

등가선형 지반스프링모델을 사용한 교량의 지진응답해석

Seismic Response Analysis of Bridges

Using Equivalent Linear Soil/Foundation Spring Model

박형기*

Park, Hyung-Ghee

조양희*

Joe, Yang-Hee

신완철**

Shin, Oan-Chul

ABSTRACT

Seismic forces for member design of bridges may be determined by modifying elastic member forces induced by design earthquakes using appropriate response modification factors according to national design code of bridges. Modeling of soil/foundation system is one of the critical parameter in the process of elastic seismic analysis of bridge system which greatly affects on the analysis results.

In this paper, a simplified modelling procedure of soil/foundation system which gives practically reasonable results is presented and its applicability has been validated through example bridge. Based on the results, it has been shown that the procedure is acceptable in modelling soil/foundation system for practical seismic analysis of bridges.

1. 서론

국내 도로교의 내진설계에 관한 기준으로 1992년에 개정된 도로교표준시방서에 내진설계편이 신설된 후, 이 분야에 많은 연구와 기술적 발전이 있어왔다. 1995년 12월에 개정된 자연재해대책법에서는 지진이 발생할 경우 재해를 입을 우려가 있는 도로법에 의한 도로시설을 포함해서 17개의 각종 시설에 대해서 내진설계기준을 제정하여 시행하도록 규정하고 있다. 현행 도로교설계기준⁽¹⁾에 의하면 탄성지진력을 구한 다음, 하부구조의 형식 또는 연결 부분에 따른 응답수정계수를 적용하여 설계지진력을 결정할 수 있다. 이러한 경우에 지반과 기초의 영향을 고려할 수 있도록 교량 구조해석모델을 작성하는 것이 바람직하며, 그 결과로써 경제적인

* 인천대학교 토목환경시스템공학과 교수, 정회원

** 인천대학교 토목환경시스템공학과 석사과정, 학생회원

설계가 이루어질 수도 있다. 이를 위해서는 지반과 기초의 강성을 고려함에 있어서 먼저 지반과 기초에 내포된 불확실성이 교량의 안전에 악영향을 미치지 않도록 타당성 있고 안전측의 가정을 세워야 한다.

이 연구에서는 지반모델로 사용될 지반 선형스프링상수 계산 절차와 그에 수반되는 가정사항을 제시하였다. 제안된 절차에서는 기초지반의 등가 선형스프링상수로서 진동수에 무관한 지반의 임피던스 값을 계산하고, 말뚝기초로 연약지반을 보강하게 되는 경우에는 현장 동적시험으로 얻은 말뚝-지반의 상호작용이 고려된 지반반력-변위(p-y)곡선으로부터 말뚝기초-지반의 강성을 계산한다. 보강이 필요하지 않는 지반에서는 기초아래의 지반강성만을, 보강이 필요한 지반에서는 지반강성과 말뚝기초-지반의 강성을 함께 고려하여 기초지반의 등가 선형스프링상수를 계산한다. 교량의 상하부구조의 부재력을 구할 때는 말뚝기초-지반 강성의 상한치가 고려되고, 변위를 구할 때에는 말뚝기초-지반 강성의 하한치를 고려한다. 기초지반의 강성 계산에는 도로교설계기준에 제시된 탄성지진응답계수를 만족시키는 가속도시간이력을 사용한 지반응답해석 결과로 얻어진 지반의 동적전단계수를 사용한다.

2. 입력운동과 지반응답해석

내진설계를 위한 설계하중 결정에 쓰이는 탄성지진응답계수를 만족시키는 그림 1과 같은 가속도시간이력을 사용하여 1차원 파전달이론에 의한 등가선형법⁽²⁾으로 수행한 지반응답해석으로 기반암 위치에서의 가속도시간이력을 구하여 그림 2에 보인 각 지반에 대한 지반응답해석의 입력운동으로 사용한다. 지반응답해석 결과로 기반암 위치에서 얻어진 가속도시간이력의 응답스펙트럼은 지표면 위치에서의 가속도시간이력인 그림 1의 응답스펙트럼과 함께 그림 3에 보였다. 지반응답해석에서 고려된 지반의 전단계수의 비선형성은 그림 4에 보인 바와 같다.

