Estimación de parámetros de resistencia residual en ensayos cíclicos de muros de hormigón armado

Gabriel Follet Latorrea, Matías Hube Ginestarb , Edgar Chacónc

a Major Ingeniería Estructural, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile. 4 año, gabriel.follet@uc.cl

b Departamento Ingeniería Estructural y Geotécnica, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile. Profesor Asociado, [mhube@ing.puc.cl](mailto:mhube@ing.puc.cl)

c Estudiante Doctorado en Ingeniería Estructural, Escuela de Ingeniería, Pontificia Universidad Católica de Chile. eechacon@uc.cl

Resumen

La filosofía de diseño sismorresistente utilizada tanto en Chile como en el resto del mundo, permite que durante un terremoto una estructura pueda sufrir daños menores, de manera de poder realizar un diseño eficiente y que garantice que la estructura resista una eventual solicitación sísmica.

De esta manera, es necesario estimar el daño, y a partir de este, la resistencia residual, para poder hacer una evaluación de la estructura. La estimación de la resistencia residual se puede realizar por medio de parámetros de daño como la pérdida de rigidez y/o pérdida de fuerza máxima.

Existen múltiples y diversos modelos analíticos y numéricos que a partir de la modelación del comportamiento histerético del muro, estiman el daño, sin embargo, en esta investigación se estima el daño a través de relaciones empíricas obtenidas del análisis estadístico de 20 ensayos cíclicos de muros de hormigón armado.

Se concluye que la pérdida de rigidez está correlacionada tanto con la deriva de cada ciclo(R2=0.88) como con la energía disipada acumulada (R2=0.86). Sin embargo, de un análisis multivariable se determina que es posible encontrar alguna función que correlacione la deriva y la energía disipada, en conjunto con la pérdida de rigidez, dado que deriva y energía disipada no son variables independientes

***Palabras clave:*** Resistencia residual, Pérdida de Rigidez, Ensayos Cíclicos, Análisis Estadístico,Muros de hormigón armado

**1. Introducción**

La caracterización del comportamiento y resistencia de estructuras de Hormigón Armado (HA), y la existencia de códigos de diseño, han permitido la proliferación de estructuras de HA en Chile. El desempeño sísmico de estructuras de HA, es particularmente importante en Chile dada la amenaza sísmica presente en todo el país. El desempeño de estas frente al terremoto del Maule 2010 fue adecuado, destacándose que tan solo un 2% de los edificios de más de 9 pisos sufrieron daño estructural (Jünemann et al., 2015).

A pesar de esto, es necesario poder estimar la resistencia residual, es decir la resistencia de un elemento luego de haber sufrido daños. Para esto, existen múltiples y complejos modelos numéricos (Ibarra et al., 2005) que permiten cuantificar la resistencia residual en función de la solicitación.

Esta investigación tiene como objetivo la obtención de parámetros de resistencia residual a partir del análisis estadístico de ensayos cíclicos de muros de HA. En particular, de encontrar correlaciones y/o predictores de la pérdida de rigidez a partir de la data experimental de deformación y fuerza de ensayos pseudo-estáticos.

**2. Metodología**

Para realizar un análisis estadístico con algún grado de significancia fue necesario elaborar un inventario de ensayos de laboratorio, con este objetivo se realizó una recopilación bibliográfica enfocada en ensayos cíclicos a deformación controlada de muros esbeltos no confinados de hormigón armado, obteniéndose 20 ensayos. Provenientes de la base de datos SERIES Workpackage [WP2/NA1] y de ensayos realizados en el Laboratorio del Departamento de Ingeniería Estructural y Geotécnica de la Pontificia Universidad Católica de Chile. El análisis particular de cada uno de estos ensayos y el análisis general de todo el inventario de ensayos se realizó en Matlab.

Los resultados experimentales fueron preprocesados, identificándose y eliminando valores atípicos (*outliers)* y/o pausas en la data experimental. Se evaluó la utilización de un filtro de alta frecuencia con el objetivo de eliminar el ruido causado por los sensores, pero realizando un análisis comparativo entre la data experimental con y sin filtro se determinó que no era necesario y se optó por conservar los datos experimentales con ruido.

El análisis particular de cada ensayo consistió en caracterizar el comportamiento del muro, detectando el protocolo de carga, identificando los ciclos de carga, estimando la rigidez y energía disipada en cada ciclo. Esos últimos 2 parámetros se normalizaron a partir del modelo bilineal ajustado.

Para la estimación de la rigidez de un ciclo, se consideró la **RIGIDEZ SECANTE** entre los puntos de mayor y menor fuerza, pues se determinó que esta es la rigidez que representa de mejor manera el comportamiento de los ensayos cíclicos y, también, fue la más consistente y menos variable entre ciclos de un mismo ensayo y entre distintos ensayos. La **ENERGÍA DISIPADA** en un ciclo se estimó como el área encerrada por este.

Gráfico

Descripción generada automáticamenteEl **modelo bilineal** se ajustó según el modelo propuesto por (ASCE 41, 2017), en la figura 1, se observa un ejemplo de este ajuste bilineal a los datos de un ensayo cíclico.

**Figura 1**. Ejemplo de ajuste modelo bilineal a data experimental.

Así es que, la rigidez de cada ciclo se **normaliza** por la rigidez del tramó elástico y la energía disipada por el área bajo la curva del modelo bilineal ajustado.

Una vez obtenido y normalizados los parámetros, se realiza el análisis estadístico de la data agregada. Este análisis consistió en obtener **regresiones** entre la deriva de cada ciclo (*D*) y la energía disipada acumulada normalizada (*En*) para la pérdida de rigidez normalizada (*Kn*) mediante el método de los mínimos cuadrados no lineales.

