

EVALUACION DE LA RESPUESTA SISMICA DE EDIFICIOS INSTRUMENTADOS

Rubén Boroschek K.
Departamento de Ingeniería Civil
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Universidad de Chile

e-mail rborosch@tamarugo.cec.uchile.cl

ABSTRACT

Registros de respuesta sísmica de tres edificios localizados en San Jose, California son examinados e interpretados en este estudio. Se identifican la características del comportamiento y las propiedades dinámicas básicas. Los edificios tienen aproximadamente el mismo número de pisos pero distinta estructuración. Esto permite comparar la respuesta entre los distintos sistemas estructurales y evaluar sus respectivos beneficios y limitaciones. Las respuestas de estas estructuras incluyen acoplamiento lateral-torsional, deformación de losa de piso, rotación de muros a nivel de fundación y resonancia entre otros aspectos.

INTRODUCCION

La instrumentación de obras civiles para obtener registros de su respuesta es una parte fundamental en el proceso de estudio y entendimiento del comportamiento sísmico real de estructuras. Con la información obtenida de estos registros es posible responder a preguntas como las siguientes: ¿Cuál fue la respuesta máxima y su evolución en el tiempo?, ¿Qué aspectos controlan el comportamiento de la estructura?, ¿Qué aspectos no considerados tradicionalmente son relevantes en el comportamiento observado?, ¿Qué aspectos y en qué forma debo considerar los parámetros más relevantes en un modelo computacional para reproducir el comportamiento observado?, ¿Con qué precisión reproducen los modelos clásicos el comportamiento?, ¿Cómo es posible mejorar nuestros modelos y suposiciones de diseño?.

Afortunadamente algunas instituciones y países han tenido claro la importancia de instrumentar obras civiles. Un ejemplo imitable es la labor realizada durante las dos últimas décadas por el California Strong Motion Instrumentation Program (CSMIP) de la División de Minas y Geología del Departamento de Conservación de los Estados Unidos. Esta institución posee en la actualidad más de 700 instrumentos y redes locales, de las cuales más de 100 están en edificios.

En estructuras los instrumentos están distribuidos estratégicamente de tal manera mejorar la identificabilidad de los sistemas. Básicamente con una red de instrumentos es posible determinar las características dinámicas básicas y la respuesta de la estructura (máximos, distorsiones de piso, distribución de fuerzas, etc.). Adicionalmente es posible relacionar la respuesta con el posible daño estructural, no estructural y las limitaciones en la funcionalidad del sistema.

Debido a la existencia de estas redes de instrumentos y la ocurrencia de una serie de eventos de importancia en la última década se ha logrado tener una serie de registros. Estos han dado un nuevo impulso a nuestra comprensión del comportamiento sísmico de estructuras.

En el siguiente trabajo se presenta el estudio preliminar de la respuesta de tres edificios instrumentados por CSMIP, con el fin de determinar los beneficios y limitaciones de distintos sistemas estructurales y de algunas recomendaciones de diseño. Para lograr el objetivo se estudiaron las propiedades dinámicas y envolventes de respuesta de los sistemas. La presentación acá, por limitaciones de espacio, no es exhaustiva. Aspectos adicionales de la respuesta se pueden encontrar en la Mahin y Boroschek (1989), Boroschek et. al. (1990, 1990, 1991) y Soto (1994).

A continuación se presenta la descripción básica de las estructuras.

CARACTERISTICAS BASICAS DE LOS EDIFICIOS

Edificio 1

Este es un edificio residencial de 10 pisos, que fue diseñado y construido entre 1971 y 1972 (Estación CSMIP N° 57356), Fig. 1. El sistema resistente a cargas verticales y laterales consiste en losas planas postensadas de concreto liviano conectadas a muros de corte de concreto. En la dirección transversal (EO) los muros están espaciados regularmente. En la dirección longitudinal (NS) los muros están ubicados a lo largo del eje central del edificio. Uno de los muros principales en la dirección NS se termina en el nivel 6 y ocurren varias irregularidades a nivel del primer piso. La fundación consiste en zapatas corridas sobre pilotes.

