



MUROS DE MAMPOSTERÍA BAJO CARGAS COMBINADAS - CONDICIONES DE BORDE EN EDIFICIOS COMUNES Y PROPUESTA PARA UN MÉTODO DE ENSAYO

Detleff SCHERMER¹, Wolfgang SCHEUFLER², Andreas MAURIAL³

RESUMEN – ABSTRACT

Muros de corte de mampostería que soportan cargas en edificios comunes de varios pisos, están sometidos en su plano a fuerzas axiales, momentos flectores y fuerzas cortantes. Bajo cargas combinadas los efectos de empotramiento por las losas de concreto son decisivos para el estado límite último, p. e. bajo efectos sísmicos. Dentro de un proyecto europeo de investigación se han realizado análisis numéricos para edificios típicos de varios pisos. Los resultados de estos análisis forman la base para un nuevo método de ensayo para muros de mampostería bajo cargas combinadas en su plano. Dentro de la propuesta del método de ensayo tanto las cargas aplicadas (fuerzas controladas respectivamente desplazamientos controlados) como también la historia de la aplicación de la carga consideran las condiciones de borde de la estructura verdadera en una forma más real. Los resultados cubren tanto el máximo de la capacidad portante como también las características de la rigidez bajo cargas estáticas aplicadas en forma monótona o cíclica.

MASONRY WALLS UNDER COMBINED LOADINGS – BOUNDARY CONDITIONS IN COMMON BUILDINGS AND PROPOSAL FOR A TEST METHOD

Load-bearing masonry shear-walls in common multi-storey structures are loaded in-plane by axial forces, bending moments and shear forces. Under combined loadings the restraint effects caused by concrete slabs are deciding in the ultimate-limit-state, e.g. under seismic loadings. Within a European research project numerical investigations have been carried out on representative multi-storey structures. The results were the basis for a new test procedure method for masonry walls under in-plane combined loadings. Within the proposed test method the applied loadings (force-controlled resp. displacement controlled) as well as the load history describe the boundary conditions in real structures in a realistic manner. The results cover the maximum load-bearing capacity as well as the stiffness characteristics under monotonic / static-cyclic loadings.

1 INTRODUCCIÓN

Muros de mampostería en edificios comunes de varios pisos resultan solicitados en su plano por fuerzas axiales, momentos flectores y fuerzas cortantes. La distribución de las cargas horizontales dentro del edificio a los muros de corte p. e. debido a efectos sísmicos se calcula asumiendo normalmente un comportamiento lineal elástico de la estructura. Como la misma mampostería no reforzada como también la junta entre los muros y las losas muestran en forma explícita un

¹ Universidad de Ciencias Aplicadas de Regensburg (HS.R), Alemania, Facultad de Ingeniería Civil

² Universidad Técnica de Múnich, Alemania, Instituto de Estructuras de Concreto y Albañería

³ Universidad de Ciencias Aplicadas de Regensburg (HS.R), Alemania, Facultad de Ingeniería Civil;
eMail: andreas.maurial@hs-regensburg.de

comportamiento no lineal bajo cargas combinadas, esta suposición simplificada de un comportamiento lineal elástico lleva especialmente en el caso de grandes cargas horizontales a resultados no apropiados. Dentro de un proyecto europeo de investigación se han realizado análisis numéricos con modelos espaciales de elementos finitos para edificios típicos de varios pisos. Los resultados de estos análisis sirven de base para un nuevo método de ensayo para muros de mampostería bajo cargas combinadas en su plano. En este caso tanto las cargas aplicadas como también la historia de su aplicación consideran las condiciones de borde de la estructura verdadera y llevan a resultados más reales que cubren tanto el máximo de la capacidad portante como también las características de la rigidez bajo cargas estáticas aplicadas en forma monótona o cíclica.

2 EDIFICIOS INVESTIGADOS

Hay dos diferentes tipos de edificios de departamentos que se supone son representativos de edificios típicos residenciales de varios pisos (Figura 1). Estos sirvieron para investigar la influencia de diferentes longitudes de los muros de corte y de discretas modificaciones en el plano. Dentro del modelo los efectos por los dinteles y la mampostería debajo de las aperturas para las ventanas no se habían considerado.

