

RESPUESTA SÍSMICA DE ESTRUCTURAS LONGITUDINALES ENTERRADAS

por

CONTRERAS RODRIGO JOAQUÍN

Ingeniero Civil, UNCo 2012

TRABAJO FINAL PRESENTADO A LA
FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS, FÍSICAS Y NATURALES
EN CUMPLIMIENTO PARCIAL DE LOS REQUERIMIENTOS PARA EL GRADO
DE

MAGÍSTER EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
MENCIÓN: ESTRUCTURAS Y GEOTECNIA

en la

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CÓRDOBA



Noviembre, 2016

RESUMEN

La ingeniería como disciplina científica utiliza modelos matemáticos para la aproximación y el estudio de fenómenos físicos. Con el desarrollo de tales modelos es posible acceder a soluciones que permiten ampliar el conocimiento y que ayudan a mejorar la toma de decisiones en la práctica diaria. Dado que en todo modelo se asumen hipótesis que limitan el campo de validez de sus soluciones, siempre existirán situaciones del campo real que no puedan ajustarse a las hipótesis de los modelos clásicos adoptados por las soluciones difundidas en bibliografía. Concentrando el estudio a problemas de respuesta sísmica de estructuras longitudinales enterradas, los antecedentes en el área muestran que las soluciones propuestas en la bibliografía actual adoptan la teoría de Euler-Bernoulli de viga sobre fundación elástica y que modelan a la acción sísmica como una onda simple, como aproximación al fenómeno físico. Así desarrolladas, estas soluciones son incapaces de resolver casos en los que la estructura sea no esbelta y/o el medio que la contiene no admita rotaciones.

El presente trabajo expone una formulación analítico-numérica de un elemento de viga sobre fundación elástica que incluye deformaciones de corte y restricciones rotacionales, para la modelación de problemas de interacción cinemática de túneles y chimeneas solicitados por ondas sísmicas. La formulación utiliza un modelo de propagación de ondas para la determinación de la respuesta del medio. De esta manera, el trabajo se limita al estudio del comportamiento estructural en el eje longitudinal, no incluyendo el análisis de deformaciones contenidas en el plano de la sección transversal. Con premisas similares se presenta también la formulación analítica de una solución particular para una onda de corte simple. El objetivo del desarrollo apunta a ampliar el campo de aplicación de las soluciones clásicas.

Los resultados provistos por las soluciones desarrolladas en este trabajo demostraron que éstas contienen como caso particular a las soluciones publicadas en la literatura y que además pueden representar correctamente casos en los que existan deformaciones estructurales de corte y restricciones rotacionales debido a la interacción con el terreno.

El trabajo ilustra además la influencia que tiene en los resultados finales la metodología de aproximación a la respuesta real del medio ante la excitación sísmica, evidenciando la versatilidad de los modelos discretos de propagación de onda en contraste con los modelos analíticos de onda simple.

Palabras claves: Respuesta sísmica, interacción cinemática, estructuras longitudinales enterradas, ondas sísmicas.

ABSTRACT

Mathematical models are often used in engineering in order to approach and study physical phenomena. With the development of such models, the engineer can access solutions that provide further insight and help to improve the decision-making process in routine practice. Since every model considers hypotheses that limit the range of validity of the solutions, there will always be actual field situations that cannot conform to the assumptions of classical models adopted by the solutions provided in the technical literature. Considering the particular case of seismic response of longitudinal buried structures, the state-of-the-practice in the subject shows that the solutions proposed in the literature consider the Euler-Bernoulli theory for beams on elastic foundations, and model the seismic action as a simple wave, as an approximation to the actual phenomenon. Accordingly, these solutions are unable to represent cases where the structure cannot be considered as slender and/or the ground provides rotation restrains.

This thesis presents a numerical-analytical formulation for a beam on elastic foundation that includes shear deformations and rotational restrains for modeling the kinematic interaction of tunnels and chimneys subjected to seismic waves. The formulation considers a wave propagation model for the determination of the ground response. Thus, the work is limited to the study of the structural behavior in the longitudinal axis, not including the analysis of deformations contained in the cross section of the structure. An analytical formulation is presented for a particular solution of a tunnel subjected to a simple shear wave. The purpose of the present work is to expand the scope of the classical solutions currently used in practice.

The results obtained by means of the proposed solutions show that the solutions published in the literature are particular cases of the proposed formula, which can also represent cases where structural shear deformations and rotational restrictions due to interaction with the ground are not negligible.

This thesis also shows the influence of the simplifying assumptions on the final results and illustrates the versatility of discrete wave propagation models in contrast to simple wave models.

Keywords: Seismic response, kinematic interaction, longitudinal buried structures, seismic waves.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi tutor Dr. Ing. Federico Pinto por haber confiado en mí, por su paciencia, sus consejos y por la dirección de este trabajo. A mis profesores de la Universidad Nacional de Córdoba por su disposición y amabilidad durante el aprendizaje.

A mis amigos por motivarme siempre. A mi familia, mis hermanos Gastón, Ramiro y Gonzalo por su comprensión y compañía; a mis padres José y Rosa por su apoyo incondicional, su amor y por mostrarme que todo puede ser de otra manera; y a mi novia Melisa por ser mi gran compañera.

