

기초의 연성을 고려한 교각의 응답스펙트럼 해석

Response Spectrum Analysis of Bridge Column Considering the Flexibility of Foundation

김나엽^{*} · 김성렬^{**} · 장범수^{***} · 김명모^{****}

Kim, Na Yeob · Kim, Sung Ryul · Chang Buhm Soo · Kim, Myoung Mo

1. 서 론

실무에서 응답스펙트럼법을 이용하여 교량 교각의 내진해석을 수행할 때 계산의 편의와 보수적인 설계를 위하여 기초의 연성을 고려하지 않고 지반면을 고정단으로 가정하여 해석하는 경우가 많다. 이러한 고정단 모델은 대부분의 경우 기초의 연성을 고려한 경우에 비하여 매우 보수적인 결과를 주지만, 지진파의 종류와 지반 조건에 따라서는 그와 반대의 결과를 줄 수도 있다. 또한 현재 기초의 연성을 고려하는 여러 가지 모델들이 제안되었지만 각 모델링 방법들의 특징과 해석결과에 미치는 영향이 파악되지 않고 설계에 이용되고 있는 실정이다.

본 연구에서는 교각과 기초의 모델링 방법, 입력응답스펙트럼의 종류 그리고 지반조건을 달리하여 응답스펙트럼 해석을 수행하였다. 또한 군말뚝 효과를 고려한 모델이 해석결과에 미치는 영향도 살펴보았다. 수치 해석을 통하여 교각에 발생하는 전단력, 모멘트 그리고 변위를 비교하여 기초의 연성을 고려하는 모델링 방법과 지반 및 지진파 특성이 해석결과에 미치는 영향들을 분석하였다.

2. 해석 모델

2.1 기초의 모델링 방법

응답스펙트럼 해석에서 교각 및 기초를 모델하는 방법은 그림 1에 나타낸 바와 같이 크게 3가지가 있다. 교각과 기초가 만나는 부분을 고정단으로 가정하는 경우(그림 1(a)), 말뚝을 모델한 후 말뚝인접지반을 p-y 스프링으로 대체하여 지반의 영향을 고려하는 경우(그림 1(b)) 그리고 지반을 등가의 6개의 스프링(3개의 변위 스프링, 3개의 회전 스프링)으로 치환하는 경우(그림 1(c))가 있다. 고정단으로 모델한 경우는 간단하지만, 실제 기초의 연성을 고려하지 못하므로 구조물 변위를 과소평가하고 설계력이 매우 과다하게 산정되는 경향이 있다. 군말뚝체를 모두 모델하고 인접지반을 p-y 스프링으로 대체한 모델링 방법은 이제까지 제시된 모델링 방법 중에서 가장 정밀한 것으로 평가되고 있으며 중요 구조물 또는 특수한 지반조건(액상화 지반 등)의 영향을 고려할 때 주로 이용되고 있다. 그리고, 지반을 6개의 스프링으로 모델하는 방법은 간단하게 기초의 연성을 고려할 수 있는 방법이다. 본 연구에서는 동일한 해석조건에 대하여 이러한 3가지 모델링 방법을 적용하여 해석을 수행하였다. p-y 스프링 모델 이용 시 군말뚝 효과의 영향을 분석하기 위하여 군말뚝 효과를 고려한 경우와 고려하지 않은 2가지 경우에 대하여 각각 해석을 수행하였다. p-y 스프링은 API에 제시된 절차에 따라서 산정하였으며, 군말뚝 효과와 6개의 스프링 상수는 미국 교통국(U.S. Department of Transportation Highway Administration)에서 제안하는 방법에 의해서 구하였다.

*정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정 · 공학박사 · 02-880-7354(E-mail:myojin12@hanmail.net)

**정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정 · 공학석사 · 02-880-7354(E-mail:yawnful@hananet.net)

***정회원 · 시설안전기술공단 기술개발지원실 차장 · 공학박사 · 031-910-4154(E-mail:orpheus@chollian.net)

****정회원 · 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수 · 공학박사 · 02-880-7354(E-mail:geotech@gong.snu.ac.kr)

2.2 해석 조건

본 연구에 사용된 해석 단면은 그림 2에 나타낸 바와 같이 3×3 군말뚝을 가진 교각 기초이다. 교각과 말뚝의 재원은 콘크리트이며 말뚝캡은 강체로 가정하였다. 지반 조건에 따른 교각의 영향을 살펴보기 위해서 크게 3가지 지반 조건에 대해 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 지반 조건은 20m 두께의 사질토층(그림 3(a)), 20m 두께의 점성토층(그림 3(b)) 그리고 사질토층 사이에 점성토층이 있는 혼합토층(그림 3(c))이다. 각 층의 물성치는 각 그림에 표시된 바와 같다.