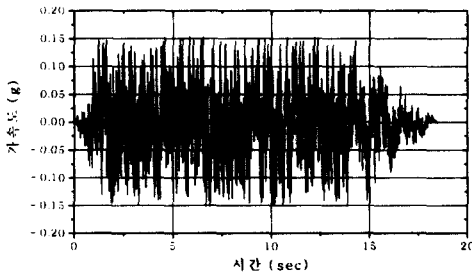


그림 1 지반종류 I의 탄성지진응답계수를 만족시키는 가속도시간이력

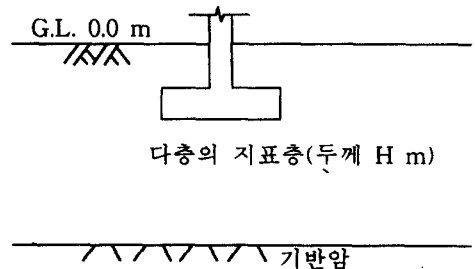


그림 2 교각이 놓이는 위치의 지반상태

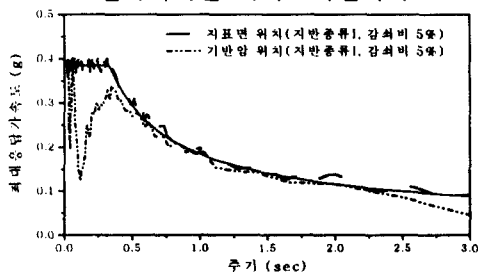


그림 3 설계지진의 가속도응답스펙트럼

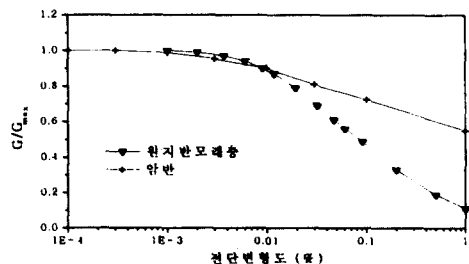


그림 4 지반별 전단계수-전단변형도곡선

3. 지반의 등가 선형스프링상수 계산

지반모델로 사용될 지반 선형스프링상수 계산 절차는 그림 5에 보인 바와 같으며, 교량의 상하부구조의 부재력을 구하고자 할 때에는 말뚝기초-지반 강성의 상한치를 고려하고, 변위를 계산하고자 할 때에는 하한치를 사용한다.

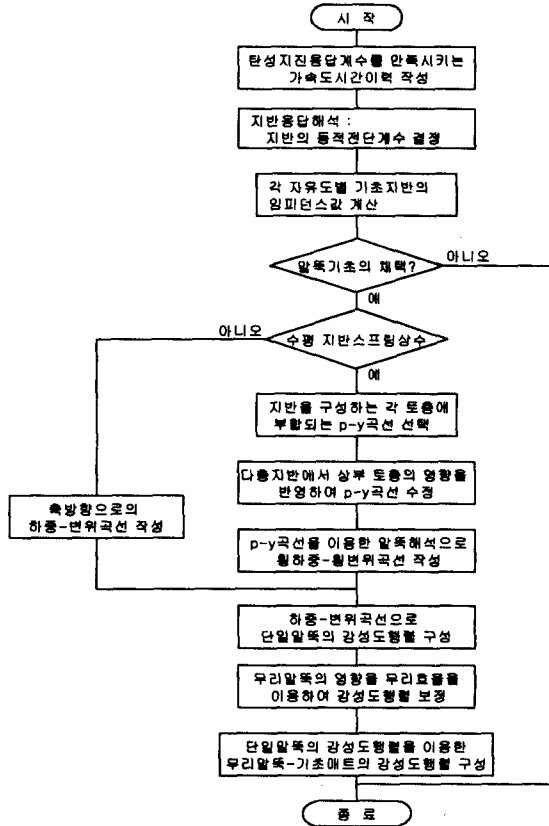


그림 5 지반 선형스프링상수 계산 절차

3.1 기초지반의 강성도

3축방향의 이동자유도 및 3축에 대한 회전자유도에 대한 기초지반의 강성도를 다음과 같이 계산하고 수직방향 자유도와 비틀림 자유도 사이에는 상호 독립적이고, 2개의 수평 이동자유도와 회전자유도사이에는 상호 연계시킨다.

강성도 계산⁽³⁾은

$$K = \alpha \beta K_0 \quad (1)$$

여기서 α = 기초의 형상계수⁽⁶⁾(원형 단면적을 가지는 기초의 경우는 $\alpha = 1$)

β = 기초의 근입계수⁽⁶⁾

K_0 = 등가반경으로 계산된 강성도

이다. 각 자유도별 K_0 는 표 1에 보인바와 같다.