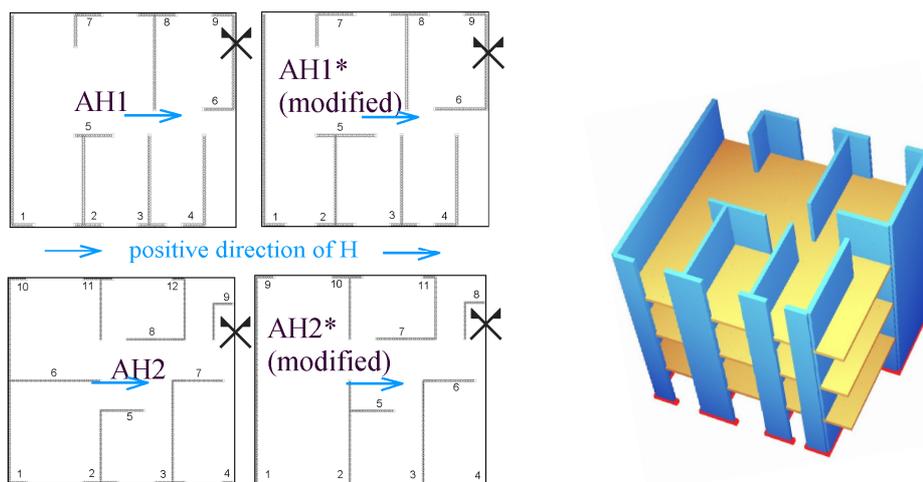


Figura 1: Planos de los 4 edificios investigados (mitad del edificio por simetría) y vista isométrica de la estructura del edificio tipo AH1

El efecto de diferentes alturas del edificio fue cubierto por utilizar modelos de estructuras con 3 y 4 pisos. Para optimizar el trabajo numérico el modelo estructural fue reducido a la mitad debido a su simetría. Dentro de este modelo actuaban fuerzas horizontales en la dirección “débil” sobre la estructura. Los muros de corte de mampostería tenían espesores de 17.5, 24 y 30 cm representando un material como ladrillos de arcilla verticalmente perforados o unidades de silicato de calcio con un mortero de cal y cemento y una resistencia efectiva a compresión de aproximadamente 8.5 N/mm^2 y un módulo de elasticidad de 8500 N/mm^2 . La altura de todos los pisos fue asumida igual a 2.75 m y las losas de concreto C20/25 con un espesor de 20 cm.

3 INVESTIGACIONES NUMERICAS

Las investigaciones numéricas fueron realizadas mediante un sistema de elementos finitos tridimensionales utilizando elementos de lámina. Mientras se consideraba que las losas no tengan agrietamiento los muros de corte verticales se describían por una ley de material no lineal. El contacto entre las losas horizontales y los muros de mampostería se asumía como rígido – en general una falla por tensión perpendicular al tendel se incluye en la descripción de las propiedades de material de la mampostería. La aproximación por los elementos finitos que se usó permitía la descripción de las deformaciones tanto de láminas como de losas. Esto se realizó por dividir los efectos de la flexión de la losa en dos componentes laminares paralelos. Es por eso que resultó posible para los muros de corte la diferenciación entre una componente superior e inferior respectivamente interior y exterior.

3.1 CARGAS Y SU APLICACIÓN

Dentro de las investigaciones numéricas se consideró tanto cargas verticales como también horizontales. Las cargas verticales representaban el peso propio de la misma estructura junto con la parte de la carga viva casi permanente. Estas cargas verticales se aplicaron en una forma simplificada por utilizar una distribución constante de las cargas verticales sobre las losas de concreto incluyendo dentro de las mismas cargas también el peso propio de los muros. Las cargas horizontales se aplicaron en forma discreta sobre losas en cada piso. Para no causar ningún efecto torsional sobre la estructura el punto de la aplicación era el centro de la losa. La distribución sobre la altura se hizo proporcional a una aproximación lineal de la primera forma modal (Figura 2).

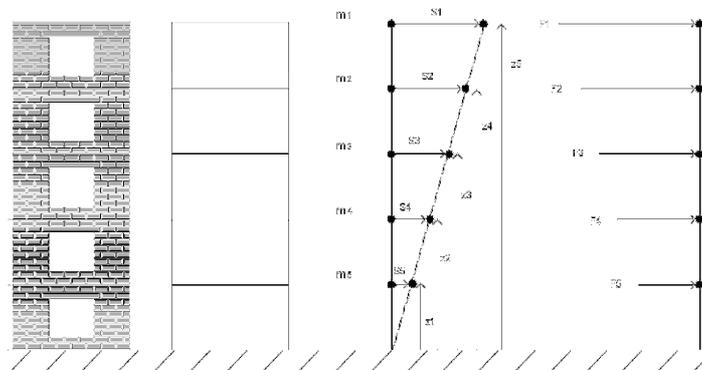


Figura 2: La distribución de la fuerza horizontal H sobre la altura del edificio conforme a la primera forma modal de la estructura (aquí vista esquemática de la estructura de un edificio de 5 pisos)

3.2 PROPIEDADES DE LOS MATERIALES

Concreto

Como ya se asumió, las losas de concreto se comportan en forma lineal elástico sin presentar ningún agrietamiento y con un módulo de elasticidad de 30000 N/mm^2 . Para analizar los efectos sísmicos sobre el edificio se modificó la masa del concreto para incluir además del peso propio de las losas mismas tanto el peso de los muros de mampostería como la parte de la carga viva casi permanente.

