Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería. Vol. 14,**3**, 279–292(1998)

MODELOS SIMPLIFICADOS DE DAÑO PARA EL ANÁLISIS DE ESTRUCTURAS DE ACERO

P. INGLESSIS
G. GÓMEZ
G. QUINTEIRO
y
J. FLÓREZ LÓPEZ

Departamento de Estructuras, Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil, Universidad de Los Andes
Av. Tulio Febres Cordero, Mérida 5101, Venezuela
Tel.: + 58-74-401 111 , Fax: + 58-74-402 860
E-mail: iflorez@ing.ula.ve

RESUMEN

El propósito de este artículo es el de proponer un modelo del comportamiento de componentes estructurales de acero basado en conceptos de la Mecánica de la Degradación y la noción de rótula plástica.

Se introduce un conjunto de variables internas que miden el estado de daño de las rótulas plásticas del miembro. Se propone la expresión de la matriz de rigidez de un miembro dañado y de la función de fluencia de una rótula plástica degradada. La ley de evolución del daño por flexión es identificada a partir de resultados experimentales en ensayos monotónicos. El modelo es verificado mediante la simulación numérica de ensayos cíclicos.

SIMPLIFIED MODELS OF DAMAGE FOR THE ANALYSIS OF STEEL STRUCTURES

SUMMARY

The purpose of this paper is to propose a model of damage for steel frame members based on the methods of Continuum Damage Mechanics and the concept of plastic hinge.

A set of internal variables that measure the state of damage of the hinges is introduced. Expressions for the stiffness matrix of a damaged frame member and the yield function of a damaged hinge are proposed. An evolution law for the flexural damage of a hinge is identified from experimental results on monotonic tests. The model is verified by the numerical simulation of cyclic tests.

Recibido: Octubre 1996

 ISSN 0213–1315

Las deformaciones generalizadas del miembro estructural pueden ahora descomponerse en deformaciones de la viga-columna elástica $\{\Phi^v\}$ y deformaciones generalizadas plásticas concentradas en las rótulas $\{\Phi^p\}$

$$\{\Phi\} = \{\Phi^v\} + \{\Phi^p\} \tag{2}$$

Teniendo en cuenta que la viga-columna elástica sigue la ley de comportamiento (1), la ecuación (2) se transforma en

$$\{\Phi - \Phi^p\} = [F^0]\{M\} \qquad \text{alternativamente} \quad \{M\} = [S^0]\{\Phi - \Phi^p\} \tag{3}$$

En la siguiente sección se describirá una relación que generaliza la ecuación (3) para el caso de un miembro elastoplástico con daño.

LEYES DE ESTADO

Para incluir en la ecuación (2) la influencia del daño estructural por acciones mecánicas, se seguirá el mismo procedimiento empleado para el modelado del comportamiento de miembros de hormigón armado propuesto en[2].

Se introduce una nueva variable interna: el daño $\{D\} = (d_i, d_j, d_n)$ que toma valores entre cero y uno. Los dos primeros parámetros miden el daño debido a efectos de flexión en las rótulas i y j respectivamente. El último caracteriza el daño axial. Un valor de cero indica una rótula rigidoplástica como las incluidas en la teoría convencional de pórticos elastoplásticos. El valor de uno caracteriza una rótula totalmente dañada que presenta el mismo comportamiento de las articulaciones internas en los pórticos elásticos tradicionales.

En el caso de estructuras de acero, las variables de daño por flexión están asociadas a complejos fenómenos físicos que incluyen la aparición y propagación de macrogrietas en las juntas y la presencia de pandeo local. Se está suponiendo, por lo tanto que un sólo parámetro de daño puede caracterizar, al menos globalmente, estos procesos. En[2] se propuso la siguiente ley de estado

$$\{\Phi - \Phi^p\} = [F(D)]\{M\} \qquad \text{donde} \qquad [F(D)] = [F^0] + [C(D)]$$

$$[C(D)] = \begin{bmatrix} \frac{d_i F^0_{11}}{(1-d_i)} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{d_j F^0_{22}}{(1-d_j)} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{d_n F^0_{33}}{(1-d_n)} \end{bmatrix} \tag{4}$$

alternativamente

$$\{M\} = [S(D)]\{\Phi - \Phi^p\} \qquad \text{donde} \quad [S(D)] = [F(D)]^{-1} \tag{5}$$

El modelo de comportamiento propuesto está definido por la ley de estado (4) o (5) y por las leyes de evolución de las deformaciones plásticas y del daño que serán descritas en las próximas secciones. La primera se obtendrá mediante el concepto de "esfuerzo generalizado efectivo" y la "hipótesis de equivalencia en deformaciones generalizadas" y la segunda corresponde a una expresión fenomenológica obtenida a partir de resultados experimentales.