표 1 각 자유도별 강성도 계산식

자유도	강성도	비고
수직방향	$K_0 = \frac{4GR}{1-\nu}$	
수평방향	$K_0 = \frac{8GR}{2-\nu}$	
비틀림	$K_0 = \frac{16GR^3}{3}$	
회전	$K_0 = \frac{8GR^3}{3(1-\nu)}$	

주) G : 동적전단계수

R : 반경(또는 직사각형 기초의 경우는 등가반경⁽⁶⁾)

ν : 포아송비

3.2 말뚝기초-지반의 강성도

(1) 수평하중에 대한 등가 선형스프링상수 계산을 위한 가정

단일말뚝-지반시스템을 일련의 탄성스프링으로 지지된 보-기둥요소로 모델하여 얻은 하중-변위곡선으로부터 말뚝과 말뚝캡의 연결 위치에서 6 자유도성분에 해당되는 이동자유도 및 회전자유도에 대한 등가 선형스프링으로 나타난 말뚝기초-지반의 등가 강성도행렬을 결정한 다음, 중첩의 방법으로 무리말뚝-기초매트의 강성도행렬을 구한다.

이러한 강성도행렬 계산과정에서는 지반의 비선형 거동특성을 고려하며, 횡방향 지반반력이 말뚝직경의 5~10배의 심도에서 집중분포하고 축방향 지반반력은 이 보다 깊은 깊이 또는 선단지말뚝인 경우는 말뚝선단에서 발생^{(3),(4)}되므로 축방향력과 횡방향력에 의한 말뚝거동해석을 분리시켜 수행한다. 또한 말뚝머리 부근의 얇은 깊이의 지반은 수동토압 파괴상태에 놓이는 것으로 한다.

교량 상하부구조의 부재력을 구하고자 할 경우는 지반의 스프링상수가 상한치가 되도록 다음과 같이 가정을 한다.

- ① 지진시 기초지반에서 액상화가 발생하지 않는다.
- ② p-y곡선에서의 초기접선강성을 적용한다.
- ③ 기초지반의 강성도와 말뚝기초-지반의 강성도가 모두 유효하다.
- ④ 말뚝머리 경계조건을 회전자유도가 구속된 것으로 가정한다.
- ⑤ 무리말뚝의 영향을 고려한다.

기초매트 위치의 횡변위량과 상부구조의 횡변위량을 구하고자할 경우는 지반의 스프링상수가 하한치가 되도록 다음과 같이 가정한다.

- ① 액상화가 발생된 토층을 말뚝기초-지반의 강성 평가시에 무시한다.

- ② 실제로 상시로 작용하게 되는 하중 크기에 해당되는 활선강성과 일치하는 선형 지반반력 계수를 말뚝기초-지반의 강성도 계산에 사용한다.
- ③ 준공후 지반의 침하, 잠재적 액상화 발생 등에 의한 기초매트 저면과 지반의 분리 가능성을 고려하여 기초지반의 강성은 무시한다.
- ④ 말뚝머리 경계조건을 힌지로 가정한다.
- ⑤ 무리말뚝효과를 고려한다.

(2) 지반반력-변위곡선을 이용한 말뚝해석

수평하중에 의하여 말뚝의 변위가 커지면 지반반력이 항복치에 도달하게 된다. 이러한 지반에서의 말뚝의 횡변위와 지반반력 사이에 일반적인 관계는 비선형성을 보인다. 이 연구에서는 이러한 비선형성을 고려 할 수 있는 해석 방법인 Reese 등의 연구에 의한 소위 "지반반력-횡변위 ($p-y$)곡선"을 이용한다.⁽⁵⁾

Reese 등은 말뚝을 선형 탄성 보-기둥요소라는 가정하에 일련의 탄성 스프링으로 지지된 그림 6과 같은 말뚝의 미분방정식을 식(2)와 같이 제시하였다.

$$E_p I_p \frac{d^4 y}{dz^4} + P_z \frac{d^2 y}{dz^2} + p = 0 \quad (2)$$

여기서 $E_p I_p$ = 말뚝의 휨강성

P_z = 말뚝머리에 작용하는 축하중

p = 말뚝 단위길이당 지반반력으로 $p = ky$ 이고, 지반계수 k 는 $p-y$ 곡선으로부터 구해진다.

