

崩壊過程を考慮した建築構造物の地震時挙動と その復元力特性

山下忠道¹・張 富明²・久保哲夫³

¹博士(工学) 防災科学技術研究所地震防災フロンティア研究センター (〒673-0433 三木市三木山2465)

²工博 防災科学技術研究所地震防災フロンティア研究センター (〒673-0433 三木市三木山2465)

³工博 名古屋工業大学工学部社会開発工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

In this paper discusses seismic behaviors of the building structures considering collapse process in strong earthquake motion. The ratio of stiffness deterioration which shear force response reach zero was calculated through the elasto-plastic response analysis. As a result, it is assured that input level and predominant period of earthquake have a stronger effect ratio of stiffness deterioration in collapse process.

Key Words : collapse, stiffness deterioration, hysteretic damping, soft first story

1. はじめに

激震時に建築構造物が受ける損傷レベルや崩壊状況を定量的に推定することは、都市の地震防災を考える上で重要なことである。しかしながら、これまでの耐震構造分野では、建物の構造要素について、耐力や変形能力に関する研究に重点が置かれ、崩壊に至るまでの動的な挙動については、明らかにされていないのが現状である。また、建物の応答予測についても、復元力モデルを完全弾塑性型や変形硬化則に設定し、建物の損傷レベルを評価するものがほとんどであった。

しかしながら、建物の耐震性能を正確に評価するためには、建物が崩壊メカニズムを形成する際の挙動について、耐力が緩やかに低下し比較的安定的な挙動を示せば崩壊に至らないのか、急激に耐力の劣化が進行する場合でも高耐力化しておけば崩壊に至らないのかといった点について、定量的な情報を得ておく必要がある。

本研究では、種々の地震動を用いて建物の弾性1次固有周期ならびに降伏ベースシャーを解析パラメーターとして、崩壊を決定付ける剛性低下率(初期剛性に対する降伏せん断剛性の割合)の値を弾塑性逆解析によって求め、崩壊に寄与する主要な因子の影響を明らかにしようとするものである。そして、今後更に信頼性の高い性能設計法の提案や、既存不

適格と思われる建築構造物群に対してより高精度な耐震性評価法を確立するための情報を提供することを念頭に置いて、崩壊過程を考慮した建築構造物の地震時挙動について検討を行っていく。

2. 解析手順ならびに解析結果の評価方法

本論文は、崩壊問題を扱う第一段階の研究として、ピロティー建物の崩壊挙動をターゲットとし、1自由度系構造モデルの崩壊現象について検討を行う。

現在、耐震設計および耐震性能評価を行う際には、1)~2)の事項(損傷評価)が主な対象となっており、想定した地震荷重を大幅に上回る場合、以下に示す全ての事項について検討が必要となる。

- 1) 必要保有水平耐力に対する保有水平耐力の大きさ
- 2) 耐力の低下が生じるまでの塑性変形能力および累積塑性変形能力
- 3) 最大耐力に達した後の剛性低下レベル(部材の劣化(強度低下)および $p-\Delta$ 効果等)

そこで、本研究では、3)の事項に関して筆者等が新たに開発した弾塑性逆解析プログラムにより検討し、構造モデルの復元力特性を図2.1に示すバイリニア型とスリップ型の2種類¹⁾のモデルを用いて、崩壊過程を考慮した建築構造物の地震時挙動について検証を行う。

構造物の崩壊の定義については、構造物の塑性変形が最終的に一方に累積し、応答せん断力が零になったとき、すなわち、構造物の復元力が部材の劣化や $p-\Delta$ 効果によって復元力が零になった点を軸力保持能力喪失²⁾として崩壊を定義する。