Gracias a todos.

Índice General

1. Introducción.....	1
1.1 Introducción	1
2. Antecedentes	5
2.1 Introducción	5
2.2 Respuesta sísmica de túneles	7
2.2.1 Vulnerabilidad sísmica de túneles	7
2.2.2 Análisis sísmico - Planteo ingenieril	8
Definición del ambiente sísmico	10
Evaluación de la respuesta del medio a la excitación sísmica	13
Evaluación del comportamiento de la estructura frente a sismo.....	13
2.2.3 Respuesta de la estructura subterránea a deformaciones del medio	13
Método de deformaciones de campo libre, CL	14
Planteo de interacción suelo-estructura, SSI.....	18
2.3 Metodología de análisis.....	22
2.3.1 Fenómenos de interacción	23
2.3.2 Método de análisis por superposición - Interacción cinemática	24
2.4 Teoría estructural y modelo de interacción	27
2.4.1 Teoría de vigas de Timoshenko	27
Factor de corrección por corte ó coeficiente de forma, κ	30
2.4.2 Reacción del medio. Modelo de resortes de Winkler	31
2.4.3 Viga de Timoshenko sobre fundación elástica	32
2.5 Reacción dinámica del medio - Coeficientes de Novak.....	33
3. Respuesta de Estructuras Lineales Enterradas	37
3.1 Introducción	37
3.2 Formulación del elemento de viga de Timoshenko sobre fundación elástica con rigidez rotacional.	37
3.2.1 Ecuación de comportamiento. Solución analítica del elemento	38
3.2.2 Longitud característica, L_c . Solución analítica	40
3.2.3 Ecuación de comportamiento. Solución numérica propuesta, SNU	42

Efecto de bloqueo – Integración reducida	44
Matrices de rigidez y vector de carga	46
3.3 Validación del modelo propuesto	47
3.3.1 Metodología y rango de validación	47
3.3.2 Determinación de los parámetros del problema	48
3.3.3 Condicionamiento numérico debido al tipo de comportamiento	51
3.4 Ecuación de comportamiento. Propuesta de solución exacta	51
3.4.1 Solución analítica cerrada, SAC.....	51
Solución particular de la ecuación de movimiento.....	53
Solución homogénea de la ecuación de movimiento.....	55
Condiciones de contorno y solución general de la ecuación de movimiento.....	55
Deformaciones de corte y curvatura debidas a sismo.....	57
Criterio de selección de los parámetros sísmicos, ω_s y k_s	57
4. Respuesta Sísmica. Interacción Cinemática	59
4.1 Introducción.....	59
4.2 Análisis de riesgo sísmico	59
4.3 Deconvolución.....	61
4.4 Propagación unidimensional de ondas – Sistemas discretos	64
4.4.1 Modelo discreto de propagación de ondas - Respuesta del medio.....	64
Amortiguamiento material del medio semi-infinito superior	67
Amortiguamiento por radiación del medio semi-infinito subyacente	68
4.5 Perfil de Desplazamientos de Campo Libre, u_{ff}	70
4.6 Ejemplos de aplicación – Desplazamientos de campo libre, u_{ff}	71
4.6.1 Sismo El Centro – Acelerograma y Espectro de Respuesta.....	72
4.6.2 Caracterización del medio semi-infinito - Propagación de onda	73
Caso A) Medio: material heterogéneo de 30m de profundidad.....	73
Caso B) Medio: material homogéneo de 500m de profundidad.....	75
4.6.3 Perfil de desplazamientos de campo libre - u_{ff}	75
Caso A) Medio: material heterogéneo de 30m de profundidad.....	75
Caso B) Medio: material homogéneo de 500m de profundidad.....	78
4.7 Consideraciones de los ejemplos de aplicación.....	79

5. Ejemplos de aplicación del análisis propuesto	81
5.1 Introducción	81
5.2 Modelo de análisis.....	82
5.3 Evaluación de soluciones con respuesta sísmica de onda simple	84
5.3.1 Solución analítica exacta vs Solución de deformaciones de campo libre.....	85
Modelo con rigidez a corte infinitamente grande y rigidez rotacional del medio nula...	85
Modelo con baja rigidez a corte y rigidez rotacional del medio infinitamente grande...	86
5.3.2 Solución analítica exacta vs Solución con interacción medio-estructura	87
Modelo con rigidez a corte infinitamente grande y rigidez rotacional del medio nula...	87
5.3.3 Solución general con respuesta sísmica de onda simple.....	88
5.3.4 Conclusiones – Soluciones con respuesta sísmica de onda simple	89
5.4 Evaluación de soluciones con respuesta sísmica de sitio	89
5.4.1 Solución numérica vs Solución analítica exacta.....	90
5.4.2 Conclusiones – Soluciones con respuesta sísmica de sitio	93
5.5 Conclusiones del capítulo.	94
6. Conclusiones y observaciones finales	97
Anexo 1	101
A.1 Estudio del comportamiento de la estructura	101
Referencias.....	105