

Secretario de Gobernación

Esteban Moctezuma Barragán

Subsecretario de Protección Civil y de  
Prevención y Readaptación Social

Lic Humberto Lira Mora

Director General del CENAPRED

Arq Vicente Pérez Carabias

Jefe del Equipo Japonés en el CENAPRED

Dr Tatsuo Murota

Coordinador de Investigación del CENAPRED

Dr Roberto Meli

Coordinador de Difusión del CENAPRED

Lic Ricardo Cícero Betancourt

Edición a cargo de Violeta Ramos Radilla y  
Javier Lara Espinosa

PUBLICADO POR EL CENTRO NACIONAL DE  
PREVENCIÓN DE DESASTRES DE LA  
SECRETARÍA DE GOBERNACIÓN

Distribución en México Coordinación de Enlace  
Nacional

Distribución en el Exterior Coordinación de Asuntos  
Internacionales

EL CONTENIDO DE ESTE DOCUMENTO ES  
EXCLUSIVA RESPONSABILIDAD DE LOS  
AUTORES

Julio - 1994, No 9

## Sistema Nacional de Protección Civil

### ● DIRECTORIO DEL CENAPRED

DIRECCIÓN GENERAL Arq. Vicente Pérez Carabias, COORDINACIÓN DE INVESTIGACIÓN Dr. Roberto Meli Piralla  
COORDINACIÓN DE CAPACITACIÓN Lic. Gloria Luz Ortiz Espejel, COORDINACIÓN DE DIFUSIÓN Lic. Ricardo Cícero Betancourt  
COORDINACIÓN DE ENLACE NACIONAL Lic. Alberto Ruiz de la Peña, COORDINACIÓN DE ASUNTOS INTERNACIONALES Lic.  
Enrique Solorzano Mier, COORDINACIÓN DE PROGRAMAS Y NORMAS Lic. Federico Miguel Vázquez Juárez, COORDINACIÓN  
ADMINISTRATIVA C. P. Alfonso Macías Flores

SISTEMA NACIONAL DE PROTECCION CIVIL  
CENTRO NACIONAL DE PREVENCION DE DESASTRES

INVESTIGACIONES SOBRE SISMOLOGIA  
E INGENIERIA SISMICA EN EL JAPON

APPLICATION OF FEM  
(FINITE ELEMENT METHOD)  
TO RC (REINFORCED CONCRETE) STRUCTURES

Hiroshi Noguchi

COORDINACION DE INVESTIGACION  
AREA DE ENSAYES SISMICOS

# CUADERNOS DE INVESTIGACION

Investigaciones sobre Sismología e Ingeniería Sísmica en el Japón

## P R E S E N T A C I O N

---

Una de las aportaciones más importantes de la parte japonesa dentro del Convenio de Cooperación Técnica entre la Agencia de Cooperación Internacional del Japón (JICA) y el Centro Nacional de Prevención de Desastres es el envío de expertos de corto plazo. Dentro de las actividades de estos expertos están la asesoría en aspectos específicos de proyectos de investigación, la impartición de seminarios y conferencias, y la participación en eventos técnicos.

En las numerosas conferencias dictadas desde que se inició el Convenio en 1990, se han presentado resultados y experiencias en líneas actuales de investigación y desarrollo tecnológico en materia de prevención de desastres sísmicos en el Japón.

Con objeto de dejar un testimonio permanente del contenido de las conferencias más sobresalientes y de mayor interés para la comunidad ingenieril y científica, el CENAPRED ha emprendido la publicación de esta serie como parte de los Cuadernos de Investigación.

## CONTENIDO

PROLOGO

APPLICATION OF FEM TO RC STRUCTURES ..... i

NOTA BIOGRAFICA DE H. NOGUCHI ..... 98

## PROLOGO

El desarrollo reciente y acelerado de las computadoras digitales y de criterios de comportamiento de materiales, basados en resultados de ensayos de laboratorio, ha conducido a la realización de una gran cantidad de estudios analíticos. Entre ellos destacan los que han aplicado el Método del Elemento Finito (MEF).

