

현행 도로교시방서의
지반계수에 대한 공학적 영향평가
Engineering Impact Assessment of the Site Coefficients
In the Current Highway Bridge Code of Korea

조양희¹ 조인범²
Joe Yang Hee Cho In Bum

ABSTRACT

This study is intended to investigate the seismic responses of bridge structures considering site effects. The site effects in the seismic analysis of bridge structures were classified into two parts. At first, the seismic responses of the structures on each "soil profile types" of the code were evaluated in accordance with code-specified method and compared with results of time-history analysis method. And next, as a second stage of the study, the responses of the two different soil sites with considerably different soil properties, even though they are classified to the same "soil profile types" of the code, were evaluated and compared each other. The first part of study is purposed to evaluate the applicability of code-specified method, while the other part is purposed to find the variance of the seismic responses from the different soil sites in the same soil profile types of the code.

For the analysis, two major methods of the code, single-mode spectral analysis and multi-mode spectral analysis, were used and the time-history analysis method which is expected to give more accurate responses was also used for the comparison purposes. For the time-history analysis, time-domain analysis technique of the lumped- mass model with frequency-independent soil springs and dampers was adopted and artificially generated spectra of the code was used as input motion.

As the results of the study, the code specified methods for the seismic responses considering the site effects were verified to give the results in conservative side for the most of the cases. However, for the structures on the site with considerable flexibility, the responses of the bridge girders or deckplates by the code methods both in section forces and horizontal movement responses, may have much smaller values than the actual responses. Therefore, more detailed analysis considering the flexibility of the base soil may be required to have more reasonable results in girder responses.

¹ 인천대학교 토목공학과 부교수

² ㈜삼안건설기술공사 구조부

1. 서 론

국내 도로교시방서 내진설계편에서 선택하고 있는 내진설계법은 그 실용성을 위하여 정밀한 해석이 아닌 간략법 즉, 단일모드해석법 및 복합모드해석법을 채택하고 있다. 그러나, 이와같은 방법들은 국내실정을 고려한 연구결과가 아닌 AASHTO 방법을 원용한 것으로서 그 실용성에 대한 검증이 요구된다.

특히, 연약지반의 경우에는 지반의 유연성이 교량의 지진응답에 영향을 주게되어서, 고정지반과는 전혀 다른 응답을 주게 된다. 이와 관련하여 이미 구시방서⁽¹⁾에서 명시한 지반의 영향고려방법에 대해서 그 실용성 및 안전여유치가 확인된바 있다⁽²⁾. 그러나, 최근(1996년)에 개정된 도로교시방서⁽³⁾에서는 지반의 종류를 종전의 3가지에서 4가지로 더욱 세분하였고, 그 고려방법은 지반계수를 이용하여 지진응답을 일정량 증가 시키는 종전의 근사법을 그대로 사용하고 있다.

본 연구에서는 보다 정확한 지반-구조물 상호작용해석방법인 시간이력해석법을 이용하여 다양한 지반-구조물 교량시스템에 대한 예제해석(case study)을 수행하고, 그 결과를 개정된 시방서방법의 적용결과와 상호 비교함으로써 현행시방서에서 규정한 지반영향 고려방법에 대한 적정성여부를 확인하였다. 또한, 시방서에서 동일지반으로 분류될 수 있는 서로 다른 지반간의 지진응답 차이를 확인함으로써 설계시 안전축설계를 유도할 수 있도록 하였다.

상대적인 정밀해석을 위해서는 진동수에 무관한 임피던스함수를 이용한 시간영역에서의 시간이력해석을 수행하였으며, 이를 위해 국내 도로교시방서에서 제시한 응답스펙트럼에 부합하는 별도의 인공시간이력곡선을 작성하여 사용하였다. 해석대상모델로서는 4경간 교량을 대상으로 했으며, 지반은 서로 다른 유연도를 가지는 8가지 지반을 사용하였다.