Mampostería

Para los muros de corte de mampostería bajo cargas verticales y horizontales resulta un estado de esfuerzos que es una combinación de esfuerzos axiales, flectores y cortantes. No linealidades simples tenían que ser consideradas en su ley de material. Dentro del programa de elementos finitos que se usó el único criterio de falla que se podía aplicar para la mampostería era una ley de material con una falla por tracción. Como la dirección de las principales deformaciones y esfuerzos de tracción dentro del estado de esfuerzos combinados no coinciden con la orientación de las juntas de la mampostería, la suposición de una falla arbitraria por tracción en este aspecto implica cierto error. A pesar de todo, la descripción de una falla por tracción perpendicular al tendel que se basa en el criterio de una falla isotrópica, se consideró que es suficiente, el cual fue aprobado en cálculos de muros voladizos. Si se asume que aun casi no existía una resistencia a tracción perpendicular al tendel, en los cálculos una resistencia superior a cero debe ser proporcionada por razones numéricas. Por eso los análisis se ejecutaron con una resistencia isotrópica a tracción muy pequeña de 0.18 respectivamente 0.3 MN/m². Bajo compresión se asumió un comportamiento idealmente plástico. La relación de los esfuerzos sobre las deformaciones se determinó de acuerdo a la energía de falla (Figura 3).

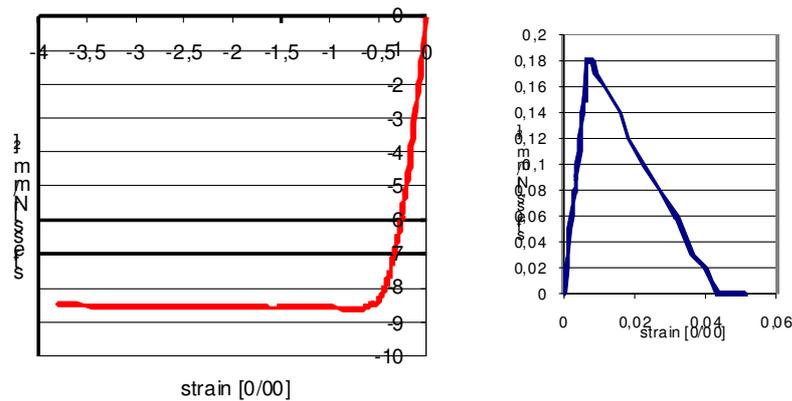


Figura 3: Las relaciones de los esfuerzos sobre las deformaciones de la ley de material aplicada para la compresión uniaxial (izquierda) y para la tracción uniaxial (derecha) de un elemento de muro de mampostería.

3.3 RESULTADOS

En los resultados de las investigaciones numéricas se ha puesto especial interés a la distribución de las cargas horizontales hacia los diferentes muros de corte. Los resultados se graficaron en relación al nivel de la carga, es decir, de la carga horizontal total, aplicada tanto en dirección positiva como en negativa. Los siguientes diagramas muestran la distribución de la carga horizontal a la mitad de la altura de los muros en el primer piso, en función de su dirección y para un edificio de 4 pisos. Los resultados de las demás estructuras estudiadas se pueden encontrar en los reportes de la investigación.

Edificio de departamentos AH1

En la siguiente figura 4 se muestra la distribución correspondiente a la carga horizontal.