2.3 입력 가속도응답스펙트럼

지진특성이 교각 응답에 미치는 영향을 살펴보기 위해 단주기와 장주기 지진을 포함한 3가지 입력지진파를 사용하였다. 사용된 지진파는 장주기 지진인 Hachinohe 지진파, 단주기 지진인 Ofunato 지진파 그리고 단주기와 장주기 성분을 모두 내포하고 있는 El Centro 지진파이다. 이 지진파들을 기반암에 가한 다음 지반응답해석 프로그램인 Proshake를 사용하여 지표면에서의 가속도응답스펙트럼을 작성하였다. 이 3가지 응답스펙트럼과 시방서에서 제안하고 있는 표준응답스펙트럼을 이용하여 응답스펙트럼 해석을 수행하였다. 따라서 총 4가지 응답스펙트럼을 해석에 이용하였다. 기반암에서의 각 지진파의 가속도응답스펙트럼은 그림 4에 나타나 있다.

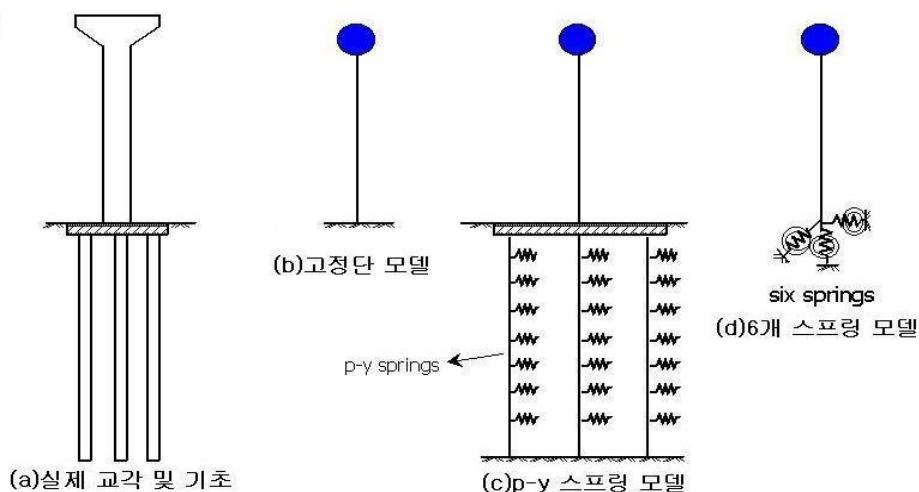


그림 1. 교각 및 기초의 모델링

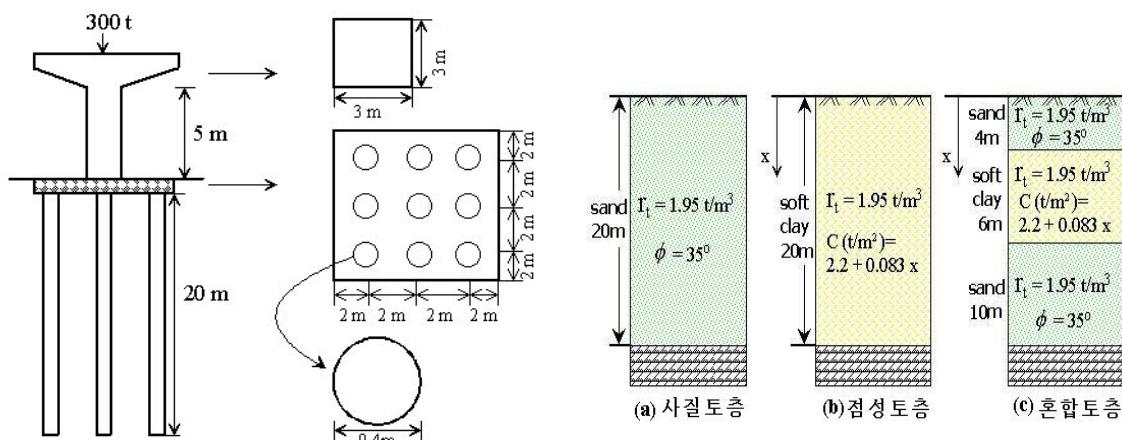


그림 2. 교각의 단면도 및 평면도

그림 3. 3가지 지반 조건

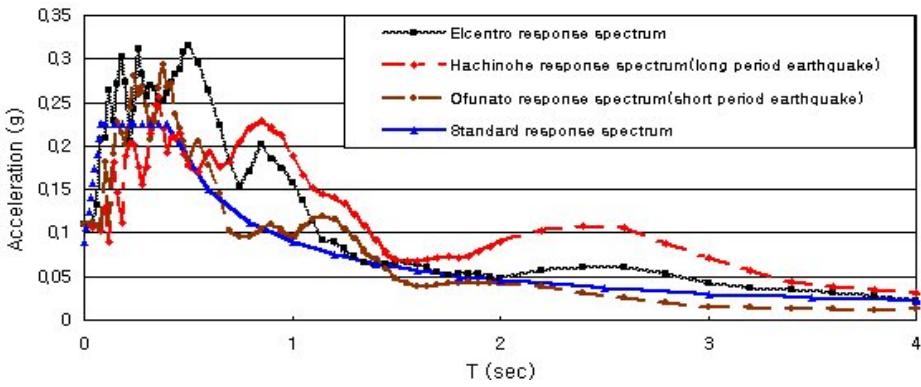


그림 4. 기반암에서의 입력 가속도응답스펙트럼

3. 해석결과

4가지 모델링 방법(고정단, p-y 스프링, 군말뚝 효과를 고려한 p-y 스프링 그리고 6개 스프링)과 각각의 지반조건과 지반조건에 따라 작성된 지표면에서의 12개의 가속도응답스펙트럼을 이용하여 응답스펙트럼 해석을 수행하였다. 해석결과로부터 얻어진 교각의 전단력, 교각-말뚝캡 접촉부의 모멘트 그리고 교각 상부의 변위는 각각 표 1, 2 그리고 3에 정리되어 있다.