Para el análisis multivariado de los efectos de *D* y *En* en la pérdida de rigidez, se linealizan las variables y se realizó una regresión lineal múltiple. También se ejecutaron los “test” estadísticos asociados para estimar la error y significancia de los resultados.

**3. Resultados y discusión**

A continuación, se presentan los resultados del procesamiento de la data experimental y el resultado del análisis estadístico correspondiente.

En la figura 2, se observa los valores de la rigidez normalizada en cada ciclo y la **deriva** alcanzada, calculado a partir de la data fuerza-desplazamiento de los ensayos.

Gráfico

Descripción generada automáticamente

**Figura 2**. Regresión de rigidez secante en función de deriva

Realizando una ajuste estádisitco a la data experimental se obtiene la regresión de la ecuación 1.

**(1)**

Los estadísticos de la regresión se encuentran en la tabla 1.

**Tabla.1** Estadísticos de la regresión deriva-rigidez

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| SSE | r2 | R2 | RMSE |
| 4.56 | 0.892 | 0.890 | 0.1550 |

De la tabla y figura anterior, es posible concluir que, la deriva sí está correlacionada con la pérdida de rigidez, y que esta se pierde rápidamente, de manera que para una deriva del 1% se pierde más de la mitad de la rigidez inicial.

Similarmente, calculando la energía disipada en cada ciclo (*En )* y relacionándolo con la rigidez normalizada calculada anteriormente se obtiene el gráfico de la figura 3.

Gráfico

Descripción generada automáticamente

**Figura 3**. Regresión de rigidez secante en función de energía disipada

A partir de estas variables se determinó la regresión que se observa en la ecuación 2.

**(2)**

Los estadísticos de esta regresión se encuentran en la tabla 2.

**Tabla 2.** Estadísticos de la regresión energía-rigidez

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| SSE | r2 | R2 | RMSE |
| 5.69 | 0.869 | 0.868 | 0.1745 |

De la información provista por el análisis estadístico se determina que la energía disipada se correlaciona con *Kn* similarmente a la deriva. Esto se debe a que las variables de energía disipada y deriva son dependientes dado que para deformaciones superior a la fluencia , la energía disipada está directamente relacionado con el desplazamiento.

Una manera de poder estimar la influencia de solo la energía en la pérdida de rigidez es analizar la data experimental de ensayos con un protocolo que considere múltiples ciclos a un nivel de deriva. Siendo necesario de múltiple ensayos a distintos niveles de deformación para poder analizar el efecto de la energía disipada.

A pesar de que *D* y *En* sean dependientes, se realizó una regresión lineal múltiple con la variables linealizadas, obteniéndose la relación de la ecuación 3.

**(3)**

En la siguientes tablas se muestra los estadísticos de la regresión lineal múltiple

**Tabla 3.** Estadísticos de variables involucradas en regresión

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Variable | S | Pr(>|t|) | Nivel significancia |
| Intercepto | 0.007 | < 2e-16 | 0.0001 |
| log(*D)* | 0.030 | 6.83e-12 | 0.0001 |
| log(*En)* | 0.021 | < 2e-16 | 0.0001 |

**Tabla 4.** Estadísticos de la regresión

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| r2 | R2 | p-value |
| 0.926 | 0.925 | < 2e-16 |

De manera que dados los resultado de la tabla 3 , se determina que el modelo es estadísticamente significante y se esperaría que ambas variables fuesen buenos predictores de la pérdida de rigidez. Sin embargo, la regresión lineal tiene como suposición que las variables son independientes, hipótesis que sabemos que no es cierta para la energía disipada y deriva. Ademas, el modelo de regresión lineal múltiples asume que se cumple la hipótesis de homocedasticidad. Realizando el test de “Breusch–Pagan” sobre las variables involucradas se obtiene que el “**p-value**” es 1.647e-12, y por lo tanto se rechaza la hipótesis nula de Homocedasticidad.

Es así, que como nuestro modelo de regresión lineal múltiple no cumple con al menos 2 hipótesis necesarias para que las conclusiones sean válidas , se rechazan las conclsuiones obtenidas de este modelo.

**4. Conclusiones**

A partir del análisis estadístico de múltiples ensayos cíclicos de muros de HA, se concluye que a partir de la histéresis de un ensayo es posibles realizar una caracterización de su comportamiento y la evolución de la rigidez en función de energía disipada acumulada y la deriva para cada ciclo.

Del análisis global de los ensayos del inventario se concluye que tanto la deriva *D* como la energía disipada acumulada normalizada (*En*) se correlacionan con la rigidez normalizada y en particular con la rigidez secante normalizada (*Kn*). Sin embargo, dado que *D* y *En* son variable dependiente no es posible realizar un análisis estadístico detallado, y es así como solo es posible afirmar que D es un predictor de (*Kn*).

## Glosario

**RIGIDEZ SECANTE**: La rigidez es una medida de la resistencia a la deformación cuando una fuerza es aplicada. Para ensayos cíclicos, la rigidez secante se estima como la línea recta entre el punto de mínima fuerza y el punto de máxima fuerza en dentro de un ciclo.

**Referencias**

American Society of Civil Engineers [ASCE]. (2017). *ASCE Standard, ASCE/SEI, 41-17, Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings*. American Society of Civil Engineers.

Ibarra, L. F., Medina, R. A. & Krawinkler, H. (2005). Hysteretic models that incorporate strength and stiffness deterioration. *Earthquake Engineering &amp; Structural Dynamics*, *34*(12), 1489-1511. https://doi.org/10.1002/eqe.495

Jünemann, R., de la Llera, J., Hube, M., Cifuentes, L. & Kausel, E. (2015). A statistical analysis of reinforced concrete wall buildings damaged during the 2010, Chile earthquake. *Engineering Structures*, *82*, 168-185. https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.014