

[建築構造]

阪神・淡路大震災における被災建築物の地震応答解析 (1)

— SRC造スーパーラーメン構造建物 —

内海良和 関松太郎
 田中耕太郎
 (本店 建築設計第6部)

概要

本報告では、兵庫県南部地震において、おおむね震度7の地域に立地し、被害を受けたスーパーラーメンより成る12階建てSRC造建物を対象としたシミュレーション解析を示す。設計は、新耐震設計法への移行期の1979年で、1981年に竣工している。被害は南北方向に集中しており、南北方向構面のスーパーラーメン構造を形成しているSRCプレースの破断および雑壁のせん断破壊が顕著である。建物の挙動を解析し、弾塑性性状の追跡、および被害との対応により入力地震動の大きさを推定することを目的として、部材レベルによる立体骨組弾塑性静的、動的解析を行った。動的解析では、兵庫県南部地震時の強震記録を用いて作成した人工地震波を入力地震波とし、最大加速度を450gal、550galおよび650galの3種類として1方向(南北方向)入力の解析を行った。実被害との対応により、本建物への地震入力加速度は650gal程度であったと推定される。

1. はじめに

本報告では、兵庫県南部地震により被害を受けたスーパーラーメンより成る12階建てSRC造建物のシミュレーション解析を示す。被害は南北方向に集中しており、南北方向構面のSRCプレースの破断および雑壁のせん断破壊が顕著である。建物の挙動を解析し、弾塑性性状の追跡、および被害との対応により入力地震動の大きさを推定することを目的として、部材レベルによる立体骨組弾塑性静的、動的解析を行った。

2. 建物概要

本建物は、神戸市中央区のおおむね震度7の地域に立地している。設計は、新耐震設計法への移行期の1979年で、1981年に竣工している。

構造規模は、地上12階建て(一部地下1階)の事務所ビルであり、地下1階から地上12階の部分と地上1階から4階の部分とがあり、エントランスを含む正方形の部分(前者)が高層部、その周囲(後者)が低層部になっている。高層部は南北および東西とも各6スパン(18.6m)であり、低層部は、各8スパン(29.475m)である。平面的にはエントランスを含む対角線が対称軸となるほぼ線対称の架構になっている(Fig. 1)。

構造的特徴としては、高層部において周囲4辺の架構は大架構を形成し、内部架構は通常のラーメン架構である。

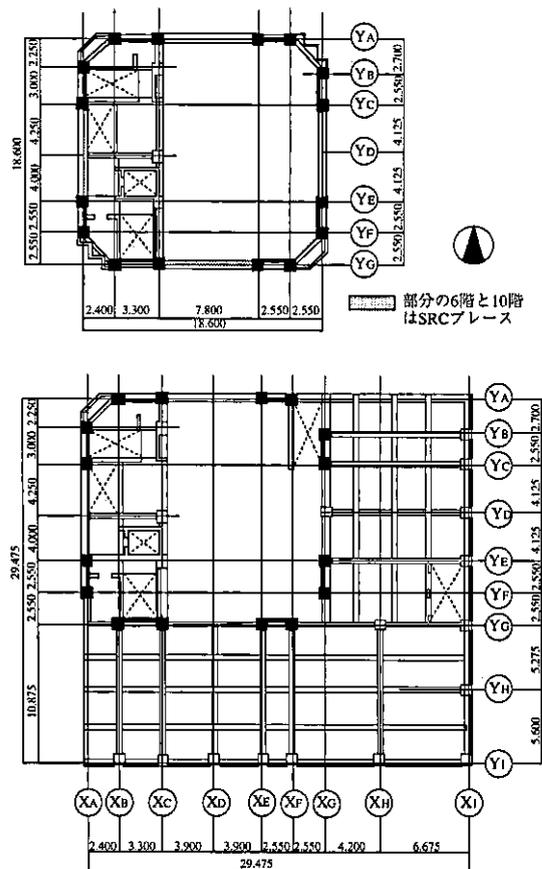


Fig. 1 平面図 (上; 5~12階, 下; 1~4階)
 Building Plan
 (Above; 5th to 12th Story, under; 1st to 4th Story)

