

P-Δ 効果がもたらす損傷集中が倒壊限界の地震入力エネルギーに与える影響

Influence of the damage concentration by the P-Δ effect on the ultimate input energy

○竹ノ谷幸宏¹, 石鍋雄一郎², 半貫敏夫³

*Yukihiko Takenoya¹, Yuichiro Ishinabe², Toshio Hannuki³

Abstract: The P-Δ effect has an influence on the strength and deformation response and energy absorption efficiency. In addition, it results in damage concentration of multistory frames. The relationship between the P-Δ effect and the damage concentration is examined in this study by the seismic response analysis. The first story of the multistory frame supports the largest weight, thus the influence of the P-Δ effect is remarkable. However, the damage concentration does not occur always in the first story. Analysis considering the P-Δ effect about some one story gives minimum energy to collapse. This is not excessively evaluation of the safety.

1. はじめに

建物に生じた水平変形と重力による P-Δ 効果は、構造物の損傷に影響を与える。P-Δ 効果により、剛性・耐力が低下し、変形の偏りや最大変形の増大、エネルギー吸収効率の低下が生じる。多層骨組ではさらに損傷集中が誘発される^[1]。

P-Δ 効果による損傷集中は、支える重量が最も大きくなる多層骨組の第 1 層で顕著であると考えられている。しかし、他の層に比べて相対的に耐力が小さい層で損傷集中が起こるため、P-Δ 効果により、最初に耐力低下が生じた層の損傷集中が増幅される。そのため、必ずしも第 1 層に損傷集中が生じるとは言えない。そこで、本研究では P-Δ 効果と損傷集中の関係をエネルギーに着目して地震応答解析により検討する。特に、P-Δ 効果を考慮した、耐力が低下する層と入力エネルギーの関係について考察する。

2. 解析条件

2.1 損傷集中のない多層骨組(基本形)

損傷集中の検討を行うために、まず損傷集中のない状態を設定する。本解析では、10 層の鋼構造剛接骨組を対象とした 10 質点系せん断型モデルにおいて、各層の累積塑性変形倍率 η が設定値の誤差±15%以内になるような降伏せん断力係数分布を試行錯誤により探し出した。 η の設定値が小さいと、1 回の塑性変形で設定値を満たすような偏った変形が生ずることが考えられるため、複数回の塑性変形を想定し、 $\eta = 10$ とした。累積塑性変形倍率 η は次式で示される。

$$\eta = \delta_p / \delta_Y \tag{1}$$

δ_p : 累積塑性変形 δ_Y : 降伏層間変形

解析条件を Table 1 に示す。減衰による効果にはバラツキが多く、一貫した評価が困難となるため無減衰とする。エネルギースペクトルが固有周期 1 秒以上にお

いて一定値となるような人工地震波を作成し、地震波形による振動モードへの影響を検討する。エネルギースペクトルを Fig.1 に示す。

Table 1 Analysis condition

解析モデル	せん断型多質点系
層数	N = 10
復元力特性モデル	完全弾塑性型
減衰定数	h = 0
1次固有周期 (s)	T = 1.0 ~ 1.5
ベースシア係数	$\alpha_1 = 0.2, 0.25$
降伏せん断力係数分布	$\eta = 10$ となるように設定
地震波	El-Centro (NS) Hachinohe (EW) 人工地震波

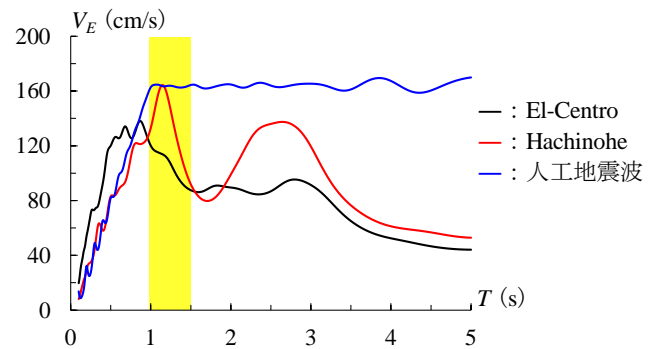


Fig.1 Energy spectra (h = 0.1)