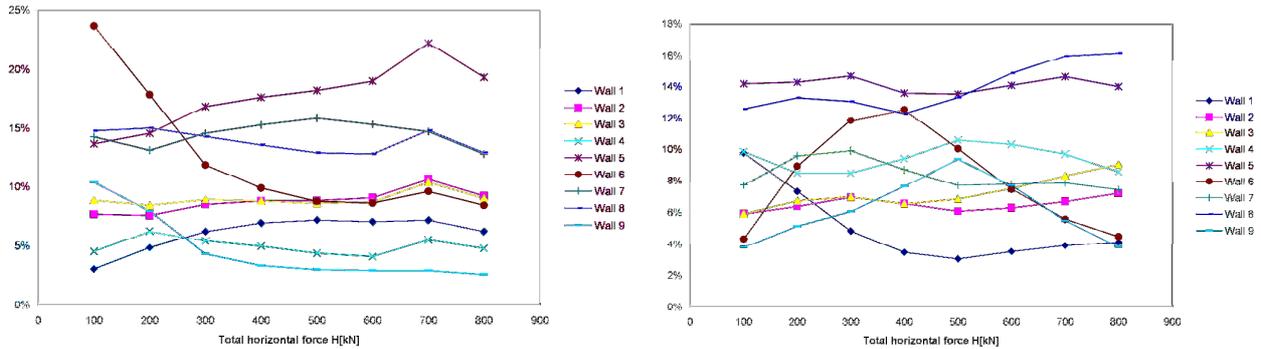


Figura 4: La distribución de la carga horizontal hacia los muros de corte en función del nivel de carga (dirección positiva (izquierda) / dirección negativa (derecha) de la carga horizontal H; mitad del muro en el primer piso, edificio AH1)

Si se compara la distribución de fuerzas horizontales en relación a la dirección de la carga horizontal es evidente que exista una diferencia significativa. Este efecto se debe a la configuración de los muros transversales en su función como ala y su ubicación en relación a la dirección de la carga horizontal. Este efecto se hace muy notable comparando los muros nro. 5 (ala céntrico => casi ninguna diferencia entre las dos direcciones de H) y nro. 6 (ala en un extremo => gran diferencia entre las dos direcciones de H).

En general, es evidente que los muros largos – con una rigidez alta asumiendo una sección transversal no agrietada – son más sensibles cuando se abre la sección transversal debido a momentos flectores en el plano y que la parte comprimida de la sección transversal se reduce.

Edificio de departamentos AH1*(AH1 modificado)

La distribución de la carga horizontal correspondiente se puede ver en la figura 5.

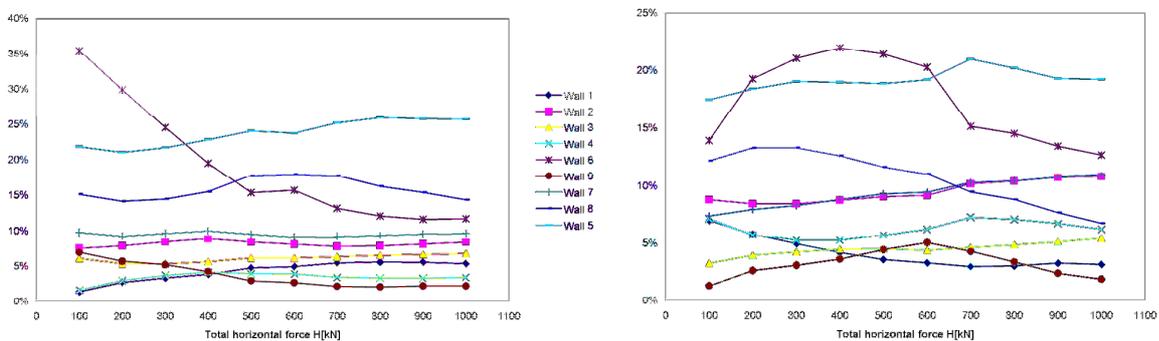


Figura 5: La distribución de la carga horizontal hacia los muros de corte en función del nivel de carga (dirección positiva (izquierda) / dirección negativa (derecha) de la carga horizontal H; mitad del muro en el primer piso, edificio AH1 modificado)



Resumen

La distribución de las fuerzas cortantes depende en forma significativa del nivel de la carga horizontal. Además, resultaron en los análisis numéricos en la sección transversal de los muros transversales, unos esfuerzos cortantes secundarios respectivamente fuerzas cortantes debido a deformaciones en estos muros en dirección perpendicular a su plano. A la vez para mantener el equilibrio en los muros aparecieron fuerzas adicionales en la dirección longitudinal. Para los niveles más altos de la carga horizontal este efecto se va reduciendo. Todavía debido a las cargas cortantes de la losa aproximadamente 10 % de la carga total en dirección horizontal resultan finalmente transmitidos a los muros transversales.

La determinación de la posición de la fuerza resultante axial N en cada sección relevante del muro – descrito por la excentricidad e – se explica detalladamente en [1], [2]. Con respecto a los esfuerzos normales se ha reconocido una diferencia significativa entre las tres secciones investigadas, es decir, a la cabeza, a la mitad y al pie del muro. Este efecto se intensifica con niveles crecientes de cargas, y efectos no lineales, en especial cuando la sección transversal debido a la falta de resistencia a tracción se abre, comienzan a dominar.