低層部については、外部架構はブレースまたは耐震壁を含む架構となっている。大架構の柱は2本の柱とその間にブレースを設けた構造であり、2本の柱は、軸力と曲げ、ブレースは大架構の柱としてのせん断力に抵抗する。大架構の梁も柱と同様な構造であり、2、6、10階に大架構の梁を設けている。Fig. 2にXG通りの軸組図を被害状況とともに示す。

大架構の柱、梁および低層部のブレースは充腹材(一部の梁はラチス材)の鉄骨からなるSRC構造である。また柱は、100mmピッチのフープ筋(D10, D13)でせん断補強されている。スラブについては、3階から12階は中空スラブを採用している。

使用材料は、次の通りである。コンクリートは、普通コンクリートで $F_c=240\text{kgf/cm}^2$ を使用している。鉄筋は、異形鉄筋でD22以上にはSD35を使用し、D19以下にはSD30を使用している。継手については前者はガス圧接、後者は重ね継手としている。鉄骨は、6階柱、7階梁以下には、SM50を用い、7階柱、8階梁以上には、SS41を用いている。中空スラブの中空管は、3階床のみ $\phi 125$ であり、その他は $\phi 200$ である。

3. 被害概要

スーパーラメン構造を形成している南北方向のSRCブレース(断面をFig. 3に示す)の被害が特徴的である。6階のSRCブレースは、Photo 1に見られるように鉄骨の端部の接合部で破断していた。10階のSRCブレースは端部でコンクリートが圧壊していた。また2階は、XA通りのSRCブレースが端部でコンクリートが圧壊しており、XG通りのYCからYE通りはSRCブレース入りのコンクリート壁となっており、コンクリートにひび割れが発生していた。柱は1階および5階の柱脚が圧壊し、コンクリートはく落、フープ筋の破断が見られた。一方、梁には比較的小さなひび割れが見られた程度であった。また構造設計上、耐震要素として算入されていない建物中央部南北方向のRCの間仕切壁(エレベーターシャフト壁や階段室など(以後、雑壁とよぶ))には、せん断破壊が見られた。外装材の被害はほとんどなかった。なお、建物全体では中破と判定されている。

4. 解析方法

解析は、当社開発の立体骨組弾塑性解析プログラム「DREAM-3D」を用いて、部材レベルの弾塑性性状に基づき、静的、動的解析を行った。

主な仮定条件を以下に示す。

- a) 解析モデルは1階から12階までをモデル化した立体骨組で、1階脚部で固定とする。
- b) 水平変形に対し、剛床とする。
- c) 梁の曲げ変形は、材端剛塑性バネモデル(Tri-Linear型復元力特性)で表す。

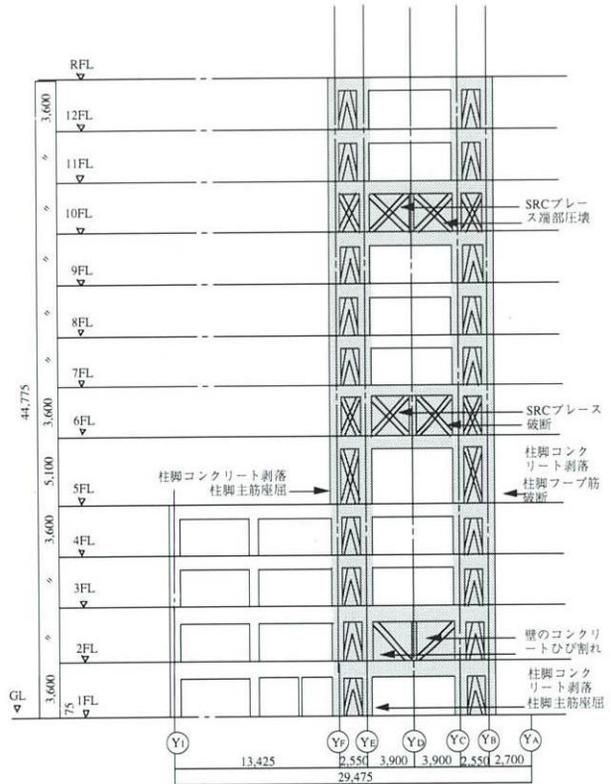


Fig. 2 XG通り軸組図および被害状況 Building Section and Damages



Photo 1 SRCブレース被害状況(6階) Damage of SRC Brace (6th Story)