FUNCIÓN DE FLUENCIA DE UNA RÓTULA ELASTOPLÁSTICA DEGRADABLE

El esfuerzo efectivo en la mecánica de la degradación convencional propuesto por Rabotnov[4] se define

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma}{1-\omega} \tag{6}$$

donde σ es el esfuerzo de Cauchy, $\bar{\sigma}$ el esfuerzo efectivo y ω la variable de daño de la mecánica de los medios continuos.

Por analogía con la expresión (6) puede definirse el esfuerzo generalizado efectivo $\{\bar{M}\}$ como se indica a continuación

$$\{\bar{M}\} = \left(\frac{M_i}{1-d_i}, \frac{M_j}{1-d_j}, \frac{N}{1-d_n}\right) \tag{7}$$

La hipótesis de equivalencia en deformación[4] establece que el comportamiento de un material dañado puede escribirse empleando las mismas expresiones del modelo constitutivo de un material intacto, si se substituye en estas el esfuerzo nominal por el esfuerzo efectivo.

Una adaptación de esta hipótesis al caso considerado puede ser empleada para la definición de la función de fluencia de una rótula plástico-degradable. En términos generales, la función de fluencia para una rótula plástico-perfecta i se expresa como

$$f_i = f(M_i, N: \quad \text{constantes de la sección}) \tag{8}$$

Por lo tanto la función de fluencia de una rótula dañada se define, según la hipótesis de equivalencia en deformaciones, como

$$f_i = f\left(\frac{M_i}{1-d_i}, \frac{N}{1-d_n}: \quad \text{constantes de la sección}\right) \tag{9}$$

Por ejemplo, en el caso particular de deformaciones axiales plásticas despreciables, la función de fluencia es

$$f_i \left|\frac{M_i}{1-d_i}\right| - M_y \tag{10}$$

donde M_y es el momento de fluencia plástica de la sección.

Puede observarse que esta relación pudiera expresarse mediante la ecuación de una línea recta. Este resultado ha sido confirmado con otros ensayos similares[10]. Por lo tanto se propone expresar la ley de evolución del daño de la manera siguiente

$$d_i = b\langle p_i - p_{cr}\rangle \qquad d_j = b\langle p_j - p_{cr}\rangle \tag{15}$$

donde b y p_{cr} son coeficientes que dependen de las propiedades del miembro y el símbolo $< Z >$ representa la parte positiva de un valor Z. La comparación entre ensayo y modelo puede observarse en las Figuras 5 y 6. La simulación fue realizada con los siguientes coeficientes: $M_y = 21000$ mm-N, $b = 0,072$, $p_{cr} = 0,22$, $EI = 1,363 \times 10^7$ mm^2-N.

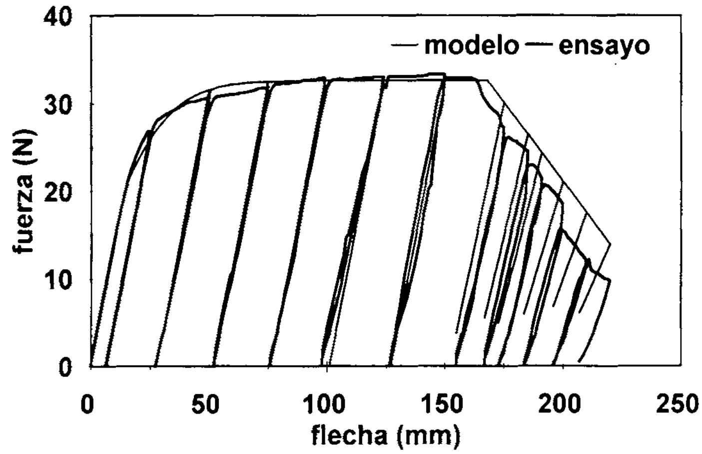

Figura 6. Comparación entre ensayo y modelo

Es interesante constatar que la expresión general de esta ley coincide con la propuesta por Lemaitre para solicitaciones uniaxiales.

En resumen, un modelo de comportamiento para miembros estructurales de acero está compuesto por la ley de estado (4) o (5), la ley de evolución definida por la función de fluencia (10) para las rótulas i y j y las leyes de evolución (14-15).

FUNCIÓN DE FLUENCIA CON ENDURECIMIENTO CINEMÁTICO

La ley de comportamiento definida en la sección precedente supone una transición brusca entre el comportamiento elástico y elastoplástico como en los modelos elastoplásticos perfectos. Más precisamente el modelo con daño resulta ser una generalización de aquél. Esto significa que el modelo ignora el proceso gradual de plastificación de las secciones críticas. Este proceso puede ser representado introduciendo un término de endurecimiento cinemático en la función de fluencia. obteniéndose de esta manera un modelo modificado. La nueva función de fluencia tiene ahora la siguiente expresión

$$f_i = \left|\frac{M_i}{1-d_i} - X_i\right| - M_e \tag{16}$$

donde X_i es el término de endurecimiento cinemático y M_e el momento necesario para iniciar la plasticidad en una sección crítica, y por lo tanto difiere del parámetro M_y introducido en (10).