2. 교량의 지반-구조물 상호작용 해석

2.1 국내시방서 방법

국내시방서의 내진설계시 사용되는 지진해석방법은 단일모드스펙트럼해석법과 복합모드스펙트럼해석법이 있으나, 단일모드스펙트럼해석법을 근간으로 하고 있다. 이 경우 각 모드의 응답에 해당되는 탄성지진응답계수(C_s)는 다음식과 같이 계산된다.

$$C_s = \frac{1.2 \cdot A \cdot S}{T^{2/3}} \quad (1)$$

여기서, 지반의 영향은 두가지 방법으로 고려된다. 즉, 지반종류에 따른 지반계수를 표 1과 같이 분류함으로써 지반의 유연도에 따른 입력지진운동의 변화를 고려하였다. 또, 이와는 별도로 지반을 표 2와 같은 강도를 갖는 지반스프링으로 모델링함으로써, 지반의 유연도에 따른 시스템특성의 변화를 고려하도록하고 있다.

표 1 지반계수

지반종류	I	II	III	IV
지반계수	1.0	1.2	1.5	2.0

표 2 유효반지름으로 계산된 기초의 지반스프링 계수(K_0)

방 향	강 도
수 직	$\frac{4GR}{1-\nu}$
수 평	$\frac{8GR}{2-\nu}$
비틀림	$\frac{16GR^3}{3}$
회 전	$\frac{8GR^3}{3(1-\nu)}$

2.2 시간이력해석법

본 연구에서는 국내시방서에서 제시된 지반계수에 의한 지반영향고려방법에 비해 상대적으로 정확한 해석결과를 얻기 위하여 별도의 시간영역해석의 시간이력해석을 수행하고 그 결과를 시방서방법의 결과와 비교하였다.

해석시, 지반의 유연성은 진동수에 무관한 임피던스로 모델링하였으며, 이때 교각의 높이가 교각단면폭에 비해 크기 때문에 발산감쇠의 영향이 미비할 것으로 판단하여 무시하였다. 해석은 SAP90 을 이용한 모드중첩법을 사용하여 수행하였으며, 이때 시스템전체의 감쇠값은 시방서에서 가정한 값과 동일한 5%로 가정하였다.

3. 해석모델 및 입력운동

3.1 교량모델

해석에 사용된 교량의 형태 및 해석모델은 그림 1 및 그림 2 에 제시된 것과 같은 4경간 슬래브교를 모델로 해석대상으로 하였다. 지간수는 4경간이며, 상판과 교각의 연결상태가 힌지이다.

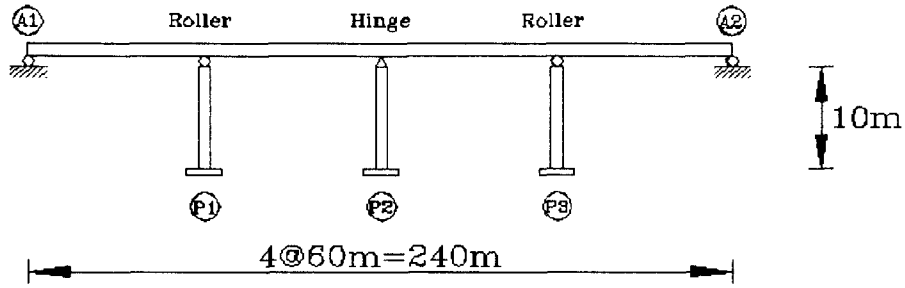


그림 1 예제해석을 위한 교량의 모델

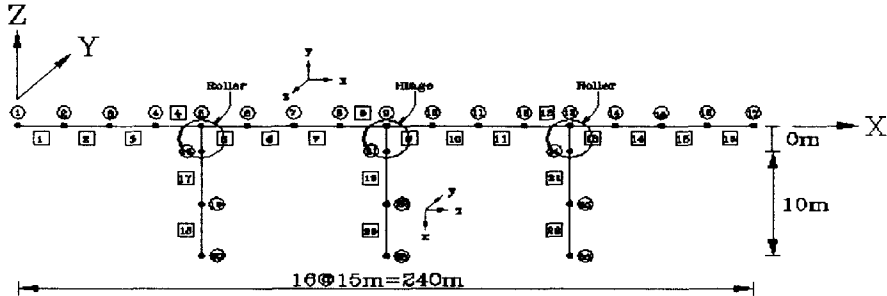


그림 2 유한요소모델

3.2 지반모델

해석대상 지반종류의 선택은 다음과 같은 목적을 위하여 8 개의 서로 다른 지반을 선정하였다.