Una central analógica con trece sensores unidireccionales del tipo "fuerza balanceada" fueron instalados en el edificio. Estos están ubicados de tal manera de maximizar la obtención de las características dinámicas del edificio, los desplazamientos de entre piso, la torsión, la deformación de piso y la rotación de los muros a nivel de la fundación.

Edificio 2

Este es un edificio de uso comercial de 10 pisos con un subterráneo, (Estación CSMIP N° 57355), Fig 2. Fue diseñado en 1964 y construido en 1967. El sistema resistente a cargas verticales consiste en losas de hormigón liviano apoyadas en marcos planos de hormigón. El sistema resistente a cargas laterales consiste en un sistema dual marco-muro de hormigón en la dirección transversal y marco en la dirección longitudinal. El edificio está apoyado sobre una losa de 1.5 metros de espesor. La instrumentación del edificio es similar a la del Edificio 1.

Edificio 3

Este es un edificio de oficinas de 13 pisos, diseñado en 1972 y terminado en 1976, Fig. 3. El sistema resistente a cargas verticales y laterales consiste en un

marco espacial de acero. Para cargas laterales se cuenta además con un marco espacial perimetral de mayor rigidez y resistencia que los marcos interiores. El edificio está instrumentado con 22 sensores unidireccionales conectado a dos centrales de registro con un tiempo común.

PROCEDIMIENTO

En este estudio se presenta la respuesta de los tres edificios sometidos a los efectos de tres sismos: el de Morgan Hill del 24 de Abril de 1984 (ML= 6.2 (BRK)), el sismo de Mt. Lewis del 31 de Marzo de 1986 (ML= 5.8 (BRK)) y el sismo de Loma Prieta del 17 de Octubre de 1989 (ML= 7.0 (BRK)). Los registros utilizados fueron obtenidos y procesados por CSMIP.

Los edificios están localizados en la ciudad de San Jose, California a una distancia de entre 19 y 23 kilómetros de los epicentros. El edificio 1 y 2 están a 0.7 km de distancia entre ellos. El edificio 3 esta a 2 km de los edificio 1 y 2.

Para el proceso de los registro se utilizó filtros pasa banda con distintas frecuencias de corte dependiendo del registro y del sismo. La esquina superior osciló entre los 3.3 y 5.6 segundos. De acuerdo a estudios de CSMIP (1985) esto implica un nivel nominal de error en aceleraciones correspondientes a 1.5 gal y en desplazamiento menor a 0.5 cm. En este estudio se consideran estos parámetros nominales y se indican los resultados con envolvente menores a los dados por estas amplitudes. Adicionalmente se presta cuidado a señales que presenten períodos no asociados al comportamiento estructural.

Identificación de Propiedades Dinámicas:

Para la identificación de las propiedades dinámicas se utilizaron técnicas de identificación paramétricas y no paramétricas. Las técnicas paramétricas utilizadas están basadas en los desarrollos de Beck (1978) y McVerry (1979). La implementación y uso de estas técnicas para los registros de Loma Prieta se presentan en Soto (1994).

Envolventes de Respuesta:

Para la evaluación de la envolvente asociadas a aceleraciones y desplazamientos se utilizaron en forma directa los registros obtenidos por CSMIP.

Para el cálculo del coeficiente de desplazamiento de entre piso (IDX) se consideró una relación lineal del desplazamiento, para cada tiempo de muestreo, entre dos pisos de registro consecutivos. Por este motivo los IDX presentados son solo estimaciones del valor real en la estructura. El IDX en un piso puede ser considerablemente mayor, si debido a las características estructurales o a la presencia de daño se concentra la deformación en un piso. La verdadera deformada de entre piso puede ser estimada a partir de resultados de modelos de la estructura, pero esto no era parte de los objetivos del presente trabajo. Adicionalmente es necesario considerar, en especial en lo edificios con muros, que en el cálculo de este índice no se ha substraído el movimiento de cuerpo rígido, provocado por la

rotación de los muros a nivel de la fundación, lo que hace sobre estimar los resultados. Si esto se realiza se encontrarán índices menores.