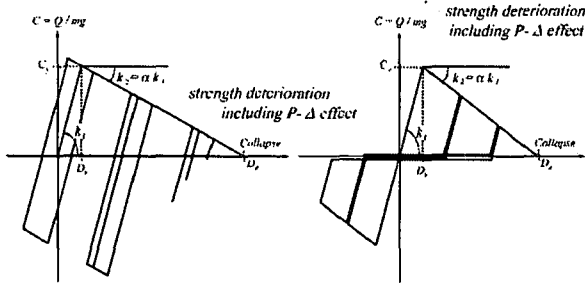


図2.1 復元力特性

本研究では、水平1方向のみ自由度を有するせん断型構造モデルを用いて、構造モデルの弾性1次固有周期 T_1 が0.1~5.0(s)となるケースを扱う。また、構造モデルの標準せん断力係数 C_0 は、0.2、0.4、0.6、0.8、1.0(g)の場合について検討を行い、各構造モデルの降伏せん断力について、第2種地盤上の建物を想定、振動特性係数(R)を考慮した上で、各構造モデルの諸元を定めた。ただし、各構造モデルの等価粘性減衰は、減衰定数を5%とした剛性比例型減衰モデルを仮定した。

本研究を通じて数値解析には、剛性が軟化した場合にも安定した解が得られる半陽的解法であるオペレーター・スプリッティング法³⁾を用い、積分時間刻みを0.0005秒とした。

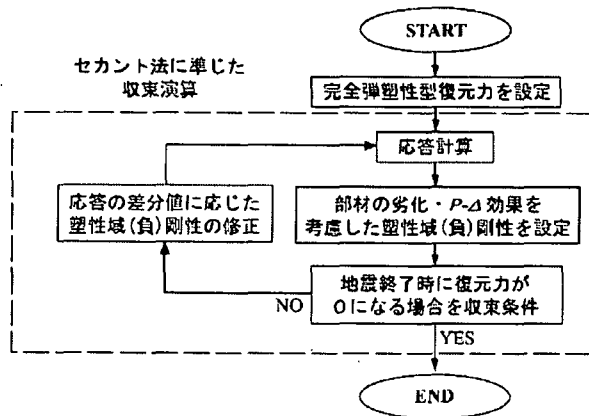


図2.2 弾塑性逆解析のフローチャート

地震終了時に復元力が零になる条件を満たす剛性低下率を、セカント法^{4,5)}に準じた収束演算に基づく弾塑性逆解析(※剛性低下率の初期値には零の値を設定する。すなわち、バイリニア型モデルの場合、完全弾塑性型の復元力を仮定する。

さらに、剛性低下率の算出には、地震終了時に復元力が降伏ベースシャーの1%以内の値に収まることを収束条件とした。)により算出する。この解析手順のフローチャートを図2.2に示す。

入力地震動には、地動最大速度を100、75、50cm/sに基準化した表2.1に示す実測5波を用いる。

表2.1 解析に用いる入力地震動

Name	Earthquake Data	Component
JMA Kobe	Hyogo-Ken-Nanbu,1995	NS
El Centro	Imperial Valley, 1940	NS
Taft	Kern County,1952	EW
Hachinohe	Tokachi-Oki,1968	NS
TH030	Miyagi-Ken-Oki	EW

※JMA Kobe NSの速度波形の算定には、Trifunacの方法を用いた。

本研究の検証では、構造モデルの弾性1次固有周期 T_1 、標準せん断力係数 C_0 を解析パラメータとして、構造モデルの崩壊過程を評価する剛性低下率 α (第2・1分枝せん断剛性比)を用いる。また、構造モデルのエネルギー吸収特性について、地震入力エネルギー等価速度 V_I 、履歴減衰エネルギー等価速度 V_H による評価を行う。さらに、エネルギー吸収(塑性変形)の片寄りを評価するために、履歴中心軸片側での履歴減衰エネルギーを全体の履歴減衰エネルギーで除したエネルギーの消費分担率 η により、建築構造物の崩壊挙動について考察を行う。

尚、構造物の崩壊挙動に対して、地震動の卓越周期の影響を検証するため、図2.4にJMA Kobe NS波(速度の基準化は行わない)の加速度応答スペクトルを示す。

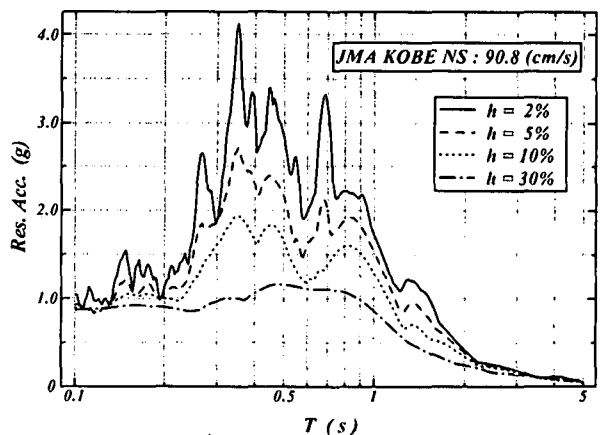


図2.4 加速度応答スペクトル(JMA Kobe NS)