2.2 P-Δ 効果のパラメータ設定

P-Δ 効果は負の弾性剛性を持つバネ効果と見なすことができる。これにより見かけの剛性が低下し、それに伴い耐力が低下する。この P-Δ 効果の影響度合いを示す指標として安定係数 θ が用いられる。安定係数は P-Δ 効果による負の弾性バネ剛性と建物の弾性剛性の比であり、次式で示される。また、式(2)より安定係数は降伏せん断力係数によって異なる。

$$\theta = \frac{k_{P\Delta}}{k} = \frac{\theta_Y}{\alpha} \tag{2}$$

$k_{P\Delta}$: P-Δ 効果による負の弾性剛性 k : 建物の弾性剛性
 θ_Y : 降伏層間変形角 α : 降伏せん断力係数

1: 日大理工・院(前)・建築 2: 日大理工・教員・建築 3: 日大名誉教授

$P-\Delta$ 効果のパラメータ設定を Table 2 に示す. 各層の降伏層間変形, 層の高さ, 層の質量を一定としているため, 層が上がるにつれて降伏せん断力係数が大きくなり, 安定係数は小さくなっていく. $P-\Delta$ 効果層は 10 層の内 1 つの層のみ考慮した場合と全層考慮した場合の 2 パターンの検討を行う.

復元力が 0(倒壊)となる時の入力エネルギー(以下, 倒壊入力エネルギーと称す)を地震波の加速度倍率を変化させ求める. 1 つの層のみ $P-\Delta$ 効果を考慮した場合は, 1~10 層すべてを試して最も倒壊入力エネルギーが小さくなったケースである.

Table 2 Parameters of the $P-\Delta$ effect

降伏層間変形角 θ_y	0.005 (1/200)	
ベースシア係数 α_1	0.2	0.25
第1層の安定係数 θ_1	0.025	0.02
$P-\Delta$ 効果層	1つの層のみ, 全層	

3. 解析結果

損傷集中のない場合(基本形)の各層の η を Fig.2 に示す. Fig.2 中の破線は許容誤差 $\pm 15\%$ を示す. この基本形に $P-\Delta$ 効果を考慮する. $P-\Delta$ 効果を考慮した場合の各層の η を Fig.3 に示す.

Fig.3 より, $P-\Delta$ 効果を考慮することで, 著しい損傷集中が生じることが分かる. また, 損傷集中層以外の η はほぼ等しく, 同程度の損傷となる. ベースシア係数, 地震波等の解析パラメータが異なっても同様の傾向を示した.

次に, $P-\Delta$ 効果層の違いによる影響を考察する. 倒壊入力エネルギーを Fig.4 により比較する. Fig.4 中の数字は, 凡例のプロットの色と対応しており, それぞれの $P-\Delta$ 効果層の条件下で, 最小の倒壊入力エネルギー時の倒壊層である. Fig.4 の縦軸は総入力エネルギーの無次元量 A_E であり, 次式で示される値である.

$$A_E = E \frac{Mg^2 T^2}{4\pi^2} \quad (3)$$

E : 総入力エネルギー M : 総質量 g : 重力加速度

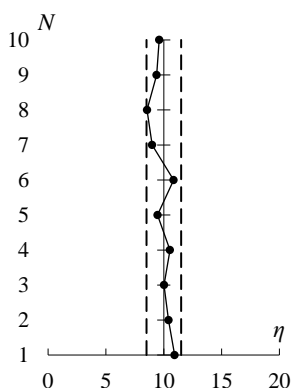


Fig.2 Basic form (El-Centro, $\alpha_1=0.2$, $T=1.0s$)