첫째, 시방서에서 분류된 네가지 “지반종류”에 속하면서, 각 모델간의 실제 지진응답차이가 가능하면 최대화 될 수 있도록 서로의 지반특성차이가 현저한 지반모델을 선정함으로써, 시방서 해석결과와 상대적으로 정확한 해석결과의 차이를 확인하고자 하였다.

둘째, 현재의 시방서 기준에 따르면 동일 “지반종류”로 분류되지만, 실제 지반특성이 현저히 다른 두가지의 지반모델을 각 “지반종류”에 대하여 선택하였다.

이와같은 기준에서 선정된 8 개의 서로 다른 지반모델의 내용은 표 3 와 같다.

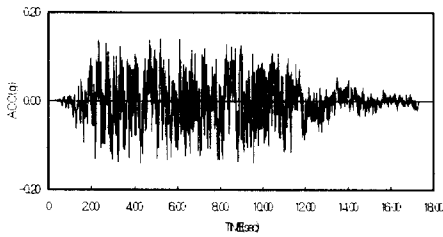
표 3 해석지반모델의 종류 및 특성

시방서 지반 종류	지반 모델 번호	지반형태	V_s (m/sec)	γ (t/m ³)	ν	비고
I	I 1		1000	2.15	0.28	어느형태이든 혈암이나 자연상태에서 결정체를 갖는 암반. 토층의 깊이가 60m 이하인 견고한 지반으로서, 암반 위에 쌓인 토질이 모래, 자갈, 또는 단단한 점토의 안정된 퇴적물인 지반.으로서 최대강성 을 갖는 경우.
	I 2		800	2.15	0.28	어느형태이든 혈암이나 자연상태에서 결정체를 갖는 암반. 토층의 깊이가 60m 이하인 견고한 지반으로서, 암반 위에 쌓인 토질이 모래, 자갈, 또는 단단한 점토의 안정된 퇴적물인 지반.으로서 최소강성 을 갖는 경우.
II	II 1		700	2.00	0.30	지반의 깊이가 60m를 초과하고, 암반위에 쌓인 모래, 자갈, 또는 단단한 점토의 안정된 퇴적물인 지반이거나, 비점착토가 두텁게 쌓인 지반으로서 최대강성 을 갖는 경우.
	II 2		300	2.00	0.30	지반의 깊이가 60m를 초과하고, 암반위에 쌓인 모래, 자갈, 또는 단단한 점토의 안정된 퇴적물인 지반이거나, 비점착토가 두텁게 쌓인 지반으로서 최소강성 을 갖는 경우.
III	III 1		200	1.80	0.32	연약 또는 중간 정도의 점토 또는 모래로 구성된 지반으로, 중간에 끼어 있는 모래나 다른 점착력이 없는 지층의 유무와 관계없이 9m 이상의 점토층으로 형성된 지반으로서 최대강성 을 갖는 경우.
	III 2		200	1.80	0.32	연약 또는 중간 정도의 점토 또는 모래로 구성된 지반으로, 중간에 끼어 있는 모래나 다른 점착력이 없는 지층의 유무와 관계없이 9m 이상의 점토층으로 형성된 지반으로서 최소강성 을 갖는 경우.
IV	IV 1		150	1.60	0.35	연약점토나 실트층의 깊이가 12m 이상 되는 지반으로서 최대강성 을 갖는 경우.
	IV 2		150	1.60	0.35	연약점토나 실트층의 깊이가 12m 이상 되는 지반으로서 최소강성 을 갖는 경우.