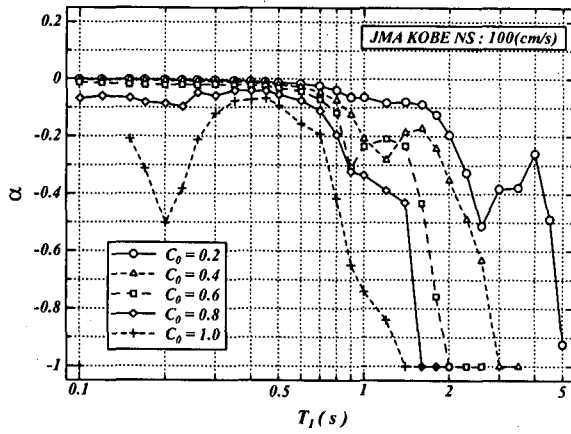


図3.1.1 剛性低下率(バイリニアモデル : 100cm/s)

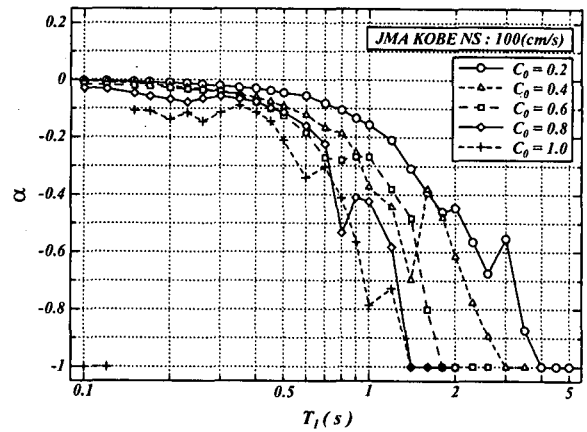


図3.1.2 剛性低下率(スリップモデル : 100cm/s)

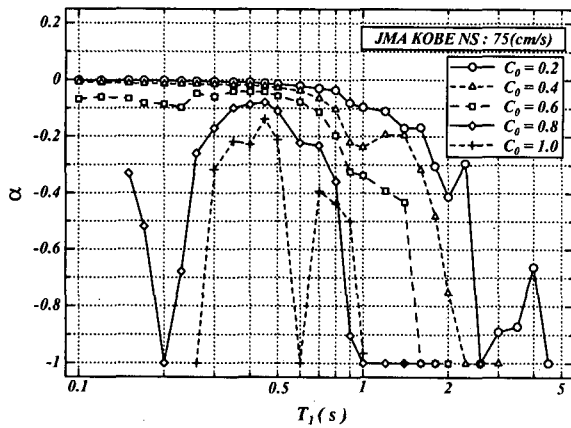


図3.1.3 剛性低下率(バイリニアモデル : 75cm/s)

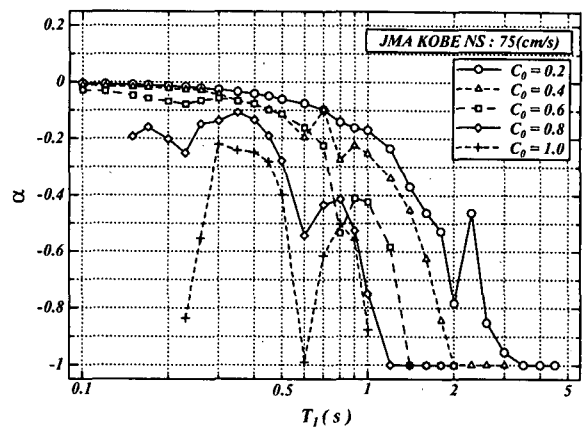


図3.1.4 剛性低下率(スリップモデル : 75cm/s)