En esta publicación, H. Noguchi discute las aplicaciones del MEF para analizar estructuras de concreto reforzado. En la primera parte, Noguchi introduce al lector, de manera formal aunque relativamente simple, en los conceptos básicos de análisis de este tipo de estructuras. La descripción secuencial de los criterios de modelado pone en evidencia el refinamiento experimentado y el consecuente mejoramiento en la precisión de los cálculos cuando éstos se comparan con resultados experimentales. La interacción de los mecanismos de resistencia a cortante (transferencia de cortante a través de grietas, acción de dovela, adherencia y anclaje) en elementos de concreto reforzado es discutida e ilustrada mediante resultados de análisis. El empleo del MEF para estudiar el comportamiento de elementos de concreto, para los cuales los efectos del cortante son importantes, pone de manifiesto el potencial del método para extender los resultados experimentales. Con él se puede evaluar el efecto de las variables más significativas de un fenómeno, así como cuantificar la interacción de los diferentes mecanismos resistentes. Lo anterior permite reducir el número de ensayos de laboratorio lo que evidentemente conduce a proyectos más baratos y eficientes. Un ejemplo de ello es el programa de análisis de estructuras de concreto reforzado con materiales de alta resistencia. En este proyecto, de la comparación de los resultados experimentales y analíticos, se verificaron e incluso se modificaron algunas conclusiones obtenidas de los ensayos. Noguchi explica sucintamente, aunque con éxito, los parámetros que afectan significativamente la precisión de los resultados obtenidos del análisis.

Como se señala en el texto, el MEF no sólo es una herramienta poderosa para académicos; también es útil para ingenieros estructuristas. Un uso correcto del MEF facilita la visualización del flujo de fuerzas en las estructuras que es dato fundamental para el diseño. Sin embargo, los análisis (aun elásticos) deben realizarse y evaluarse con plena conciencia. Los ingenieros estructuristas que usan (e inclusive “abusan”) este método no deben perder de vista que un análisis correcto no es sustituto de un diseño y detallado adecuados.

Sin duda alguna que, conforme se avance en la modelación de estructuras (en particular en el intervalo inelástico), se extenderá la aplicación del MEF. En estas circunstancias, la revisión de la literatura y la discusión de Noguchi serán de gran utilidad.

# CONTENTS

## Application of FEM to RC Structures

|                                                                                                    |               |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
| <b>1. Analytical Techniques of Shear in Reinforced Concrete Structures by</b>                      |               |
| <b>Finite Element Method .....</b>                                                                 | <b>1</b>      |
| <b>1.1 Introduction .....</b>                                                                      | <b>1</b>      |
| <b>1.2 Characteristics of Shear Analysis of RC Structures by Finite</b>                            |               |
| <b>Element Method .....</b>                                                                        | <b>1</b>      |
| <b>1.3 Stress-Strain Relation of Concrete under Multi-axial Stresses .....</b>                     | <b>11</b>     |
| <b>1.4 Behavior of Concrete after Peak Stress .....</b>                                            | <b>16</b>     |
| <b>1.5 Cracking and Its Propagation .....</b>                                                      | <b>18</b>     |
| Discrete Crack Model .....                                                                         | 18            |
| Smeared Crack Model .....                                                                          | 20            |
| <b>1.6 Interface Shear Transfer (Aggregate Interlock) .....</b>                                    | <b>20</b>     |
| Discrete Crack Model .....                                                                         | 20            |
| Smeared Crack Model .....                                                                          | 22            |
| <b>1.7 Modelling of Reinforcing Bars .....</b>                                                     | <b>24</b>     |
| <b>1.8 Bond Between Reinforcing Bars and Concrete .....</b>                                        | <b>24</b>     |
| <b>1.9 Dowel Action of Reinforcing Bars .....</b>                                                  | <b>31</b>     |
| <b>1.10 Conclusions .....</b>                                                                      | <b>33</b>     |
| <b>References .....</b>                                                                            | <b>35</b>     |
| <br><b>2. Finite Element Analysis of Reinforced Concrete Structures in Japan .....</b>             | <br><b>45</b> |
| <b>2.1 Introduction .....</b>                                                                      | <b>45</b>     |
| <b>2.2 Columns .....</b>                                                                           | <b>46</b>     |
| <b>2.3 Beams .....</b>                                                                             | <b>48</b>     |
| <b>2.4 Beam-Column Joints .....</b>                                                                | <b>50</b>     |
| <b>2.5 Shear Walls .....</b>                                                                       | <b>52</b>     |
| <b>2.6 Structure of Nuclear Power Plant .....</b>                                                  | <b>58</b>     |
| <b>2.7 Conclusions .....</b>                                                                       | <b>62</b>     |
| <b>References .....</b>                                                                            | <b>63</b>     |
| <br><b>3. Finite Element Analysis of Shear Behavior of RC Members with High Strength Materials</b> |               |
| <b>-Panels, Shear Walls, Beams, Columns and Beam-Column Joints- .....</b>                          | <b>67</b>     |
| <b>3.1 Introduction .....</b>                                                                      | <b>67</b>     |
| <b>3.2 Analytical Models for High-Strength Materials .....</b>                                     | <b>68</b>     |
| 3.2.1 Concrete .....                                                                               | 68            |
| 3.2.1.1 Stress-Strain Curves of Concrete .....                                                     | 68            |

