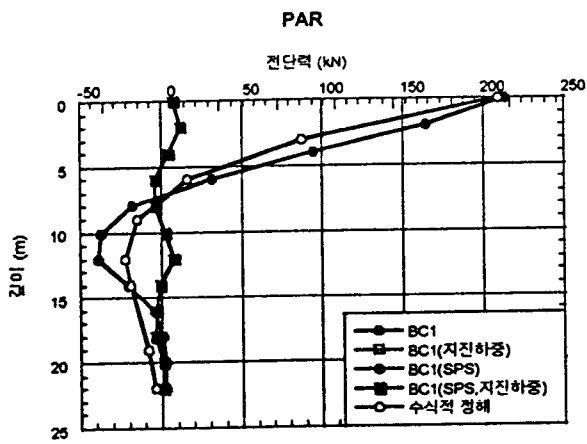
(d) BC 1 (모멘트)



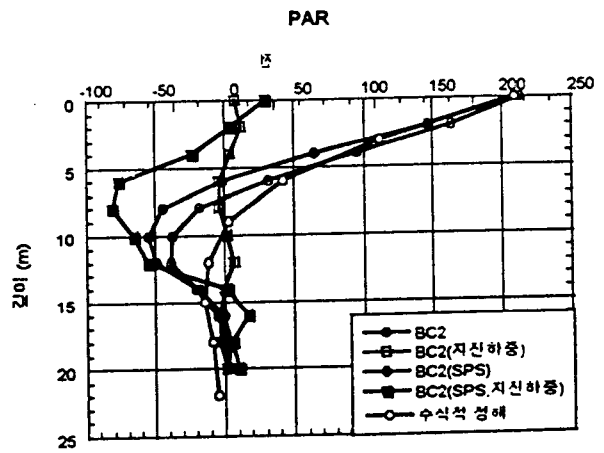
(e) BC 2 (모멘트)



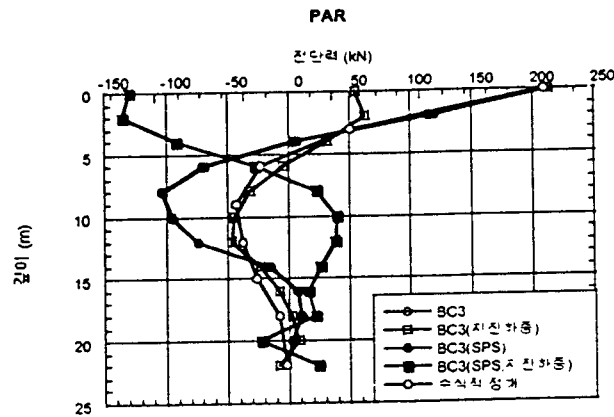
(f) BC 3 (모멘트)



(g) BC 1 (전단력)



(h) BC 2 (전단력)



(i) BC 3 (전단력)

그림 3. PAR에 의한 결과와 수식적 정해에 의한 결과

지진의 영향을 등가수평하중으로 고려하여 수행된 결과가 수식적 정해와 비슷하였으며, 흙-말뚝-상부 구조물과의 상호작용을 고려할 경우에는 더욱 잘 부합되었다. 그러나, 지반의 측정된 지진진동을 PAR에 입력하여 해석하였을 경우 말뚝머리가 고정인 상태에서는 말뚝의 수평변위, 모멘트, 전단력등에 미치는 영향이 미미하였다. 입력된 지진진동은 지진규모 7.0인 Elcentro 지진의 측정치였다. 수평변위의 경우에는 PAR에 의한 해석치가 수식적 정해보다 다소 큰 값을 나타내었다. PAR의 경우 SPS 상호작용을 고려했을 때 다른 경우와 비교하여 상이한 양상을 나타내었는데, 교각부의 길이까지 고려하여 모델링하였으므로 말뚝길이만을 고려하여 해석을 한 경우와는 다소 다른 양상을 나타내는 것으로 생각된다.

5. 결론 및 제언

본 연구에서는 해석코드를 이용한 간편한 내진설계법을 제안하였으며 이 결과를 수식적 정해와 비교하였다. 대부분의 경우에서 수식적 정해와 비슷한 양상을 보였다. 본 연구의 결론들은 다음과 같다.

- 1) LPILE^{PLUS}의 경우 말뚝머리가 고정인 경우에는 수식적 정해와 비슷한 결과를 보였으나 말뚝머리가 힌지된 경우에는 수식적 정해와 다소 다른 값을 나타내었다. 말뚝머리가 고정인 경우 수평변위, 모멘트, 전단력의 최대크기는 비슷하였으나 그 발생위치는 다소 상이하였다.
- 2) PAR의 경우에는 수평변위는 모든 경우에서 수식적 정해에 의한 값이 해석코드에 의한 값보다 크게 나타났으며, 모멘트와 전단력의 경우에는 다소 상반된 양상을 나타내었다. PAR의 경우에도 말뚝머리 고정조건에서 수식적 정해와 비슷한 값을 구할 수 있었다. 또한, SPS 상호작용을 고려한 경우에는 고려하지 않은 경우보다 수식적 정해에 보다 근접한 값을 나타내었다.
- 3) 실제구조물에 대한 실측자료를 구할 수 있다면 그 값을 기준값으로 설정하는 것이 바람직하다고 생각되었으나, 실측 자료를 구하기 어려웠으므로 수식적 정해에 의한 값을 기준으로 하였다.
- 4) 균말뚝의 해석은 변위법을 이용하였으나, 지반공학적 측면에서 균말뚝 해석코드인 3DPILE을 이용하여 해석하는 것이 더 흥미로울 수 있을 것이다. 3DPILE을 이용한 간편한 내진설계절차에 대한 연구를 계속적으로 수행할 것이다.

참고문헌

1. 대한토목학회 (1997), "도로교표준시방서" 건설교통부 제정
2. 도서출판 과학기술 (1997), "이해하기 쉬운 교량 하부구조물의 내진 설계"
3. 목영진 (1998), "교량기초의 내진설계," 도로교의 내진설계, 한국지진공학회 제 1회 기술 강습회, (사) 한국지진공학회, 1998. 1. 19~21, pp 185 - 253
4. Abghari, A. & Chai, J. (1995), "Modelling of Soil - Pile - Superstructure Interaction for Bridge Foundations," Performance of Deep Foundations under Seismic Loading, edited by Turner, J. P., ASCE Geotechnical Special Publication No. 51, pp 45 - 59
5. Ensoft (1997), "LPILE^{PLUS} 3.0 for WINDOW, Technical Manual of Documentation of Computer Program," Austin, TX, USA
6. PMB Engineering Inc. (1994), "PAR (Pile Analysis Routine Users Manual, Theoretical Manual, Reference Manual," San Francisco, California