4 METODO PARA EL ENSAYO DE CORTE

4.1 CONDICIONES DE BORDE EN EDIFICIOS COMUNES

Con respecto a muros de corte en edificios de varios pisos se debe constatar que las losas pueden causar efectos significativos de empotramiento. Consecuentemente las condiciones de borde a la cabeza y al pie del muro se pueden describir por los tres parámetros de carga (Figura 6):

- la fuerza vertical de compresión N (se le asume constante sobre la altura del muro),
- los momentos flectores en el plano M_{cap} a la cabeza y M_{bottom} al pie del muro y
- la fuerza cortante V en el plano del muro.

El estudio paramétrico ya mencionado de estructuras de edificios típicos de mampostería de varios pisos por medio de un análisis tridimensional con el método de los elementos finitos – considerando no linealidades de material – nos permite la descripción de la distribución de los esfuerzos en dependencia de varios parámetros. Debido a cargas horizontales grandes se redujo el área de compresión en forma significativa. La excentricidad a la cabeza del muro resultó casi igual a la excentricidad al pie del muro – solamente invertido respecto al centro del muro, que describe simplemente un empotramiento casi rígido como es el caso en las losas del piso. El grado del empotramiento depende de la relación entre la rigidez del muro y la rigidez de flexión de la losa. Este empotramiento se reduce cuando se incrementa la longitud del muro. Como en edificios reales el diseño de muros no tan largos es más relevante y decisivo, el método de ensayos principalmente está enfocando muros de una longitud más corta. A pesar de esto el método de ensayo es también aplicable en muros más largos, pero hay que implementar unas correcciones leves en cuanto a las relaciones h/l respectivamente M_{cap}/M_{bottom} .

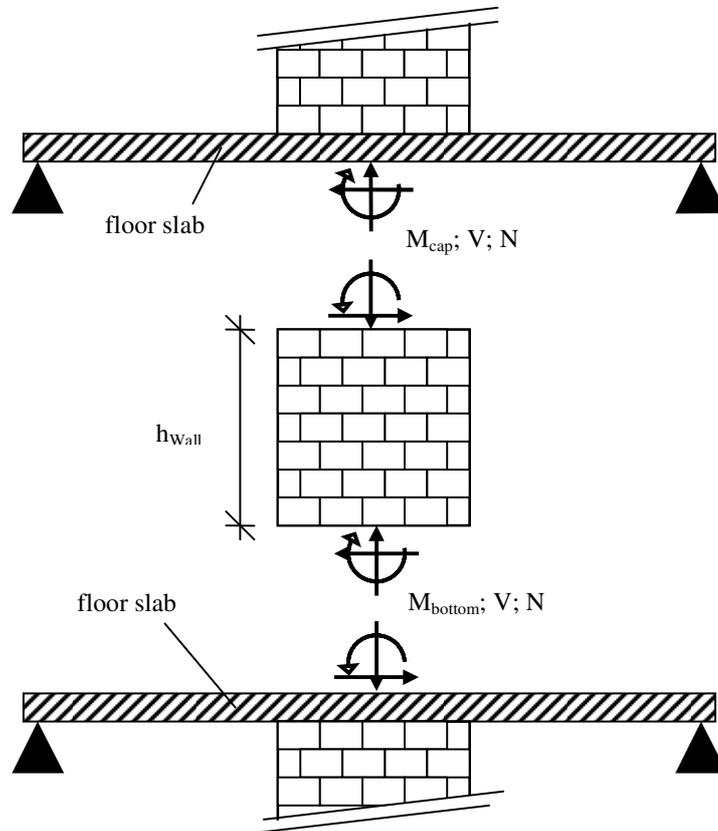


Figura 6: Muro de corte en un edificio de varios pisos con cargas aplicadas a la cabeza / al pie del muro

4.2 ESPECIMENES PARA EL ENSAYO

Los ensayos se realizan con muros de mampostería a escala natural que cubren el tamaño y los demás efectos antes mencionados. La altura y la longitud de los muros ensayados se les debe fijar como son en un muro real, que normalmente ha sido 2.5 m para longitud y altura.

Los especímenes del ensayo se construyeron sobre una viga rígida de cimentación. A la cabeza, encima del muro se propone colocar también una viga rígida para asegurar una distribución apropiada de las cargas aplicadas tanto en dirección vertical como horizontal. El montaje de ensayo debe garantizar que la aplicación de las cargas definidas al espécimen del ensayo sea con precisión suficiente (Figura 7). Se debe tener cuidado que la carga vertical aplicada sobre el muro se mantenga constante durante el ensayo y que no aparezca una carga “parásita”.