|                                                                                                                                               |           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.2.1.2 Tension-Stiffening Characteristics .....                                                                                              | 68        |
| 3.2.1.3 Compressive Strength Reduction Factor .....                                                                                           | 69        |
| 3.2.1.4 Shear Stiffness Reduction Factor .....                                                                                                | 69        |
| 3.2.2 Reinforcement .....                                                                                                                     | 69        |
| 3.2.3 Bond .....                                                                                                                              | 69        |
| <b>3.3 Comparable FEM Analyses of RC Members with High Strength Materials ....</b>                                                            | <b>70</b> |
| 3.3.1 Beams, Panels and Shear Walls .....                                                                                                     | 70        |
| 3.3.2 Columns .....                                                                                                                           | 71        |
| 3.3.2.1 Analysis of Columns -1 .....                                                                                                          | 71        |
| 3.3.2.2 Analysis of Columns -2 .....                                                                                                          | 72        |
| 3.3.3 Analysis of Interior Column-Beam Joints .....                                                                                           | 72        |
| <b>3.4 FEM Parametric Analyses of RC Members with High-Strength Materials .....</b>                                                           | <b>73</b> |
| 3.4.1 Beams .....                                                                                                                             | 73        |
| 3.4.1.1 Analysis of Test Specimens .....                                                                                                      | 73        |
| 3.4.1.2 FEM Parametric Analyses of Beams for the Amount of<br>Shear Reinforcement .....                                                       | 74        |
| 1) The Effects of Shear Reinforcement Ratios .....                                                                                            | 74        |
| 2) The Effects of Concrete Confinement Models with a Constant Value of<br>$p_w \times \sigma_{wy}$ .....                                      | 74        |
| 3.4.2 Columns .....                                                                                                                           | 74        |
| 3.4.3 Beam-Column Joints .....                                                                                                                | 76        |
| 3.4.3.1 Effects of Joint Shear Reinforcement Ratios and Concrete Strength ....                                                                | 76        |
| 1) Effects of Joint Shear Reinforcement Ratios .....                                                                                          | 76        |
| 2) Effects of Concrete Strength .....                                                                                                         | 76        |
| 3.4.3.2 Effects of Column Shear Force, Bond in Beam Longitudinal Reinforcement<br>and Beam and Column Longitudinal Reinforcement Ratios ..... | 76        |
| 3.4.4 Shear Walls .....                                                                                                                       | 77        |
| 3.4.4.1 Analyses of New RC Shear Walls .....                                                                                                  | 77        |
| 1) NW series: 6 specimens tested by Prof. T. Kabeyasawa,<br>Yokohama National University .....                                                | 77        |
| 2) No. series: 8 specimens tested by Prof. Y. Kanoh, Meiji University and<br>Japan Land Development Corporation .....                         | 77        |
| 3.4.4.2 Parametric Analyses of Shear Walls .....                                                                                              | 78        |
| 1) Effects of Concrete Strength .....                                                                                                         | 78        |
| 2) Effects of Wall Reinforcement Ratios .....                                                                                                 | 78        |
| 3) Effects of Shear Span Ratios .....                                                                                                         | 78        |
| 3.4.5 Panels .....                                                                                                                            | 79        |
| <b>3.5. Concluding Remarks .....</b>                                                                                                          | <b>79</b> |
| 1) Evaluation of the Compressive Strength Reduction Factors of<br>Cracked High Strength Concrete .....                                        | 79        |
| 2) Confinement Effects of Cracked High Strength Concrete .....                                                                                | 80        |



|                                                                                    |           |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3) Tension Stiffness Models and Shear Stiffness Reduction Factors .....            | 90        |
| 4) General Eestimation of Bond in RC Members with High Strength<br>Materials ..... | 90        |
| <b>Acknowledgements .....</b>                                                      | <b>80</b> |
| <b>References .....</b>                                                            | <b>81</b> |
| <b>Tables and Figures .....</b>                                                    | <b>82</b> |