名称	2, 6階	10階
断面		
主筋	4 - D22	4 - D22
帯筋	D10 - @200	D10 - @200
鉄骨	BH - 250*200*9*19	H - 200*200*8*12
材質	SM50	SS41

Fig. 3 SRCブレース断面図 Section of SRC Brace

d) 柱、壁の2方向の曲げと軸方向の3軸の相関関係は、材端に設置したマルチスプリングモデルで表す。

e) 柱、壁の材軸中央部の軸方向変形は、弾性とする。

f) 梁のせん断変形は弾性とする。

g) 柱梁接合部は剛域とする。

h) SRCブレースの軸方向変形、耐震壁および雑壁のせん断変形は弾塑性とし、最大耐力経過後、負勾配を有するTri-Linear原点指向型復元力特性とする²⁾。なお、負勾配の第3折線が横軸と交わる点以降はその部材はないものとする。

i) SRCブレースのスケルトンカーブ上の特異点の耐力は正負対称とし、第一折点はコンクリートのひび割れ耐力とする。第二折点は、最大耐力を鉄骨のみとして、各鉄骨の引張強度に断面積を掛けたもので評価し、さらにボルト穴の欠損率を考慮して、最大耐力の0.77倍とする。

また、入力地震波は、兵庫県南部地震時に新神戸駅付近の建物で測定された強震記録(関西地震観測研究協議会から公表されたS0222のN33W方向の観測記録)を工学的基盤面での入力波として、本建物付近のボーリングによって得られた地盤特性を考慮して1次元波動理論によって作成したサイト波である。波形をFig.4に示す。この地震波の最大加速度は451gal, 最大速度は71kineである。また減衰3%の応答スペクトラムをFig.5に示す。