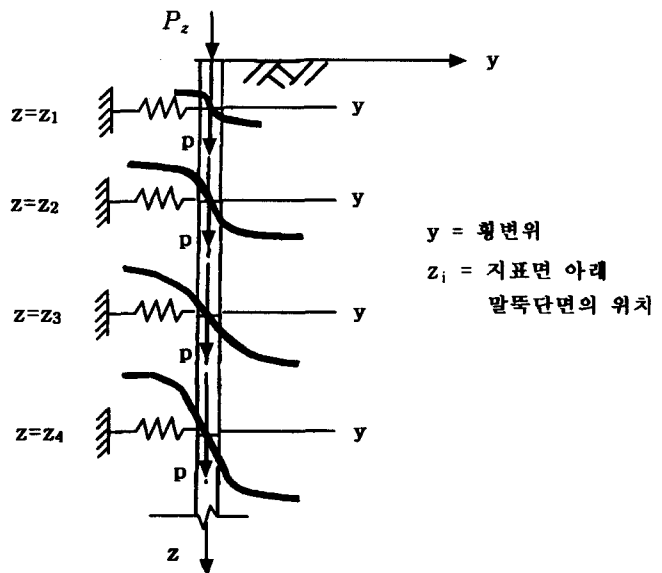


그림 6 말뚝의 지표면 하의 깊이에 따라 보인 일련의 $p-y$ 곡선의 개형

(3) 단일말뚝 강성도행렬의 결정

수평방향 이동자유도와 수평축에 대한 회전자유도가 연계되므로 말뚝머리와 상부구조의 연결상태가 말뚝기초 전체의 횡방향 강성도 특성 및 말뚝본체의 휨모멘트 및 응력분포특성에 큰 영향을 미친다. 연결상태를 경계조건으로 고려하여 단일말뚝의 말뚝-지반 상호작용을 나타내는 미분방정식⁽²⁾를 해석하여 얻어진 횡하중-변위곡선을 이용하여 시행착오법에 의하여 실제 처짐에 상응하는 횡하중을 구하여 두 수평방향 이동자유도에 대한 등가 선형스프링상수로 취한다.

두 수평축의 회전자유도에 대한 등가 선형스프링상수는 무리말뚝기초 중앙에서 외측에 위치한 말뚝까지의 거리와 축하중-축변위곡선에서 실제 작용하중 수준인 축방향하중에 대한 변위로 구한 회전각을 이용하여 구해진다. 말뚝머리에서 횡변위가 발생되지 않는 경계조건과 앞서 구해진 회전각이 가해졌을 때의 모멘트가 회전자유도에 대한 강성도가 된다.

연직방향 자유도에 대한 등가 선형스프링상수는 말뚝의 선단지지력과 주변마찰력, 탄성축변형을 고려한 극한 지지력의 1/3 ~ 1/2에 해당하는 축하중과 축변위로부터 구한다. 이 때 비의 값은 실제 작용하는 하중의 크기를 고려하여 정한다.

(4) 무리말뚝-기초매트의 강성도행렬

무리말뚝을 구성하는 개별 단일말뚝의 강성도 특성과 말뚝수, 상부구조물과의 연결상태 및 말뚝머리의 위치 등이 무리말뚝-기초매트의 강성도행렬에 영향을 미친다. 무리말뚝-기초매트의 강성도행렬을 구하는 절차는 상부구조 하중의 전달점(기초매트 상면과 하부구조의 연결위치)에서 각 자유도 성분에 대하여 단위변형을 유발할 때 개별 단일말뚝에 유발되는 저항력을 그림 7과 같이 중첩하는 방법으로 구한다.