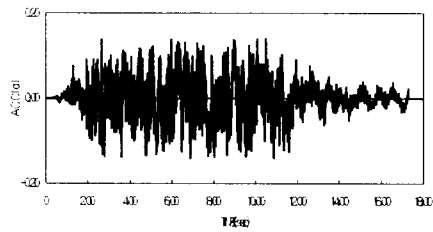
3.3 입력운동

단일모드 및 복합모드해석시에는 시방서에서 제시된 탄성지진응답계수에 의한 응답스펙트럼 값을 그대로 사용하였다.

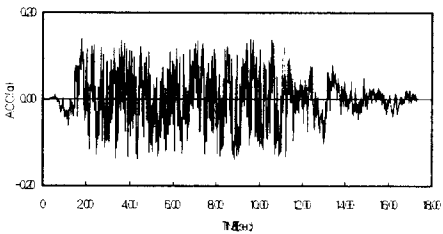
시간이력해석에 사용된 입력운동은 시방서에 제시된 응답스펙트럼에 부합되는 지진운동을 인공적으로 작성하여 사용하였다. 이때, 인공시간이력가속도의 작성은 Gasparini 와 Vanmarcke 가 제안한 정현파 중첩에 의한 인공시간이력작성법을 이용한 프로그램 SIMQKE (Simulated Earthquake)⁽⁵⁾를 이용하여 작성하였으며, 시방서에서 제시한 지반종류에 따라 작성된 인공시간이력과 인공시간이력가속도의 응답스펙트럼은 다음 그림 3, 그림 4 와 같다.



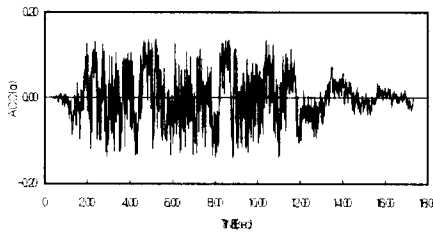
(가) 지반종류 I



(나) 지반종류 II

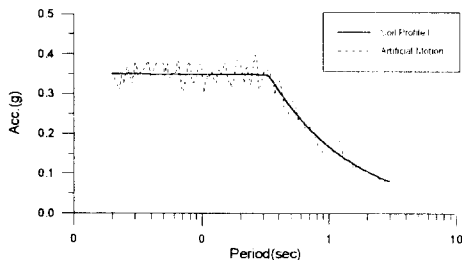


(다) 지반종류 III

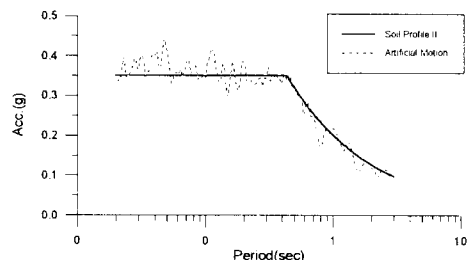


(라) 지반종류 IV

그림 3 SIMQKE 로 작성된 인공지진

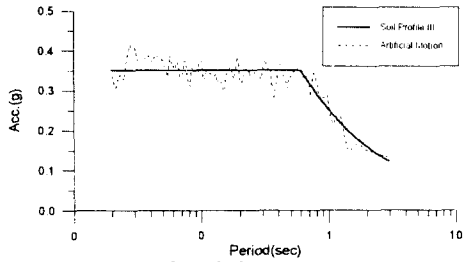


(가) 지반종류 I

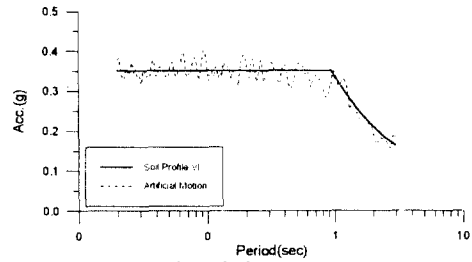


(나) 지반종류 II

그림 4. SIMQKE 로 작성된 인공지진의 응답스펙트럼(계속)