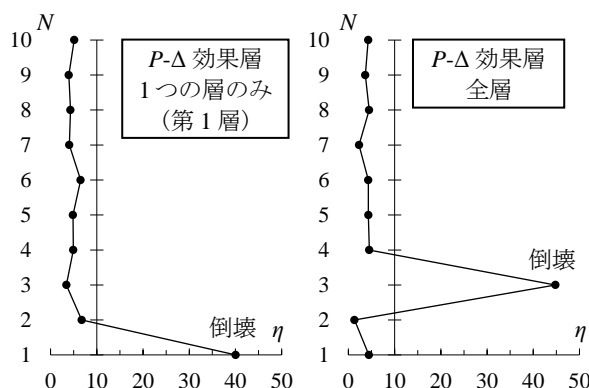


Fig.3 Consideration of $P-\Delta$ effect (El-Centro, $\alpha_1=0.2$, $\theta=0.025$, $T=1.0s$)

Fig.4 より, $P-\Delta$ 効果の影響が最も大きくなると考えられる, 第 1 層のみに $P-\Delta$ 効果を考慮した場合の倒壊入力エネルギーが必ずしも最小とは限らない. ほとんどのケースは 1 つの層のみ考慮で, 倒壊入力エネルギーが最小となる. 全層が $P-\Delta$ 効果によって耐力低下を引き起こす場合, 1 つの層における損傷集中が緩和され, 倒壊入力エネルギーが大きくなったと考えられる. Fig.4 では 1 つの層のみと全層で, 倒壊層が同じケースが見られるが, 解析パラメータにより倒壊層は異なる.

1 つの層のみに $P-\Delta$ 効果を考慮した場合における, 最小の倒壊入力エネルギー時の倒壊層を Fig.5 に示す. Fig.5 より, 地震波によって倒壊層がバラつき, 明確な関係性は見られない.

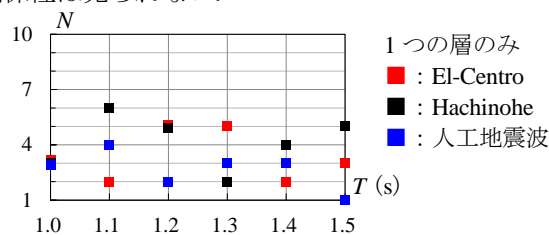


Fig.5 Story to collapse ($\alpha_1=0.2$, $\theta=0.025$)

4. まとめ

$P-\Delta$ 効果が損傷集中に与える影響を地震応答解析により検討した. 以下に得られた知見を示す.

1 つの層のみに $P-\Delta$ 効果を考慮した場合が最小の倒壊入力エネルギーとなるが, 全層考慮という実際的な条件の解析結果と大差ないケースが多いため, 今回の検討範囲で行った 1 つの層のみ考慮した場合が過剰に安全側ではない.

実構造物では二次剛性, 減衰の影響で $P-\Delta$ 効果による損傷集中は緩和されると考えられるが, $P-\Delta$ 効果は損傷集中を引き起こす重要な要因である.

5. 参考文献

[1] 秋山宏: $P-\delta$ 効果を考慮したせん断型多層骨組の耐震設計, 日本建築学会構造系論文集, 第 617 号, pp.87-94, 2007.7

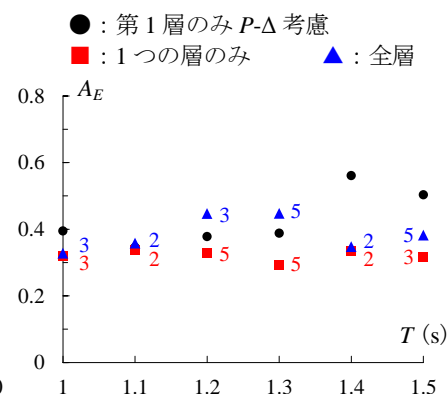


Fig.4 Input energy to collapse (El-Centro, $\alpha_1=0.2$, $\theta=0.025$)