El coeficiente basal se calculó a partir de estimaciones de las fuerzas de inercia por piso en función del tiempo. Para estimar estas fuerzas en pisos sin registro se supuso una variación lineal de la aceleración entre pisos con registros. (Esto tiene las limitaciones apuntadas arriba para el caso de desplazamientos). En los casos en que en alguna dirección se contaba con más de un registro por piso, se utilizó el promedio de los registros. La masa de cada piso fue estimada a partir de información de planos. En el caso particular del edificio 2 el coeficiente se calcula hasta el nivel de terreno.

Lamentablemente en ninguno de los edificios estudiados se contó con instrumentos de campo libre, lo que limita considerablemente el análisis de los resultados. A pesar de esto se pudo encontrar información valiosa del estudio de los registros.

Un resumen de la envolvente de respuesta se presenta en las tablas 1, 2 y 3. Mayores detalles sobre el estudio de los registros puede encontrarse en las referencias indicadas. A continuación se presenta una discusión de los aspectos asociados a beneficios de los distintos sistemas estructurales basados en los datos de las envolventes determinadas.

Durante los sismos estudiados no se observaron daños estructurales de importancia. Sin embargo el edificio de marco espacial de acero presentó considerable daño noestructural.

RESULTADOS

1-. Los sistemas estructurales presentan una marcada diferencia de comportamiento. Las características básicas indican que los edificios de muros muestran rotaciones en la base que pueden ser de hasta un 50% del movimiento relativo máximo.

2-. La presencia de sistemas con rigidez muy distinta en planta, como es el caso del sistema dual marco-muro genera deformaciones y aceleraciones mayores en los puntos medios de la losa de piso. Es así como en el sismo de Mt. Lewis la aceleración estructural máxima se determinó en el centro de la losa del piso 5. La aceleración máxima en el piso 11 (techo) en este caso fue de sólo un 93% del valor anterior.

3-. Los desplazamientos relativos y coeficientes de desplazamiento de entrepiso (IDX) observados como era de esperarse son considerablemente menores para el sistema de muros que los de marco (máximos Edificio 1: 1.8/1000; Edificio 2: 1.5/1000 (dual) y 1.3/1000 (marcos); Edificio 3: 8.5/1000). (Existe una clara direccionalidad en el movimientos para los distintos sismos). Para el edificio 1 el coeficiente de desplazamiento de entre piso es un 36% del valor establecido por el Uniform Building Code (UBC) (1991) para fuerza elásticas reducidas de diseño. Para el edificio 2 este valor es un 45% en la dirección del sistema dual y 52% en

la dirección de los marcos, suponiendo un marco del tipo sismoresistente dúctil. Para el Edificio 3 este valor es un 340%. Estos desplazamientos concuerdan con las observaciones del daño. En la figura 4 se han dibujado los desplazamientos relativos horizontales de los piso superiores para cada edificio (en el edificio 3 este corresponde al piso 12). Estos desplazamientos han sido normalizados por la altura a la base. Es decir esta figura representa el desplazamiento de entrepiso promedio del punto representativo más alto de la estructura. En figura se aprecia la fuerte influencia estructural en la respuesta. De esta manera se puede concluir que el sistema de marco espacial de acero por su flexibilidad y baja disipación de energía no tuvo un buen comportamiento para estos sismos (Boroschek et.al, 1991).

4-. El coeficiente sísmico basal derivado de los registros de aceleración, para el edificio de marco espacial de acero es 4.2 veces el estipulado por el UBC (1991) para cargas de diseño. Si se escalan los desplazamientos por este factor, encontramos que el coeficiente de desplazamiento de entrepiso máximo (IDX) es 0.20 que es menor al máximo estipulado por el código. Este escalamiento está permitido en el código. A pesar de lo anterior el comportamiento del edificio es inadecuado para estos sismos y otros estudiados presentando grandes daños no estructurales. Esto indica que el parámetro de corte de diseño, por si solo, no es un buen indicador del comportamiento del sistema. El comportamiento de este edificio como lo indica Boroschek y Mahin (1991) está determinado por efectos de acoplamiento lateral torsional, bajo amortiguamiento y resonancia entre otros los cuales no están incluidos explícitamente en la mayoría de los códigos de diseño.