(다) 지반종류Ⅲ



(라) 지반종류Ⅳ

그림 4 SIMQKE 로 작성된 인공지진의 응답스펙트럼

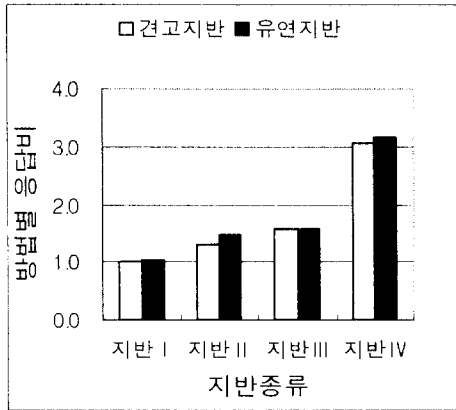
4. 해석결과 및 분석

전술한 세가지 방법에 의해서 4경간 힌지모델의 해석결과를 비교·분석하였다. 표 4과 그림 5는 4경간 힌지모델에 대한 해석결과를 요약한 것이다. 응답의 분석결과는 다음과 같다.

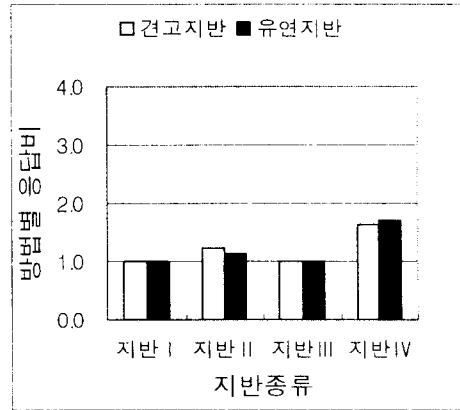
- 시방서에서 제시한 지반계수에 의한 방법은 시간이력해석에 비해 안전측 해석결과를 준다. 단, 상판의 경우 약간의 비안전측의 결과를 줄 수 있다.
- 동일지반으로 분류되는 서로다른 두지반의 응답차이가 시간이력해석의 경우 최대 45%인데 비하여 시방서방법의 경우에는 약 30%정도로서 과소평가 되고 있다.
- 지반의 유연성에 의한 지진응답의 영향 즉 지반종류별 응답비를 보면, 교각 단면력응답의 경우는 큰 차이를 보이지 않는 반면에, 상판의 단면력응답의 경우는 유연지반(지반종류Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ)이 고정지반(지반종류Ⅰ)에 비하여 최대 2.5배 이상의 큰 응답을 나타낸다.
- 특히, 변위응답의 경우는 유연지반의 응답이 고정지반의 응답에 비해 6배 이상의 과다한 응답을 줄 수 있다. 이와 같은 사실은 유연지반상 구조물의 지진응답계산을 위한 모델 작성시 지반의 영향을 반드시 고려해야 함을 시사하고 있다.

표 4 경우별 해석결과 비교

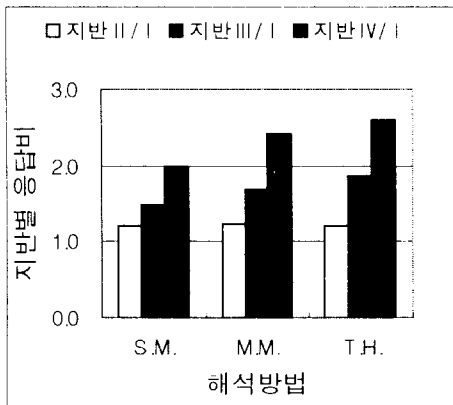
		방법별 응답비		동일지반으로 분류되는 지반에서 응답의 차이		지반종류에 따른 응답비		
		S.M./T.H.	M.M./T.H.	시방서	T.H.	Ⅱ/I	Ⅲ/I	Ⅳ/I
단 면 력	교각	3.15	1.70	22%	13%	0.84~1.16	0.97~1.00	0.65~1.12
	상판	2.23	1.27	23%	45%	0.77~1.23	1.02~1.87	1.22~2.60
변위		1.00	1.70	33%	43%	1.07~1.84	3.38~4.39	3.79~6.59



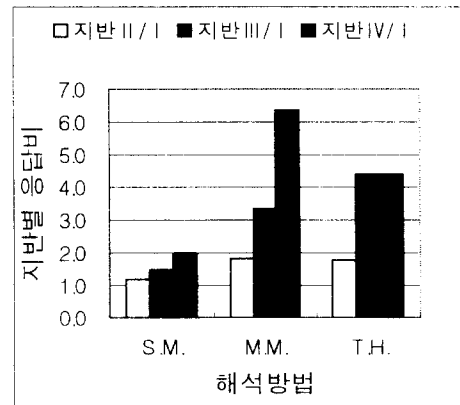
(가) 해석방법별 교각모멘트 응답비(S.M./T.H.)