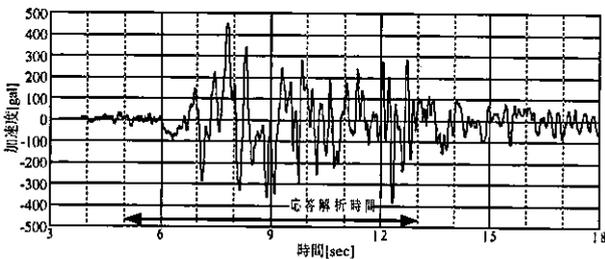


Fig. 4 入力地震波
Input Earthquake

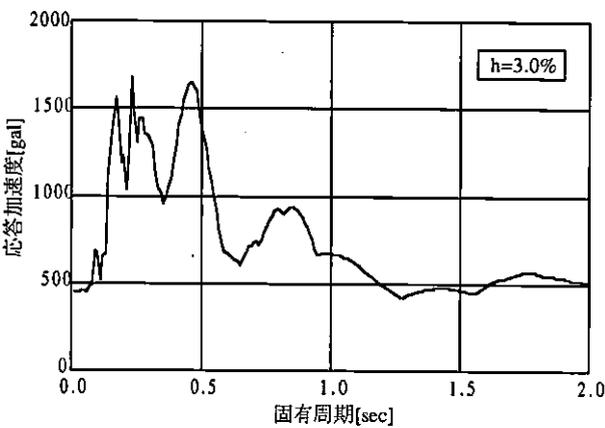


Fig. 5 入力地震波の応答スペクトラム
Response Spectrum

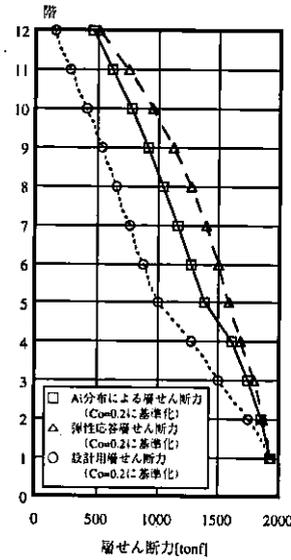


Fig. 6 層せん断力分布
Distribution of Shear Force

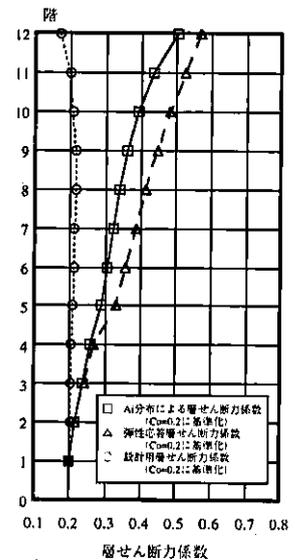


Fig. 7 層せん断力係数分布
Distribution of Shear Force Coefficient

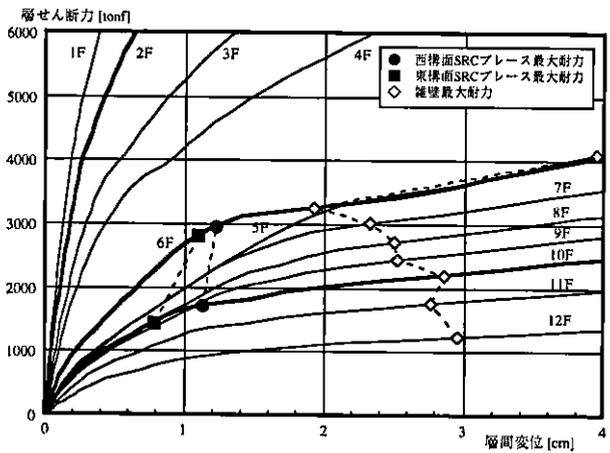


Fig. 8 層せん断力 - 層間変位関係
Relationship between Story Shear Force and Story Deflection