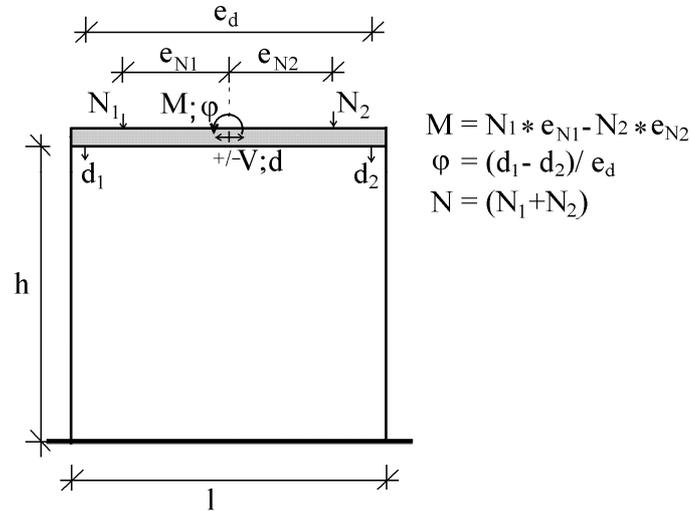


Figura 7: Especimen de ensayo con las cargas aplicadas y las deformaciones características.

4.2 APLICACION DE LA CARGA

La aplicación de la carga horizontal respectivamente del desplazamiento debe asegurar un desplazamiento uniforme a la cabeza del muro. Las cargas verticales que se aplican sobre el espécimen de ensayo representan tanto la fuerza axial como el momento flector en el plano. Conforme al modelo de la distribución del momento flector y las excentricidades sobre la altura del muro se prescribe una relación M_{cap}/M_{bottom} igual a 1.0 – con las excentricidades invertidas con respecto al centro del muro (Figura 8). Esto significa que la excentricidad de la fuerza resultante a la mitad de la altura del muro resulta igual a cero y debe no ocurrir una rotación relativa entre cabeza y pie del muro.

$$M_{cap} = N \cdot e = V \cdot \frac{h_{wall}}{2} = -M_{bottom} \quad (1)$$

donde son N la fuerza axial a compresión,
 V la fuerza cortante horizontal,
 M el momento flector en el plano (a la cabeza respectivamente al pie del muro),
 h_{wall} la altura efectiva del muro.

La fuerza axial N debe seguir absolutamente constante durante el ensayo. En consecuencia esto significa, como sujeciones mecánicas en general no son apropiadas para bloquear las rotaciones de la cabeza, la aplicación de la carga vertical se debe asegurar por actuadores controlados por computadora.

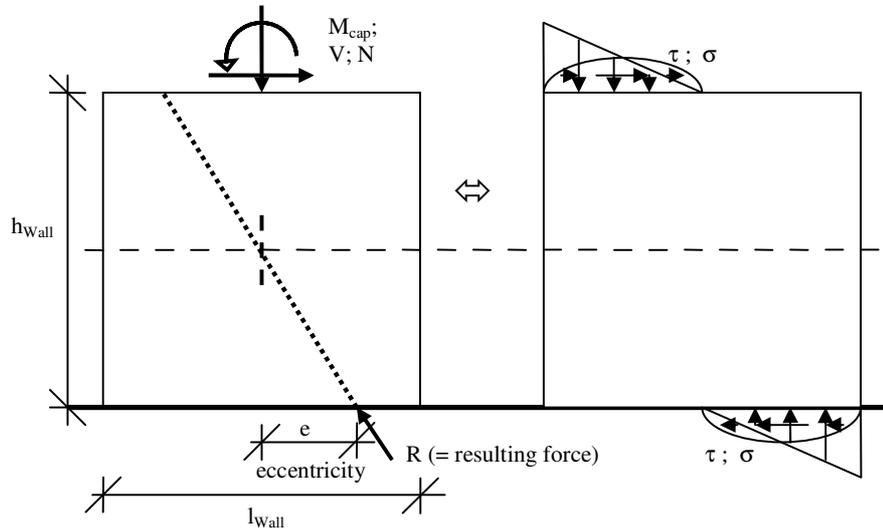


Figura 8: Estado de esfuerzos idealizado en el muro de corte bajo las cargas combinadas N-M-V.

Por la aplicación de la carga horizontal se debe garantizar un desplazamiento uniforme a lo largo de la cabeza del muro. El ajuste de la distribución de los esfuerzos cortantes en la junta, depende de los esfuerzos verticales en la parte comprimida y las propiedades geométricas del muro en general. Para cumplir con esta demanda se requiere de la viga que está colocada directamente sobre la cabeza del muro tenga rigidez alta en su dirección longitudinal.