REFERENCIAS

1. Beck, J. (1978). "Determining Models of Structures From Earthquake Records". Earthquake Engineering Research Laboratory Report EERL 78-01, California Institute of Technology, Pasadena, California, Junio 1978.
2. Boroschek, R., Mahin, S. y Zeris, C. (1990). "Seismic Response and Analytical Modeling of Three Instrumented Buildings". Proceedings Fourth US National Conference on Earthquake, Engineering, Palm Springs, California, 1990.
3. Boroschek, R., Mahin, S. y Zeris, C. (1990). "Seismic Response of Three Instrumented Buildings", University of California, Berkeley, Structural Engineering Mechanics and Materials Report Nº UCB/SEMM 90/17.
4. Boroschek, R. y Mahin, S. (1991) "Investigation of the Seismic Response of a Lightly Damped Torsionally Coupled Building", Earthquake Engineering Research Center, Report EERC 91/18, Berkeley, California, 1991.
5. Mahin, S., Boroschek, L., Zeris, C. (1989). "Engineering Interpretation of Responses of Three Instrumented Buildings in San Jose", Seminar on Seismological and Engineering Implications of Recent Strong Motion Data, 1989.
6. McVerry, G. (1979). "Frequency Domain Identification of Structural Models from Earthquake Records". Earthquake Engineering Research Laboratory Report EERL 79-02, California Institute of Technology, Pasadena, California, Junio 1979.
7. CSMIP (1985). "Processed Data from the Strong motion Records of the Morgan Hill Earthquake", Part II, OSMS-85-05, 1985.

- 8 Soto, P. (1994). "Identificación de Propiedades Dinámicas de Edificios Utilizando Registros de Movimiento Fuerte". Memoria de Título Universidad de Chile, Depto de Ingeniería Civil, 1994.
9. Uniform Building Code (1991). International Conference of Building Officials.

Tabla 1: Envoltente de Respuesta Edificio 1

	MORGAN HILL	MT LEWIS	LOMA PRIETA
MAX. ACEL. VERTICAL DEL SUELO (g)	0.04	0.03	0.09
MAX. ACEL. HORIZONTAL DEL SUELO (g)	0.06	0.04	0.12
MAX. ACEL. ESTRUCTURAL (g)	0.22	0.12	0.37
MAX. DESPL. RELATIVO EO (cm)	0.76	--	1.57
MAX. DESPL. RELATIVO NS (cm)	2.06	--	4.06
MAX. IDX. EO (1/1000)	0.2	0.5	0.78
MAX. IDX. NS (1/1000)	1.0	0.4	1.8
MAX. TORSION ESTRUCTURAL (cm)	0.53	--	0.94
COEFICIENTE CORTE BASAL EO (V/W)	0.096	0.05	0.15
COEFICIENTE CORTE BASAL NS (V/W)	0.100	0.04	0.16
MAX. ROTACION EN LA BASE (cm)	0.23	--	0.53
DEFORMACION DE LOSA (cm)		--	0.45

Tabla 2: Envoltente de Respuesta Edificio 2

	MORGAN HILL	MT LEWIS	LOMA PRIETA
MAX. ACEL. VERTICAL DEL SUELO (g)	0.03	0.02	0.06
MAX. ACEL. HORIZONTAL DEL SUELO (g)	0.06	0.03	0.10
MAX. ACEL. ESTRUCTURAL (g)	0.22	0.09	0.37
MAX. DESPL. RELATIVO EO (cm)	2.43	0.68	6.43
MAX. DESPL. RELATIVO NS (cm)	3.25	1.49	5.00
MAX. IDX. EO (1/1000)	0.8	0.20	1.5
MAX. IDX. NS (1/1000)	1.2	0.55	1.3
MAX. TORSION ESTRUCTURAL (cm)	0.42	0.40	1.71
COEFICIENTE CORTE BASAL EO (V/W)	0.13	0.047	0.21
COEFICIENTE CORTE BASAL NS (V/W)	0.11	0.044	0.15
MAX. ROTACION EN LA BASE (cm)	0.46	0.17	----
MAX. DEFORMACION EN LA LOSA (cm)	0.22	0.15	0.66