Para definir la evolución del endurecimiento cinemático se propone emplear la siguiente ley

$$dX_i = \alpha(X_\infty d\Phi_i^p - X_i dp_i); \quad X_i = 0 \quad \text{para} \quad p_i = 0 \tag{17}$$

donde α y X_∞ son coeficientes que dependen de las propiedades del miembro.

Esta ley de evolución define un endurecimiento cinemático no lineal como el introducido en ciertos modelos de plasticidad y viscoplasticidad de los medios continuos[12–13]. En el caso de una solicitación monotónica definida por $dp_i = d\Phi_i^p$, la expresión (17) define una evolución exponencial de X_i como una función de la deformación plástica acumulada

$$X = X_\infty(1 - e^{-\alpha p}) \tag{18}$$

En otras palabras, el endurecimiento cinemático tiende asimptóticamente hacia el valor X_∞. Esto significa que existe la siguiente relación entre las constantes X_∞ y M_e del modelo con endurecimiento y el momento de fluencia M_y del modelo sin endurecimiento

$$M_y = M_e + X_\infty \tag{19}$$

La velocidad de endurecimiento está controlada por la constante α.

En la Figura 7 se muestra la comparación entre el ensasyo de la Figura 4 y el modelo con endurecimiento. La simulación fue realizada con los siguientes coeficientes: $b = 0,072$, $p_{cr} = 0,22$, $EI = 1,363 \times 10^7$ mm^2-N, $M_e = 13300$ mm-N, $X_\infty = 7700$ mm-N, $\alpha = 0,00135$.

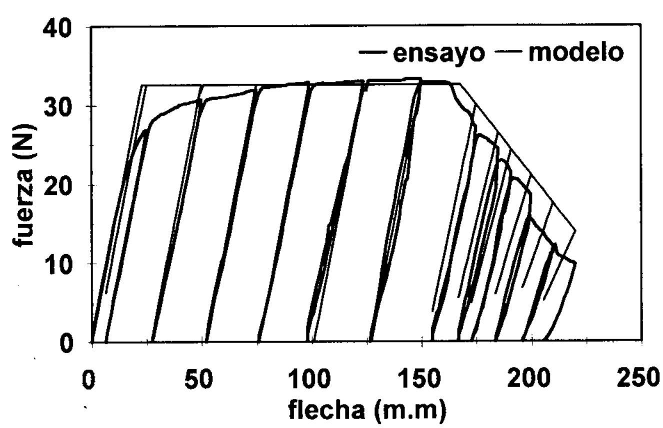

Figura 7. Comparación entre ensayo y modelo con endurecimiento

3. J. Flórez López, "Un modelo del comportamiento histerético de elementos de hormigón armado basado en la teoría del daño concentrado", *Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño en Ingeniería*, Vol. **12**, 4, pp. 411–426, (1996).
4. J. Lemaitre, "*A Course on Damage Mechanics*", Springer-Verlag, Berlin, (1992).
5. H. Krawinkler, "Performance Assessment of Steel Components", *Earthquake Spectra*, Vol. **3**, 1, (1987).
6. G. Ballio y C. Castiglioni, "An Approach to the Seismic Design of Steel Structures Based on Cumulative Damage Criteria", *Earth. Eng. and Struct. Dyn.*, Vol. **23**, pp. 969–986, (1994).
7. H. Krawinkler y E. Popov, "Seismic Behavior of Moment Connections and Joints", *J. Struct. Div. ASCE*, Vol. **108**, ST2, (1982).
8. A. Cipollina, A. López Inojosa y J. Flórez López, "A Simplified Damage Mechanics Approach to Nonlinear Analysis of Frames", *Computers & Structures*, Vol. **54**, 6, pp. 1113–1126, (1995).
9. J. Lemaitre y J. Dufailly, "Damage Measurements", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. **28**, 5, 6, pp. 643–661, (1987).
10. G. Gómez, "Un modelo simplificado de daño para estructuras de acero bajo cargas monotónicas", Tesis de Maestría en Ingeniería Estructural, Universidad de Los Andes, Venezuela (1997).
11. G. Quintero, "Un modelo de daño para pórticos de acero bajo solicitaciones histeréticas", Tesis de Maestría en Ingeniería Estructural, Universidad de Los Andes, Venezuela (1997).
12. J.L. Chaboche, "Description thermodynamique et phénoménologique de la viscoplasticité avec endommagement", Tesis de doctorado de Estado de la Universidad de París VI (1978).
13. D. Marquis, "Modélisation et identification de l' ecroissage anisotrope des métaux", Tesis de doctorado de Tercer Ciclo de la Universidad de París VI, (1978).
14. K.C. Tsai y E.P. Popov, "Cyclic Behavior of End-Plate Moment Connections", *J. Struc. Eng. ASCE*, Vol. **116**, 11, (1990).