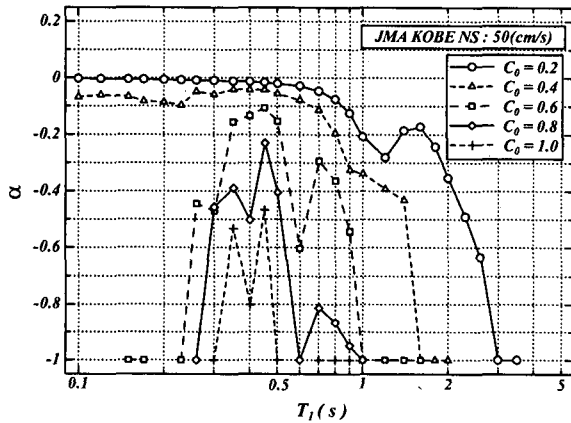


図3.1.5 剛性低下率(バイリニアモデル : 50cm/s)

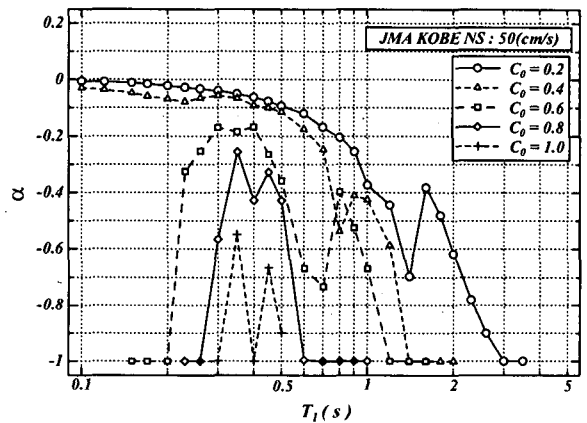


図3.1.6 剛性低下率(スリップモデル : 50cm/s)

3. 地震応答特性

図3.1.1～3.1.6は、JMA Kobe NS波(100cm/s、75cm/s、50cm/s)入力時における、各構造モデル群の剛性低下率 α (バイリニア型復元力、スリップ型復元力)について、各構造モデルの弾性1次固有周期 T_1 に対する変動特性を構造モデルの標準せん断力係数 C_0 の異なるケース毎に算定した結果を示す。

地震入力レベルを100cm/sに基準化した場合、構造モデルの弾性1次固有周期が比較的短い領域において、剛性低下率 α の値は、いずれの復元力モデルにおいても大きく、標準せん断力係数の違いによる差異も小さい。一方、構造モデルの弾性1次固有周期が長い領域の場合、剛性低下率 α の値は、復元力のモデルに関わらず、標準せん断力係数の違いによる差異が大きいことがわかる。(※剛性低下率 α の値が-1.0

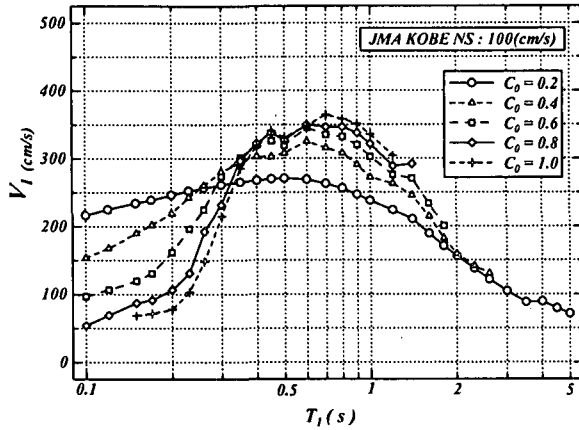


図3.2.1 地震入力エネルギー等価速度
(バイリニアモデル：100cm/s)

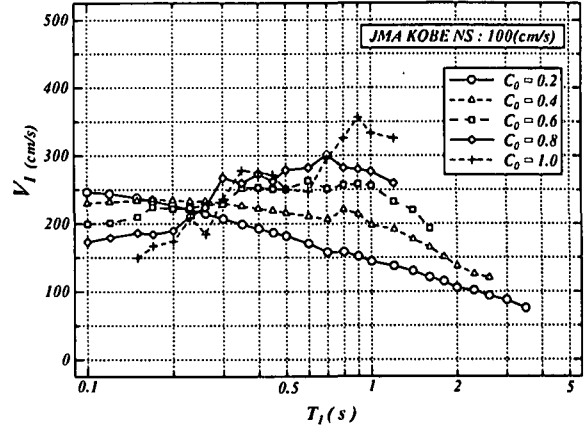


図3.2.2 地震入力エネルギー等価速度
(スリップモデル：100cm/s)