Tabla 3: Envoltente de Respuesta Edificio 3

	MORGAN HILL	MT LEWIS	LOMA PRIETA
MAX. ACEL. VERTICAL DEL SUELO (g)	0.04	0.04	0.10
MAX. ACEL. HORIZONTAL DEL SUELO (g)	0.02	0.02	0.11
MAX. ACEL. ESTRUCTURAL (g)	0.17	0.32	0.34
MAX. DESPL. RELATIVO EO (cm)	18.64	15.63	34.72
MAX. DESPL. RELATIVO NS (cm)	17.94	33.19	38.17
MAX. IDX. EO (1/1000)	4.1	3.1	8.2
MAX. IDX. NS (1/1000)	4.0	7.2	8.5
MAX. TORSION ESTRUCTURAL (cm)	7.28	12.22	12.32
COEFICIENTE CORTE BASAL EO (V/W)	0.08	0.06	0.18
COEFICIENTE CORTE BASAL NS (V/W)	0.09	0.15	0.17

NOTA: Los valores no indicados presentan amplitudes menores al ruido nominal o los registros no estan disponibles.

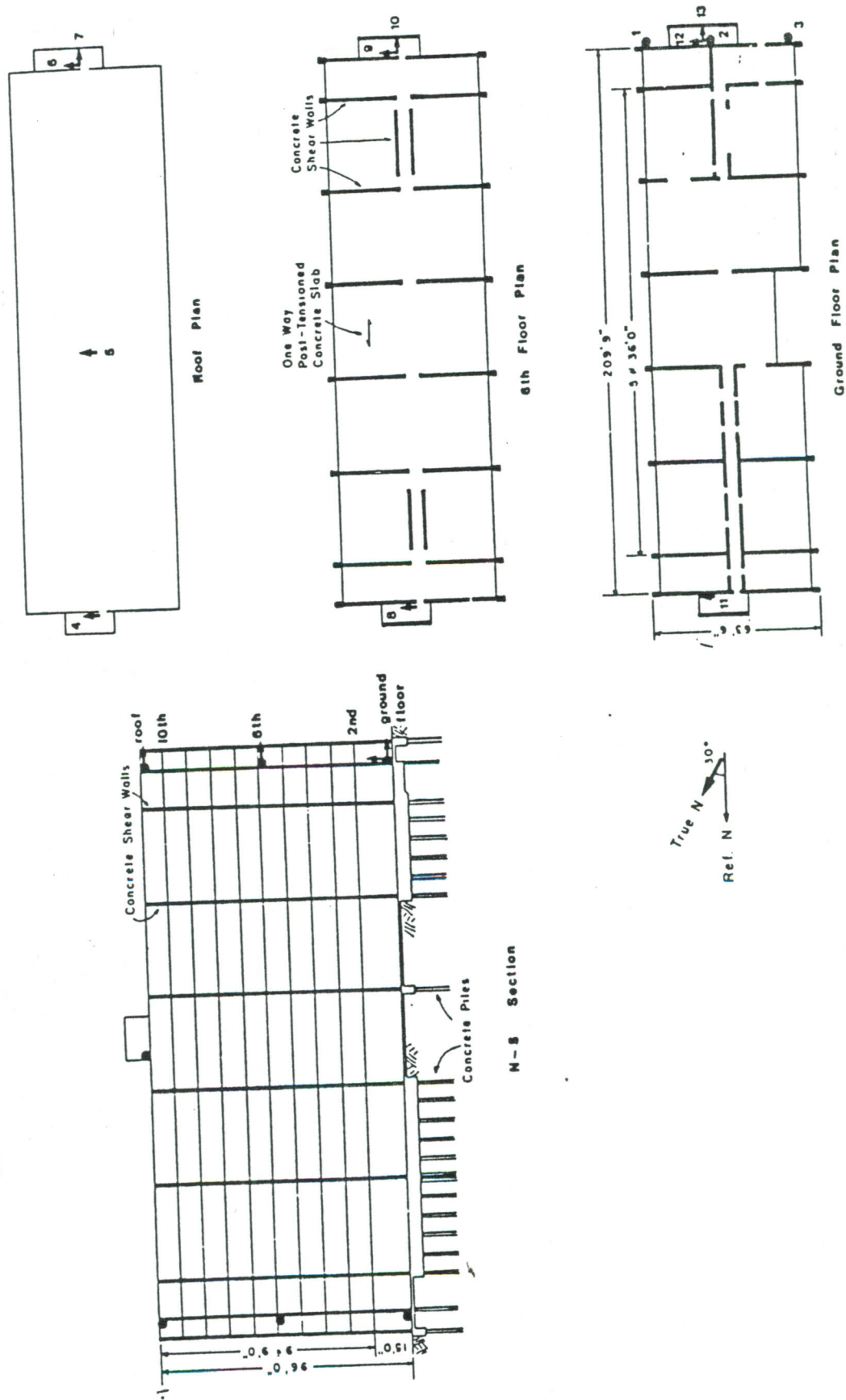


Figura 1. Edificio 1. Características básicas y localización de sensores. (CSMIP, 1985).