전단력과 모멘트의 경우 대부분 고정단 모델이 가장 보수적인 결과를 준다. 하지만, 접성토층에 장주기 지진파인 Hachinohe 지진파를 입력한 경우(표 1과 2에서 빛금 친 부분)에는 기초의 연성을 고려한 모델들(p-y 스프링, 군말뚝 효과를 고려한 p-y 스프링 그리고 6개 스프링 모델)에서 고정단 모델보다 평균 50% 큰 전단력과 모멘트가 발생하였다. 연약한 접성토층에 장주기 지진파가 입력되면 지표면에서의 가속도스펙트럼이 주기가 증가함에 따라 단조감소하지 않고 장주기 부분에서 가속도가 증폭되고 이 증폭된 부분의 주기와 기초의 연성을 고려한 구조물의 고유주기가 일치하기 때문에 기초의 연성을 고려한 모델에서 고정단 모델보다 큰 전단력과 모멘트가 발생하였다. 나머지 경우에는 고정단 모델에서의 전단력과 모멘트가 기초의 연성을 고려한 나머지 모델들에서의 전단력과 모멘트보다 평균 2.9배 크며, 최대 6.7배 크므로 고정단 모델이 매우 보수적인 결과를 준다는 사실을 확인할 수 있다. 또한 대부분의 경우에 군말뚝 효과를 고려한 p-y 스프링 모델보다 p-y 스프링 모델에서 큰 전단력과 모멘트가 발생하므로 p-y 스프링 모델이 보수적인 결과를 준다는 사실을 알 수 있다. 한편, 교각 상부 변위는 기초의 연성을 고려한 모델이 고정단 모델보다 평균 51배나 더 크므로 변위 측면에서 고정단 모델이 비보수적인 결과를 준다는 사실을 확인할 수 있다. 또한 사질토에서의 고정단 상부의 변위가 접성토에서의 고정단 상부의 변위(표 3에서 빛금 친 부분)보다 크게 나오는 비현실적인 결과가 도출될 수도 있음을 확인하였다. 따라서 정확한 변위 산정 및 경제적이고 안전한 설계를 위해서는 기초의 연성을 고려한 모델을 이용하여야함을 알 수 있다.