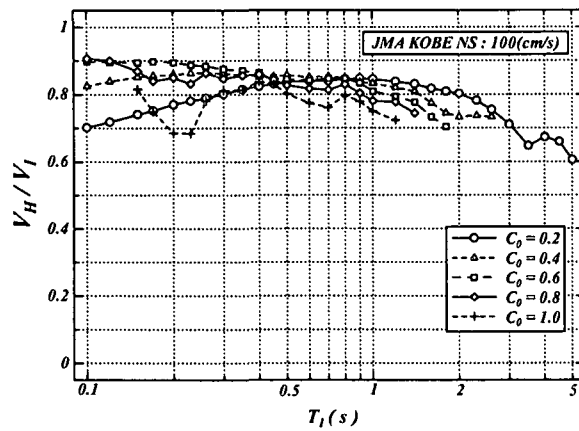


図3.3.1 無次元化履歴減衰エネルギー等価速度
(バイリニアモデル：100cm/s)

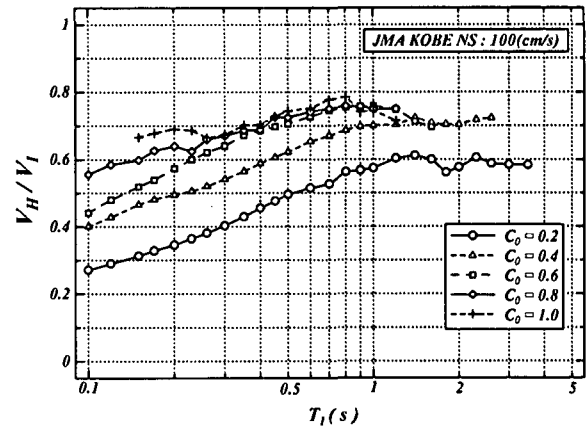


図3.3.2 無次元化履歴減衰エネルギー等価速度
(スリップモデル：100cm/s)

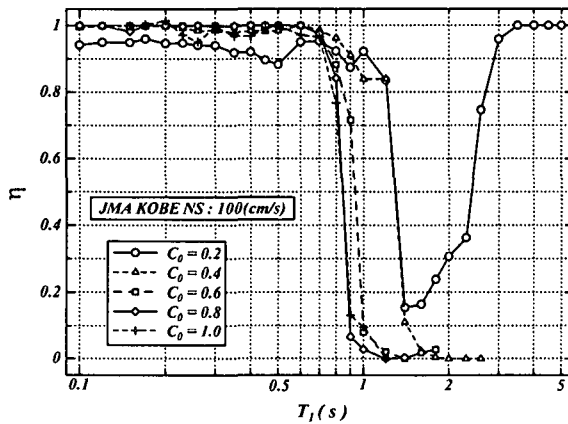


図3.4.1 履歴減衰エネルギーの消費分担率
(バイリニアモデル：100cm/s)

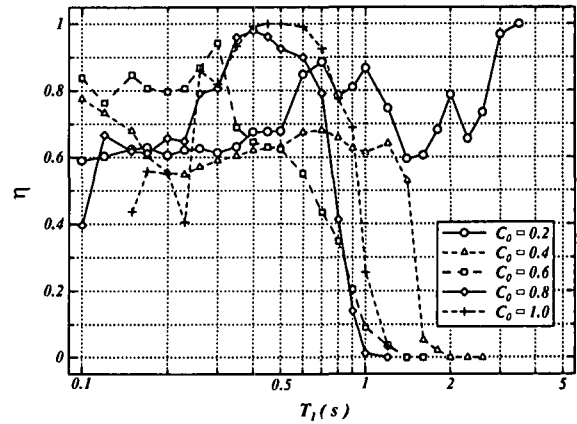


図3.4.2 履歴減衰エネルギーの消費分担率
(スリップモデル：100cm/s)