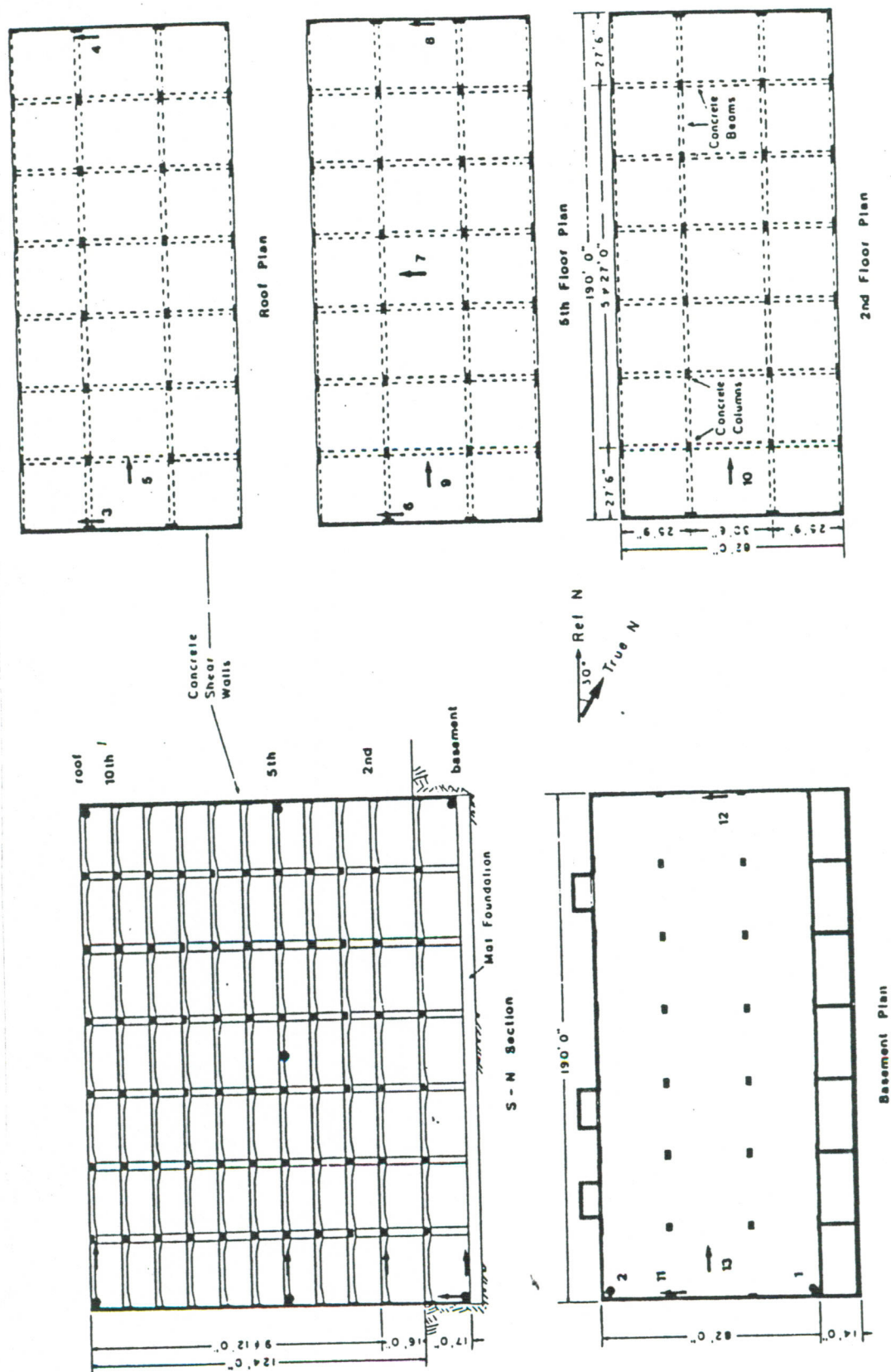


Figura 2. Edificio 2. Características básicas y localización de sensores. (CSMIP, 1985).