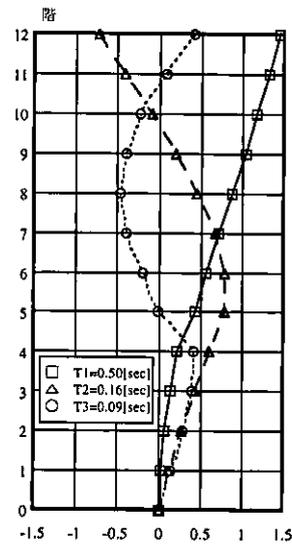


Fig. 9 刺激関数
Participation Vector

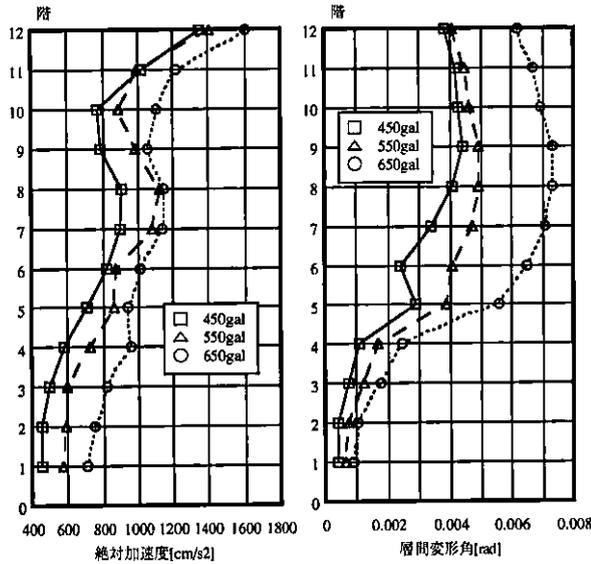


Fig. 10 絶対加速度
Absolute Acceleration

Fig. 11 層間変形角
Story Drift

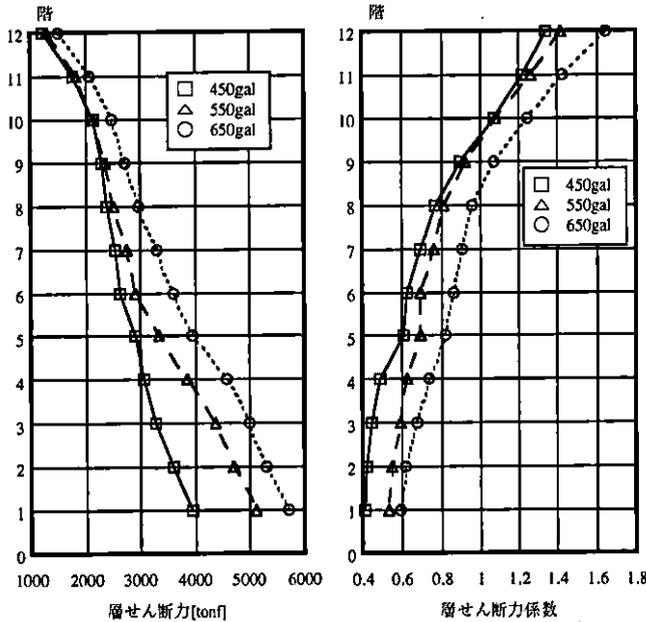


Fig. 12 層せん断力
Shear Force

Fig. 13 層せん断力係数
Shear Force Coefficient

4.1 立体骨組静的弾塑性解析

水平力の載荷は、南北方向（南側から載荷）とし、高さ方向の分布形は地震波による弾性応答解析結果（各層の最大応答せん断力）を包絡するものとした。Fig. 6, 7に、本解析に用いた層せん断力分布と層せん断力係数分布を示す。図中には設計せん断力分布およびAi分布によるせん断力分布も、Co=0.2に基準化して示す。

4.2 立体骨組動的弾塑性解析

動的解析として、南北方向のみの1方向入力とし、南北方向にのみ振動自由度を持たせた立体骨組動的弾塑性解析を行った。なお、減衰は瞬間剛性比例型の内部粘性減衰とし、減衰定数は1次振動形に対して3%とした。また、入力地震波は地震時の入力の大きさを推定するために、

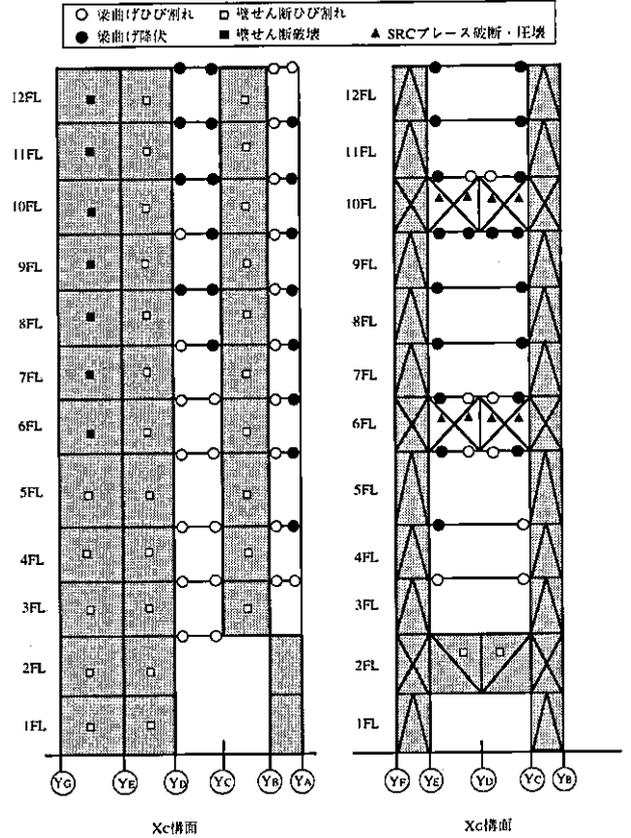


Fig. 14 解析による被害状況
Damages by Analysis

最大加速度を450galと、550galおよび650galに増大させたものの3種類の計算を行った。ここで、計算時間は、波形の特徴を考慮して5秒から13秒までの8秒間とした。

5. 解析結果および考察

5.1 立体骨組静的弾塑性解析

静的解析により得られた各層の層せん断力と層間変位関係を Fig. 8 に示す。SRCブレースの最大耐力経過点と、連層連スパンの雑壁がせん断破壊を開始する点を同図に示す。

5階は階高が高いことにより、他階に比して剛性が低いこと、6階および10階において、SRCブレースが破断・圧壊するまで高い剛性を示しており、破断後に急激に剛性が低下していることがわかる。

5.2 立体骨組動的弾塑性解析

5.2.1 立体骨組固有値解析 立体骨組モデルの固有値解析より得られた刺激関数を Fig. 9 に示す。1次固有周期は、0.50秒である。低層棟から高層棟へ切り替わる5階で建物の形状が変化していることが振動モードに表われている。