の場合、構造モデルは塑性化するが崩壊には至らないことを示している。）

次に、地震入力レベルを75、50cm/sに基準化した場合の剛性低下率 α の値は、地震動の卓越周期近傍における構造モデルにおいて、標準せん断力係数の

違いによる差異が比較的小さく、他の周期帯に属する構造物系と比べて、地震動の卓越周期成分の影響が大きいたことがわかる。

図3.2.1～3.2.2は、図3.1.1～3.1.2に対応した地震入力エネルギー等価速度 V_I の変動特性を示す。

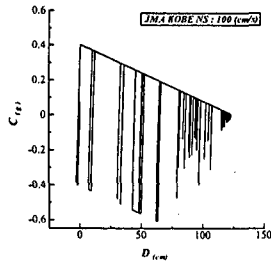


図3.5.1 パイリニア型
($T_1=0.4$, $C_0=0.4$)

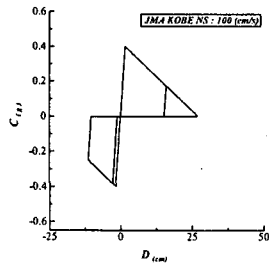


図3.5.2 スリップ型
($T_1=0.4$, $C_0=0.4$)

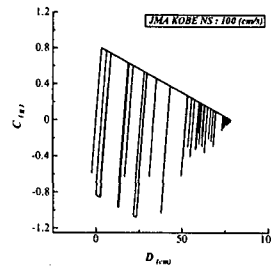


図3.5.3 パイリニア型
($T_1=0.4$, $C_0=0.8$)

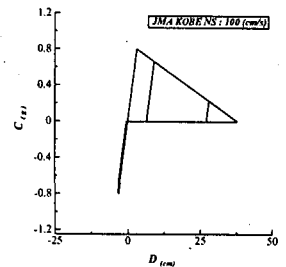


図3.5.4 スリップ型
($T_1=0.4$, $C_0=0.8$)

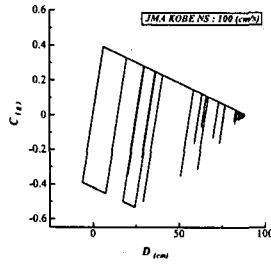


図3.5.5 パイリニア型
($T_1=0.8$, $C_0=0.4$)

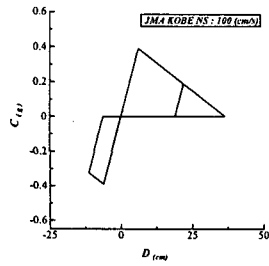


図3.5.6 スリップ型
($T_1=0.8$, $C_0=0.4$)

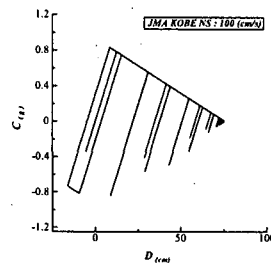


図3.5.7 パイリニア型
($T_1=0.8$, $C_0=0.8$)

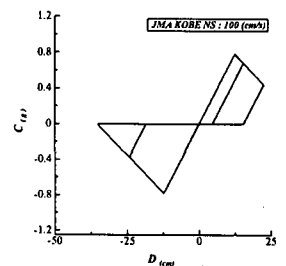


図3.5.8 スリップ型
($T_1=0.8$, $C_0=0.8$)

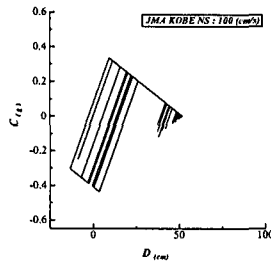


図3.5.9 パイリニア型
($T_1=1.2$, $C_0=0.4$)

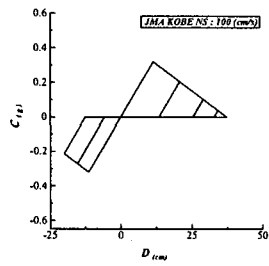


図3.5.10 スリップ型
($T_1=1.2$, $C_0=0.4$)

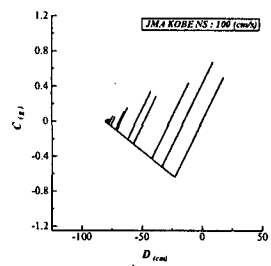


図3.5.11 パイリニア型
($T_1=1.2$, $C_0=0.8$)