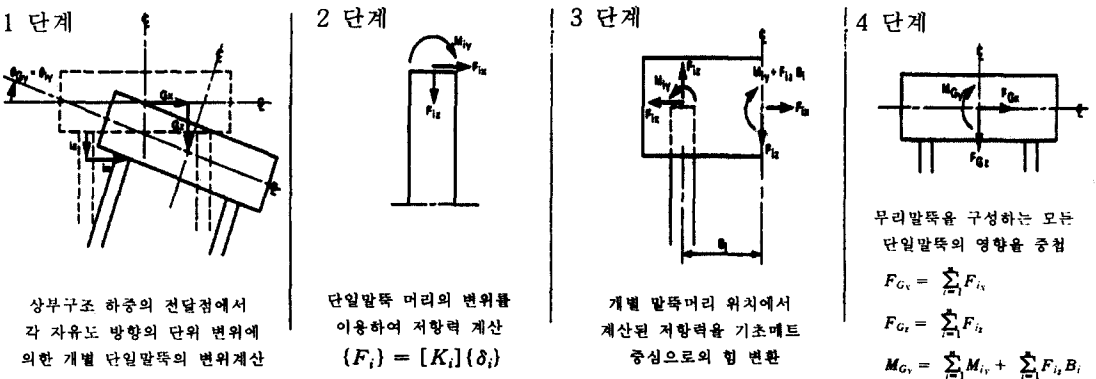


그림 7 무리말뚝-기초매트의 강성도행렬

4. 제시된 절차의 적용성

제안된 지반모델링 방법을 적용하여 그림 8에 보인 2경간 연속 PSC합성거더교에 대해 지진 응답해석을 수행하였다.

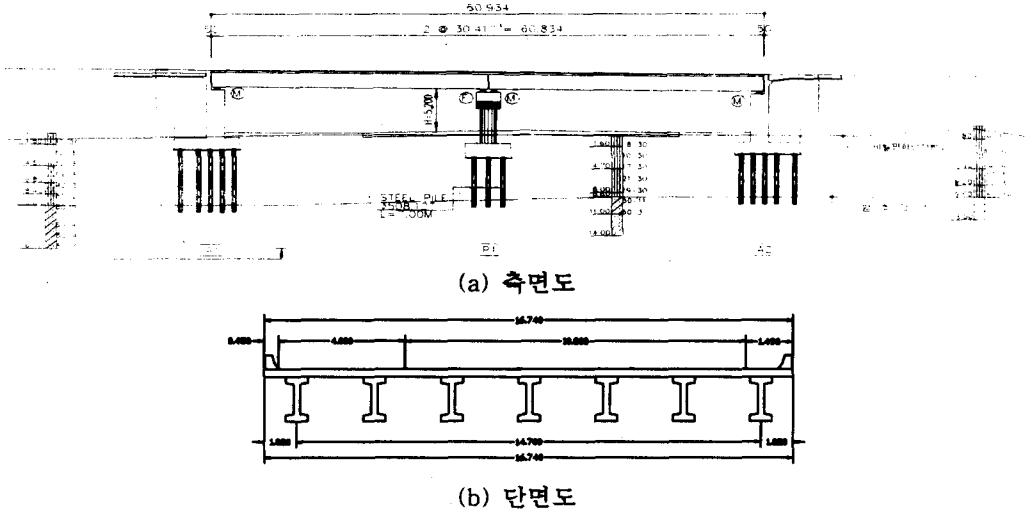


그림 8 2경간 연속 PSC 합성거더교

4.1 예제 교량에 대한 지진응답해석

그림 8에 보인 교각 위치에서의 지표층 구성을 그림 9와 같이 지반 구성을 이상화시키고, 도로교설계기준⁽¹⁾을 만족시키는 가속도시간이력을 작성하여 지반응답해석을 수행하였다. 그 결과로 표 2와 같이 지반의 고유주기와 토층별로 동적전단계수를 얻을 수 있었다.

G.L. -0 m	I 실트질 모래		
G.L. -1.6 m	II 풍화토	$N=8$	$\gamma=1.899 \text{ t/m}^3$ $\phi=30^\circ$
G.L. -3.099 m	III 풍화토	$N=12$	$\gamma=1.899 \text{ t/m}^3$ $\phi=30^\circ$
G.L. -4.699 m	IV 실트질 모래	$N=14$	$\gamma=1.899 \text{ t/m}^3$ $\phi=35^\circ$
G.L. -8.636 m	V 풍화암	$N=19$	$\gamma=1.899 \text{ t/m}^3$ $\phi=38^\circ$
		$N=80$ 이상	$\gamma=2.1 \text{ t/m}^3$

그림 9 교각위치에 대한 지반응답해석을 위한 지반구성 상태의 이상화

표 2 지반응답해석으로 얻어진 지반의 고유주기와 동적전단계수

표층번호	유효전단응력 (t/m^2)	G/G_{\max}	고유주기 (sec)
I	0.8	0.856	0.19
II	2.26	0.58	
III	3.5	0.484	
IV	4.83	0.601	

그림 10에 보인 동적해석모델에 지반모델로서 교각의 기초매트 위치에 연결시킬 지반의 등가 선형스프링상수를 제안된 절차에 의해 계산한 결과는 그림 11에 보인 바와 같으며, 이때 말뚝기초-지반강성의 하한치계산에서 역상화는 발생하지 않는 것으로 고려되었다. 그림 10의 해석모델을 사용하여 다중모드스펙트럼해석법으로 고유주기와 변위를 구한 결과를 표 3에 정리하여 보였다.