5.2.2 入力加速度の違いによる比較 各入力加速度に対する応答解析結果から推定される被害状況の比較を行う。

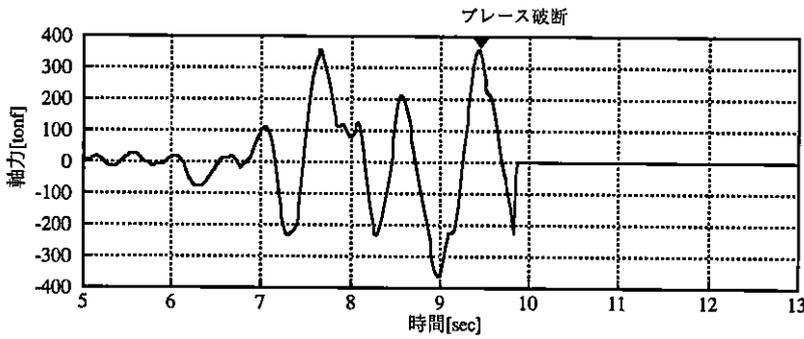


Fig. 15 SRCブレースの軸力の時刻歴 (6階)
Time Histories of Axial Force on SRC Brace
(6th Story)

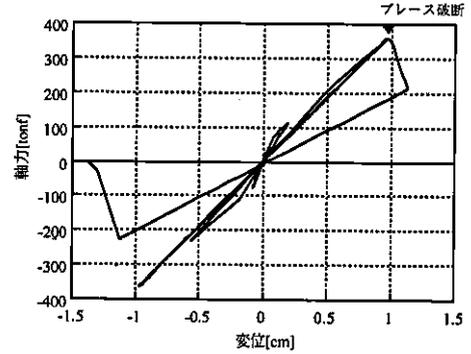


Fig. 16 SRCブレースの履歴 (6階)
Relationship between Axial Force and
Deflection on SRC Brace (6th Story)

450gal入力の場合、6階のSRCブレースに破断・圧壊が起っていない。550gal入力の場合、6および10階のSRCブレースともに破断・圧壊するが、雑壁の被害が軽微である。最後に650gal入力の場合、6および10階のSRCブレースが破断・圧壊し、雑壁の被害も6階から12階まで最大耐力に達し、せん断破壊に到っている。

以上の結果と実際の被害状況を比べると、ここで用いた地震波に対しては、本建物への入力加速度は650gal程度であったと推定される。

また各入力加速度に対する絶対加速度および層間変形角、層せん断力および層せん断力係数をFig. 10からFig. 13に示す。

5.2.3 入力加速度650galの場合 Fig. 14にXC構面とXG構面の650gal入力による被害の状況を示す。

梁については高層部で曲げ降伏しており、中層部では曲げひび割れ程度である。

SRCブレースは、XA通り6階および10階、XG通り10階において7.56秒から7.62秒で破断・圧壊し、XG通り6階は8.98秒から9.44秒で破断・圧壊した。実現象で最も被害の程度が大きかったXG通り6階のブレースの軸力の時刻歴と軸力-変位関係の履歴をFig. 15およびFig. 16に示す。図よりブレースが9.44秒で引張側で最大耐力に達して破断し、負勾配に入っていることがわかる。

またXC構面の連層連スパンの雑壁は6階から12階まで、10.20秒から10.72秒にかけて最大耐力に達している。実現象では、5階の壁もせん断破壊しているが、本解析では塑性率0.75であり破壊には至っていない。

6. まとめ

兵庫県南部地震により被害を受けたスーパーラメンより成る12階建てSRC造建物のシミュレーション解析を行った。

建物の挙動を解析し、弾塑性性状の追跡、および被害との対応により入力地震動の大きさを推定することを目的として、部材レベルによる立体骨組弾塑性静的、動的解析を行った。動的解析では、最大加速度を450gal、550galおよび650galの3種類として1方向(南北方向)入力の解析を行った。本解析に用いた地震波の場合、650gal入力において、6階と10階のSRCブレースおよび建物内部の連層連スパンの雑壁の被害という実現象を、おおむね再現できた。これら実被害との対応により、本建物への地震入力加速度は650gal程度であったと推定される。

参考文献

- 1) 永原, 江戸, 他: 高層RC建物の終局強度型一貫設計支援システム (その2) 立体骨組弾塑性応答解析, 日本建築学会情報システム利用技術シンポジウム, (1989)
- 2) 竹内, 江戸, 他: 兵庫県南部地震における新長田駅前高層SRC造建物の解析的検討一その2: 立体骨組静的弾塑性解析一, 日本建築学会大会学術講演梗概集, (1996)