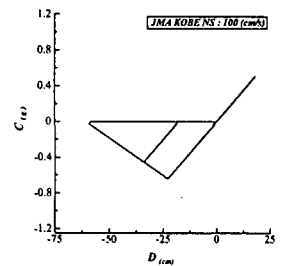


図3.5.12 スリップ型
($T_1=1.2$, $C_0=0.8$)

地震入力エネルギーについては、復元力モデルが異なるいずれの構造物系においても、標準せん断力係数の違いによる差異は大きく、変形硬化則に基づく復元力の構造物系とは異なる傾向を示している。

図3.3.1～3.3.2は、図3.1.1～3.1.2に対応した履歴減衰エネルギー等価速度VHを地震入力エネルギー等価速度VIで除した無次元化履歴減衰エネルギー等価速度VH/VIの変動特性を示す。

履歴減衰によるエネルギー吸収は、パイリニア型のほうが履歴によるエネルギー吸収の割合が大きく、標準せん断力係数の違いによる差異は小さい。また、スリップ型のエネルギー吸収は、粘性減衰によるエネルギー消費が大きいことがわかる。

図3.4.1～3.4.2は、図3.1.1～3.1.2に対応した履歴減衰のエネルギー消費分担率 η (η の値が0.50の場合、履歴エネルギーの消費分担割合は履歴中心軸の両側で同じ量となる)の変動特性を示す。

パイリニア型の場合、エネルギー吸収(塑性変形)の片寄りについて、標準せん断力係数の違いによる

影響は小さく、エネルギー吸収の片寄り傾向が強い。それに対して、スリップ型のエネルギー吸収は、短周期領域において片寄りの傾向が弱く、標準せん断力係数の違いによる変動も大きい。

図3.5.1～3.5.12には、JMA Kobe NS波入力時(100cm/sに基準化した場合)における各構造モデル(弾性1次固有周期 T_1 が0.4、0.8、1.2(s)のケース、標準せん断力係数 C_0 が0.4、0.8(g)のケース)のパイリニア型モデルとスリップ型モデルの履歴曲線を示す。

これらの図より、崩壊過程を考慮した建築構造物の地震時挙動を評価する場合、通常の応答解析では扱わない大変形領域を予測対象とするため、今後は実地震による被災建物との照合や多質点構造モデルによる地震応答を検証し、等価1自由度系による応答値の推定精度ならびに適用限界についても検討する必要があると思われる。

図3.6.1～3.6.4は、El Centro NS, Taft EW, Hachinohe NS, TH030 EW 波入力時(100cm/sに基準化した場合)における、構造モデル群の剛性低下率 α (パイリ

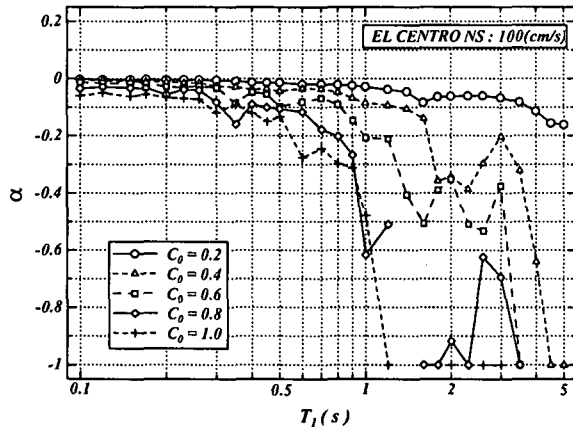


図3.6.1 剛性低下率(El Centro NS : 100cm/s)

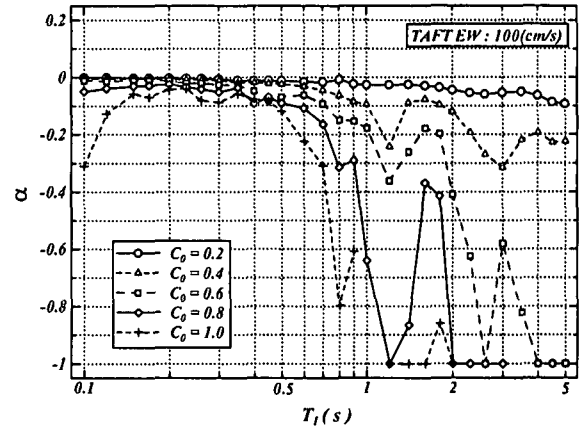


図3.6.2 剛性低下率(Taft EW : 100cm/s)