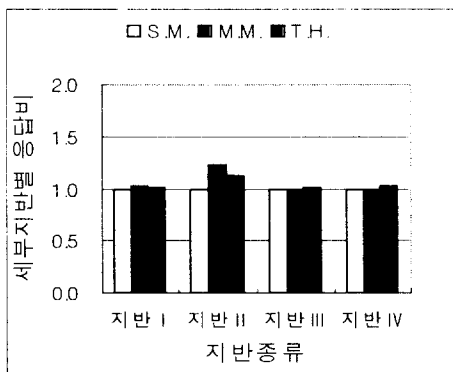
(나) 해석방법별 교각모멘트 응답비(M.M./T.H.)



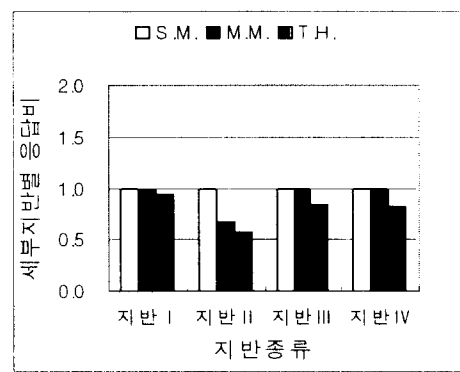
(다) 상관모멘트 응답의 지반별 응답비



(라) 변위응답의 지반별 응답비



(마) 교각의 동일지반내 세부지반 응답비 (견고지반/유연지반)



(바) 변위의 동일지반내 세부지반 응답비 (견고지반/유연지반)

그림 5 경우별 응답비교

5. 결 론

- 지반을 고려한 내진해석시, 시방서에서 제시한 단일모드해석 및 복합모드해석방법은 일반적으로 안전측(최고 시간이력해석의 3.15 배)의 결과를 준다. 단, 상판 모멘트응답의 경우 약간(약 20%정도)의 비안전측결과를 줄 수도 있다.
- 시방서에서 동일지반으로 분류되지만, 그 유연도가 다른 두지반의 응답을 비교해 볼 때 최대 45% 정도의 차이를 나타낼 수 있음을 확인하였다. 그러나, 시방서방법을 사용할 경우 이러한 응답의 차이가 과소평가(약 1/3 정도)될 가능성이 크다.
- 시방서에서 분류한 지반종류 I 에 대한 지반종류 II, 지반종류 III, 지반종류 IV의 응답비는 단면력의 경우 입력운동의 비인 1.2, 1.5, 2.0 보다 상대적으로 작은 경향을 보이는 반면에, 변위의 경우 상대적으로 큰 값을 보이고 있다. 따라서, 유연지반상 구조물의 지진해석시에는 지반의 영향이 반드시 고려되어야 하며, 특히 낙교방지를 위한 변위의 계산시에는 반드시 지반의 유연성을 고려한 정밀해석법을 사용할 필요가 있다.

6. 참고문헌

- (1) 건설교통부, 도로교표준시방서, 내진설계편, 1992
- (2) 조양희, 조인범, “ 지반상태가 교량의 지진응답에 미치는 영향 ”, 대한토목학회, 1996 년도 학술발표회 논문집, 1996.
- (3) 건설교통부, 도로교표준시방서, 내진설계편, 1996
- (4) George Gazetas, Analysis of Machine Foundation : state of the art, International Journal of Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 2, No. 1, pp. 19, 1983
- (5) SIMQKE : A Program for Artificial Motion Generation, User's Manual and Documentation, Dept. of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Nov. 1976