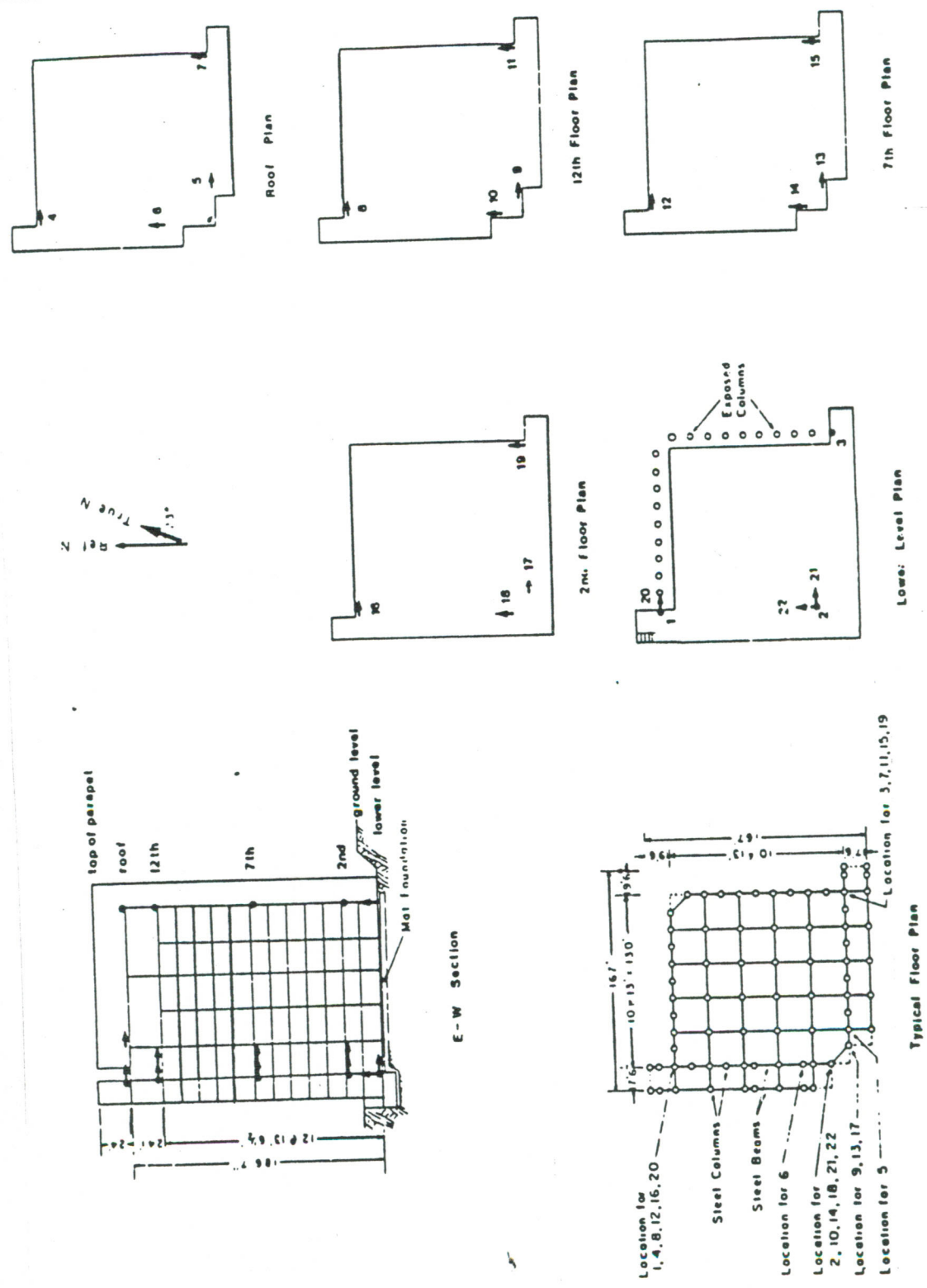


Figura 3. Edificio 3. Características básicas y localización de sensores. (CSMIP, 1985).

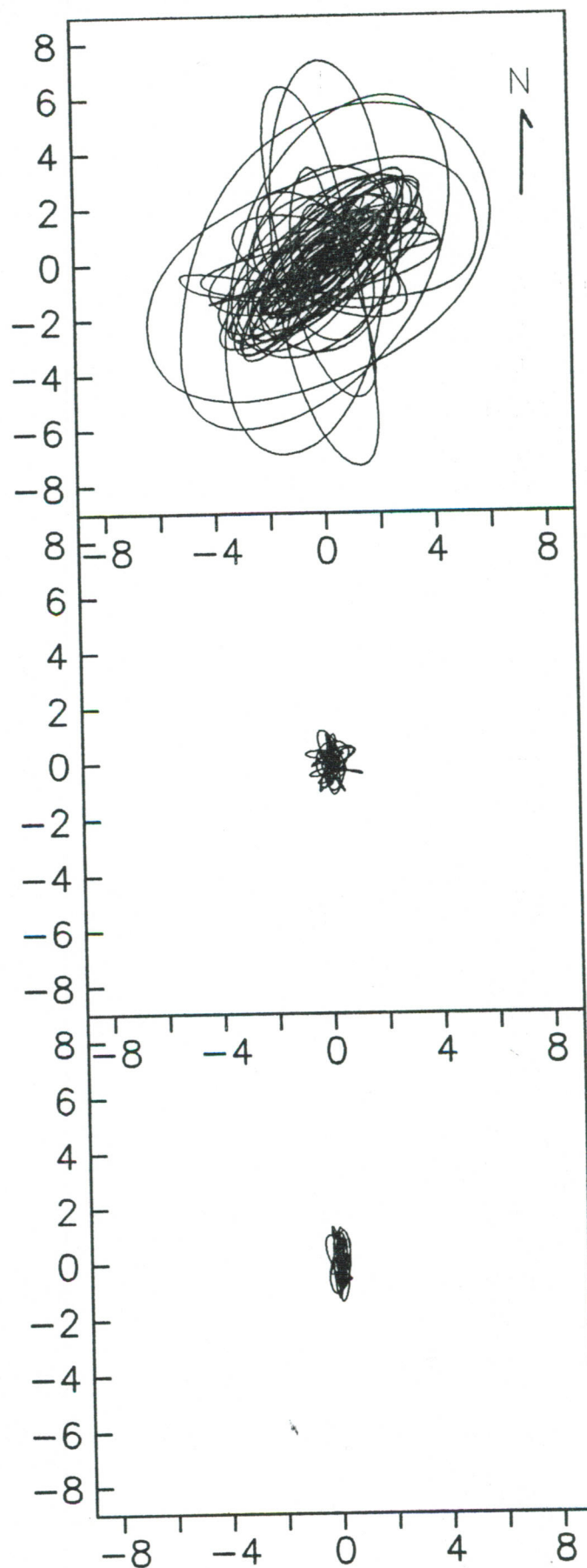


Figura 4. Desplazamiento relativo normalizado con respecto a la altura para el sismo de Loma Prieta. Figura superior edificio de marco espacial (3), medio edificio dual (2), inferior edificio de muros (1).