표준응답스펙트럼을 적용한 경우 지진 및 지반특성을 고려한 응답스펙트럼보다 설계력 및 변위가 작아지는 결과가 나타날 수 있으므로 실제 설계 시에는 여러 가지 응답스펙트럼을 이용하는 것이 바람직하다.

표 1. 교각의 전단력 (단위 : ton)

응답스펙트럼	사질토층				접성토층				혼합토층			
	고정단	p-y 스프링	p-y 스프링 (group)	6개 스프링	고정단	p-y 스프링	p-y 스프링 (group)	6개 스프링	고정단	p-y 스프링	p-y 스프링 (group)	6개 스프링
El Centro	1535	204.3	202.9	276	695	353	292	333	693	367	357	505
Hachinohe	1072	314.3	249.7	424	383	582	524	525	611	579	448	893
Ofunato	1275	241.9	179.1	360	567	203	143	334	673	349	254	509
표준스펙트럼	1201	507.4	480	568	1651	479	474	574	1201	507	480	568

표 2. 교각-말뚝캡 접촉부의 모멘트 (단위 : ton · m)

응답스펙트럼	사질토총				접성토총				혼합토총			
	고정단	p-y 스프링	p-y 스프링 (group)	6개 스프링	고정단	p-y 스프링	p-y 스프링 (group)	6개 스프링	고정단	p-y 스프링	p-y 스프링 (group)	6개 스프링
El Centro	7265	959	952	1291	3289	1656	1370	1555	3281	1725	1676	2363
Hachinohe	5075	1476	1172	1985	1817	2723	2455	2455	2894	2724	2105	4174
Ofunato	6035	1137	840	1685	2685	952	668	1562	3189	1641	1195	2381
표준스펙트럼	5683	2384	2254	2657	7815	2245	2036	2683	5683	2384	2254	2657

표 3. 교각 상부의 변위 (단위 : mm)

응답스펙트럼	사질토총				접성토총				혼합토총			
	고정단	p-y 스프링	p-y 스프링 (group)	6개 스프링	고정단	p-y 스프링	p-y 스프링 (group)	6개 스프링	고정단	p-y 스프링	p-y 스프링 (group)	6개 스프링
El Centro	4.9	31.9	35	34	2.2	160	161	104	2.2	59	64	63
Hachinohe	3.4	49.1	44	53	1.2	263	299	165	1.9	93.1	80	110
Ofunato	4	37.8	31	45	1.8	92	79	105	2.1	56.1	46	63
표준스펙트럼	3.8	79.2	84	71	5.2	217	239	180	3.8	79.2	84	71

4. 결 론

본 연구에서는 변수연구를 통하여 교각 기초부의 모델링 방법과 지반의 종류 및 지진파의 특성이 교각의 응답스펙트럼 해석결과에 미치는 영향을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 고정단 모델이 대부분의 경우 기초의 연성을 고려한 모델보다 설계력 측면에서는 매우 보수적인 결과를 주며, 변위 측면에서는 그와 반대의 결과를 준다. 그러나, 접성토총에 장주기 지진파가 작용할 때와 같이 특수한 경우에는 기초의 연성을 고려한 모델에서 고정단 모델보다 큰 전단력과 모멘트가 발생하였다.
2. 단말뚝 p-y 스프링 모델과 군말뚝 효과를 고려한 p-y 스프링 모델 결과를 비교할 때 전자가 후자보다 보수적인 결과를 나타내었다.
3. 경제적이고 안전한 설계를 위해서는 부지 고유의 지반응답스펙트럼을 작성하여 기초의 연성을 고려한 모델을 이용하는 것이 효율적이라고 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2001년 시설안전기술공단에서 지원한 ‘기존 시설물에 대한 내진성 평가기법 개발(기초 · 지반 분야)’ 사업으로 이루어진 것으로 본 연구를 가능케 한 시설안전기술공단에 감사드립니다.

참고문현

1. U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration (1996), *Seismic Design Course Design Example No.6*
2. Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research (1998), *Modeling of Pile Footings and Drilled Shafts For Seismic Design*
3. 해양수산부 1999, 항만 및 어항시설의 내진설계표준서