Para una determinación estándar de la capacidad portante por corte de un muro, en el ensayo se debe incrementar la carga horizontal en forma continua hasta que el muro llegue a colapsar. Para cubrir el comportamiento post-agrietamiento y post-máximo (ver tabla adelante: Niveles de Carga B y C), la aplicación de la carga horizontal debe ser ejecutada con los desplazamientos controlados. En general, al comienzo de los ensayos, cuando el nivel de carga horizontal está bajo, es seguro que ningún agrietamiento por corte o flexión ocurrirá, la carga horizontal también se puede aplicar con las fuerzas controladas (ver tabla adelante: Nivel de Carga A).

Como el momento flector depende de la carga horizontal V , la excentricidad va a variar durante el ensayo y un sistema de control variable en tiempo real debe asegurar la ecuación antes mencionada. También debe cubrir el comportamiento post-agrietamiento cuando una reducción no simétrica de la rigidez de flexión va a ocurrir en dirección positiva y negativa por las grietas debido a los esfuerzos cortantes. A este nivel se recomienda, para el manejo de la aplicación del momento a la cabeza de muro, cambiar del control de las fuerzas al control de los desplazamientos para no permitir una rotación relativa a la cabeza del muro.

Para la ejecución de ensayos con cargas estáticas aplicadas en forma cíclica la aplicación de cargas de compresión y de tracción es indispensable (se requiere un actuador que actúe en las dos direcciones).

4.3 MONTAJE DE ENSAYO

En la Figura 9 se muestra el montaje de ensayo en el laboratorio de la Universidad Técnica de Múnich de Alemania donde se realizaron los ensayos aquí presentados. Dentro del mismo proyecto europeo de investigación sobre mampostería similares montajes de ensayo fueron instalados en la Universidad de Kassel (Alemania) y la Universidad de Pavia (Italia). Las fuerzas y los desplazamientos se aplican utilizando un sistema de control por computadora. El sistema de medición cubre todos los desplazamientos relevantes y las fuerzas N_1 , N_2 y V .

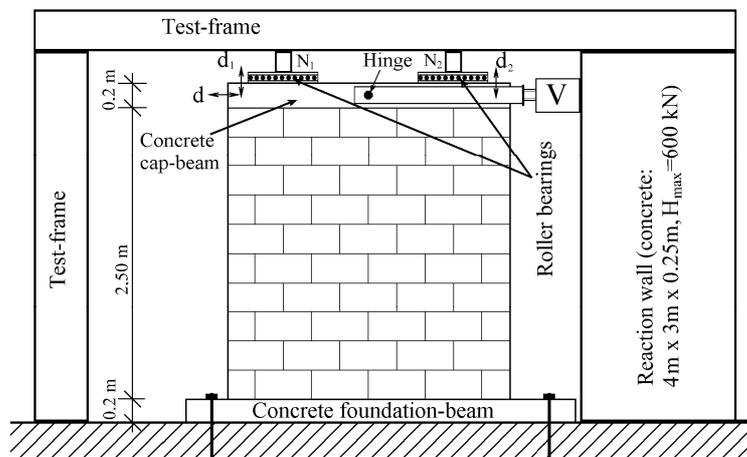


Figura 9: Montaje de ensayo en el laboratorio de la Universidad Técnica de Múnich (Alemania).

Ensayos con una aplicación monótona

Para la determinación de la capacidad portante absoluta por corte de un muro, es suficiente la ejecución de un ensayo con aplicación monótona. Estos ensayos se realizan bajo cargas verticales constantes y un desplazamiento aplicado a la cabeza del muro que va incrementándose en forma monótona. Hay que cumplir con las condiciones de borde a la cabeza del muro como antes se explicó. La velocidad de la aplicación del desplazamiento se determina en base del tiempo de duración previsto de aproximadamente 30 minutos en total.

Ensayos con una aplicación estática cíclica

Los ensayos con aplicación estática cíclica se llevan a cabo bajo una carga vertical N constante y desplazamientos alternando $\pm d$ aplicados a la cabeza del muro. Hay que cumplir con las condiciones de borde de acuerdo a las demandas como antes se explicó en detalle.

Antes de comenzar los ensayos los siguientes valores deben ser determinados en forma estimada (a base de resultados de ensayos preliminares, resultados de una base de datos o de cálculos numéricos):

- d_{cr} : desplazamiento horizontal cuando se asume que la primera grieta se va a presentar,
- $d_{v,max}$: desplazamiento horizontal que corresponde al máximo de la carga cortante V_{max} ,
- V_{cr} : carga cortante horizontal cuando se asume que la primera grieta se va a presentar.