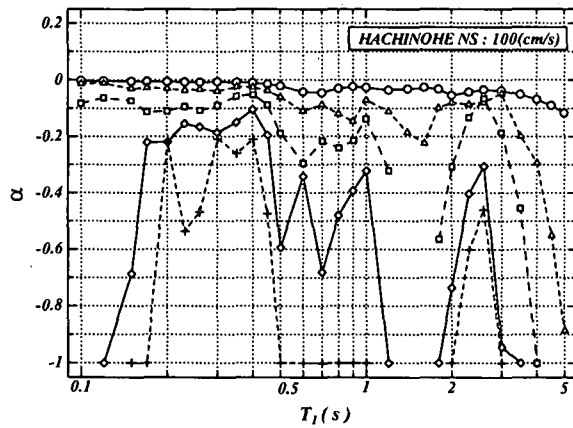


図3.6.3 剛性低下率(Hachinohe NS : 100cm/s)

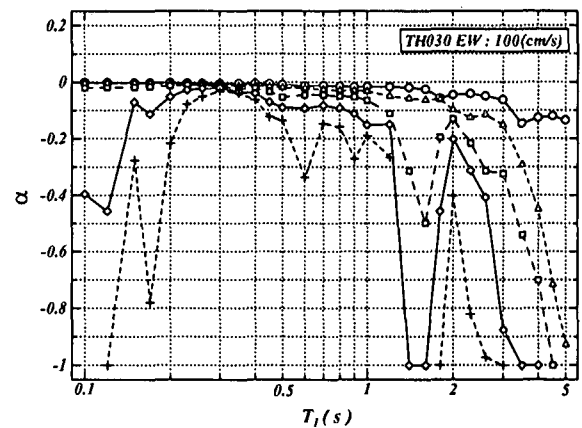


図3.6.4 剛性低下率(TH030 EW : 100cm/s)

ニア型のケース)について、構造モデルの弾性1次固有周期 T_1 に対する変動特性を標準せん断力係数 C_0 の異なるケース毎に算定した結果を示す。

JMA Kobe NS波と同様、構造モデルの弾性1次固有周期が比較的短い領域においては、崩壊を防止するための剛性低下率 α の値を大きく(零に近づける)設定する必要があり、標準せん断力係数の違いによる耐震性能(崩壊を防ぐための α の値)の差も小さいことがわかる。また、長周期側に卓越成分を有するHachinohe、TH030波では、長周期領域に属する構造物系において、標準せん断力係数の違いによる差異が比較的小さくなっている。

4. まとめ

本研究では、崩壊過程を考慮した建築構造物群の地震時挙動について検証を行った。

その結果、短周期領域に属する構造物系では、剛性低下の割合が小さい(α の値が大きい)復元力モデルのほうが耐震性(崩壊に至らない可能性が高い)に優れ、長周期側に属する構造物系では、高耐力化することで耐震性能の向上が期待できる。

しかしながら、崩壊を決定付ける剛性低下の割合については、地震動の入力レベルや卓越周期が強く影響しており、今後の検討が更に必要である。

参考文献

- 1)加藤 勉 他, (1975), 「強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷」, 日本建築学会報告集, 第 235 号, pp. 9-18.
- 2)中村孝也 他, (2002), 「せん断破壊型鉄筋コンクリート短柱の軸力保持限界に関する研究」, 日本建築学会構造系論文集, 第 561 号, pp. 193-199.
- 3)中島正愛 他, (1990), 「サブストラクチャ仮動的実験のための数値積分法 サブストラクチャ法を用いた仮動的実験の開発」, 日本建築学会構造系論文集, 第 417 号, pp. 107-117.
- 4)今井 浩 他, (1978), 「非線形計画法」, 日科技連.
- 5)中川 徹 他, (1982), 「最小二乗法による実験データ一解析」, 東京大学出版会.
- 6)張 富明, (1996), 「水平動と鉛直動をうける1質点2自由度系の地震応答及び崩壊性状」, 構造工学論文集, Vol. 42B, pp. 41-48.