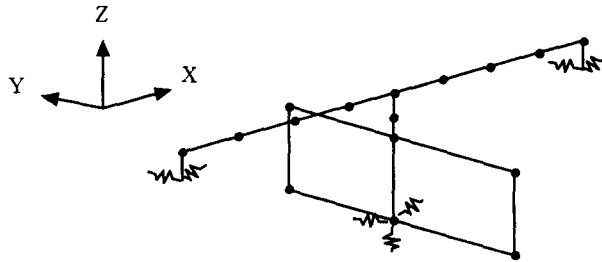


그림 10 2경간 연속 PSC합성거더교의 동적해석모델

$$[K] = \begin{bmatrix} 3.971 & 0 & 0 & 0 & -19.246 & 0 \\ 0 & 3.744 & 0 & 19.246 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 160.959 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 19.246 & 0 & 9448.416 & 0 & 0 \\ -196246 & 0 & 0 & 0 & 1114.343 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3529.909 \end{bmatrix} \times 10^4$$

(a) 상한치

$$[K] = \begin{bmatrix} 2.725 & 0 & 0 & 0 & -8.056 & 0 \\ 0 & 2.725 & 0 & 8.056 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 133.721 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 8.056 & 0 & 6425.262 & 0 & 0 \\ -8.056 & 0 & 0 & 0 & 337.104 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 136.524 \end{bmatrix} \times 10^4$$

(b) 하한치

그림 11 무리말뚝 - 기초매트의 강성도행렬

표 3 2경간 연속 PSC합성거더교에 대한 동적해석 결과

(a) 고유주기

단위(sec)

	고정지반	지반강성 상한치	지반강성 하한치
교축방향	1.223	1.226	1.254
교축직각방향	1.144	1.146	1.168

(b) 횡변위량

단위(cm)

		고정지반	지반강성 상한치	지반강성 하한치
교각 기초매트	교축방향	0	0.0690	1.007
	교축직각방향	0	0.0665	0.870
교대 받침부	교축방향	9.06	9.11	9.6
	교축직각방향	8.25	8.29	8.67

4.2 적용성에 대한 고찰

실제로 제안된 지반모델링 방법을 예제의 교량에 적용한 결과를 고정지반의 경우와 비교 고찰하면, 교축 및 교축직각방향으로의 교량-지반시스템의 고유진동수가 타당한 값을 판단할

수 있다. 또한 기초매트 위치에서의 횡변위와 상부구조의 횡변위가 합리적으로 얻어지게 되어 말뚝본체의 응력검토와 형유간 확보에 이용하면 교량의 내진성이 보장될 수 있을 것으로 생각된다.

5. 결론

교량의 지진응답해석모델 작성에 지반모델로서 사용할 수 있는 선형스프링을 선정하는 절차를 제시하고, 적용성과 타당성을 예제의 교량을 해석하여 검증하였다. 절차에서 중요한 점은 지진에 대한 교량의 안전성을 보장할 수 있도록 구하고자 하는 부재력 또는 변위량에 따라 지반 강성도를 다른 가정하에서 계산하도록 하는 것이다.

제안된 절차에 따라 지반모델로서 사용될 선형스프링이 결정되어 해석에 사용된다면, 현행 도로교설계기준의 취지도 만족시키고 경우에 따라서는 경제적인 이점을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 한국도로교통협회, 도로교설계기준, 2000.
2. 박형기(1995), "층상지반 내 수직이동 수평지진파의 해석", 인천대학교, 공업개발연구소 연구논문집, 제10집, 제1권.
3. Earth Technology Corp.(1986), "Seismic Design of Highway Bridge Foundation, Vol. II:Design Procedures and Guidelines", Report No. FHWA/RD-86/102.
4. 한국전산구조공학회(1993), '교량의 내진설계', 제 8회 전산구조공학회 기술강습회 교재 8-3.
5. Reese, L.C., Cooley, L.A. and Radhakrishman, N.(1984), "Laterally Loaded Piles and Computer Program COM624G", U.S. Army Engineering Div., Technical Report K-84-2.
6. 건설교통부, 도로교표준시방서 제5편 내진설계편, 1996.