La ejecución se divide en tres niveles de carga:

- Nivel A: se asume que ninguna grieta se presenta, $d < d_{cr}$ resp. $V < V_{cr}$
- Nivel B: post-agrietamiento, $d_{cr} < d < d_{v,max}$ resp. $V_{cr} < V < V_{max}$
- Nivel C: post-máximo, $d_{v,max} < d$ resp. $V_{max} < V$

Cada nivel de carga se subdivide en varios escalones con un incremento de

- $\Delta d = 0.25 \cdot d_{cr}$ (Nivel de Carga A / se asume un comportamiento casi lineal elástico),
- $\Delta d = 0.50 \cdot d_{cr}$ (Nivel de Carga B / post-agrietamiento),
- $\Delta d = 1.25 \cdot d_{cr}$ (Nivel de Carga C / post-máximo).

En cada escalón de carga se aplica 3 ciclos simples de desplazamientos horizontales $\pm d$ sobre el espécimen en forma de una función senoidal. La velocidad máxima de la aplicación senoidal del desplazamiento d se determina a $d_{cr} / 2$ min.

En relación al tiempo se puede graficar el desplazamiento como se muestra en figura 10.

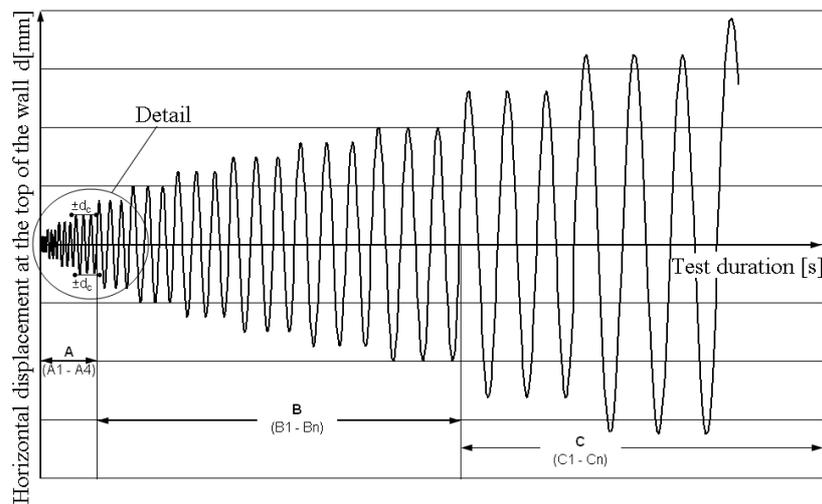


Figura 10: Los desplazamientos aplicados d a la cabeza del muro de corte durante un ensayo estático cíclico.

CONCLUSIONES

La distribución de cargas horizontales a los muros de corte se investigó a base de un modelo tridimensional de elementos finitos, donde se incluyó el comportamiento no lineal de la mampostería no reforzada por una ley de material específica. Los análisis se ejecutaron para edificios de 3 y 4 pisos y 4 planos diferentes. La orientación de la carga horizontal se investigó solamente en la dirección “débil” del edificio y se le aplicó en dirección positiva y negativa con diferentes niveles de carga.

Se descubrió que la distribución de la carga cortante a los muros depende en forma significativa del nivel de la carga, además se detectó una diferencia significativa en la influencia de la dirección de aplicación de la carga externa. En especial los muros no tan largos presentaron bajo niveles de carga altos un empotramiento significativo que llegó hasta un empotramiento completo. Para uniformizar



los ensayos bajo cargas combinadas se basan su ejecución en esta idealización. Se presenta una recomendación para el montaje del ensayo con muros de mampostería a escala natural y la consideración de las condiciones de borde en forma más realista. Finalmente se dan sugerencias para una historia de la carga en ensayos con aplicación monótona o estática cíclica.

REFERENCIAS

- [1] Fehling, E.: Analysis of Terraced House. ESECMaSE. Enhanced safety and efficient construction of masonry buildings in Europe. Workpackage D3: Theoretical Investigation on Stress States of Masonry Structures Subjected to Static and Dynamic Shear Loads (Lateral Loads)
- [2] Schermer, D.: Analysis of Apartment House. ESECMaSE. Enhanced safety and efficient construction of masonry buildings in Europe. Workpackage D3: Theoretical Investigation on Stress States of Masonry Structures Subjected to Static and Dynamic Shear Loads (Lateral Loads)
- [3] Schermer, D.: Development of a realistic shear test method. Proceedings of the 7th International Masonry Conference, 30.10. – 1.11. 2006, British Masonry Society, London.