

論文 高さ方向の剛重比分布を考慮した RC 造建物における 応答水平外力分布に関する研究

加藤 誠一^{*1}・荒川 利治^{*2}

要旨：高さ方向の剛重比分布が変動する RC 造建物の振動性状について、部材の塑性化を考慮した地震応答解析により検討した。剛重比が変動する建物において、層間変位分布は剛性分布、水平外力分布は重量分布の変動が、影響の大部分を占めることが分かった。また、上層部において剛重比の変動が小さい建物は、上層部の層間変位に変動がみられないことを確認した。さらに、弾性応答時の水平外力分布は、設計 A_i 分布によってほぼ表現できているが、弾塑性応答時の水平外力分布は、等分布的となるために、上層部あるいは下層部において、設計 A_i 分布による評価に、大きな誤差が生じることを明らかにした。

キーワード：均等フレーム、剛重比、地震応答、弾塑性解析、水平外力、層間変位、 A_i 分布

1. はじめに

中低層、中層および中高層の RC 造建物を構造設計する際、高さ方向の構造特性分布をバランス良くすることは、建物の振動特性を効率よく把握することができ、経済的である。しかし、今日、高さ方向の構造特性分布は、複雑化する傾向にあり、設計段階で、十分な注意が必要と考えられる。これに対し、1981 年に新耐震設計法が施行されて以来、中低層、中層、中高層の RC 造建物において、構造設計者は、地震荷重の高さ方向分布を設計 A_i 分布によって評価してきている。

1995 年の兵庫県南部地震では、RC 造建物において、高さ方向の構造特性分布の不均衡性あるいは不連続性が原因とみられる、途中階、あるいは下層部のみが崩壊する被害が多数確認された。しかしながら、高さ方向の構造特性分布が、建物の振動特性に及ぼす影響の検討^{1),2)}は、不十分な点が多く、早急な研究、対応が求められている。

一方、1998 年に建築基準法が改正され、耐震設計における設計体系は、「性能設計」へと移行することになっている。そこで、構造物の性能を的確に評価する一つの方法として、静的増分解析法は、

ますます重要となってくる。RC 造のように、低い荷重レベルでひび割れを生じ、剛性低下する建物においては、静的増分解析法が、耐震性能を評価する有効な解析法である。静的増分解析法においては、地震荷重の高さ方向分布が、構造物の性能を決定する重要な要因となる。

以上のことから、強度、剛性、重量、剛重比および減衰など、高さ方向の構造特性分布が、建物の地震荷重分布^{3),4)}、あるいは変形性状に及ぼす影響について、基礎的データを蓄積することは、実際の構造設計において非常に有用となる。

本研究では、特に、高さ方向の剛重比分布が RC 造建物における地震応答時の水平外力分布、および層間変位分布に及ぼす影響について検討することを目的としている。また、弾性、あるいは弾塑性応答時の水平外力分布が、設計 A_i 分布によってどの程度評価できているかを検証する。

2. 解析仮定

2.1 解析対象建物と入力地震波

解析対象とした建物は、終局強度設計した 5 層、10 層、15 層の RC 造均等フレームである。これら

*1 明治大学大学院生 理工学研究科建築学専攻（正会員）

*2 明治大学助教授 理工学部建築学科 工博（正会員）

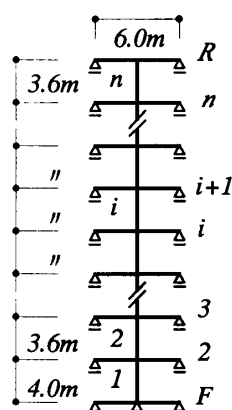
図-1 1スパン
フレーム

表-1 解析対象建物の部材断面

5層建物			10層建物			15層建物		
階	梁b×D [cm ²]	柱B×D [cm ²]	階	梁b×D [cm ²]	柱B×D [cm ²]	階	梁b×D [cm ²]	柱B×D [cm ²]
R	40×70	—	R	40×70	—	R	50×70	—
5	"	70×70	10	"	75×75	15	"	70×70
4	45×75	75×75	9	45×75	"	14	55×75	"
3	50×75	80×80	8,7	"	80×80	13	"	75×75
2	50×80	"	6	45×80	"	12	60×80	"
F	50×130	"	5,4	50×80	"	11	"	80×80
			3,2	55×80	"	10~8	65×85	"
			F	55×150	"	7~2	65×90	"
						F	65×150	"

表-2 解析対象建物の固有周期 [sec]

建物層数	1次	2次	3次
5層	0.444	0.154	0.085
10層	0.814	0.283	0.167
15層	1.047	0.381	0.229

表-3 剛重比変動モデル名の例

モデル名	変動Unit	変動型
5uu	Unit5	uu型
3du	Unit3	du型
1dd	Unit1	dd型

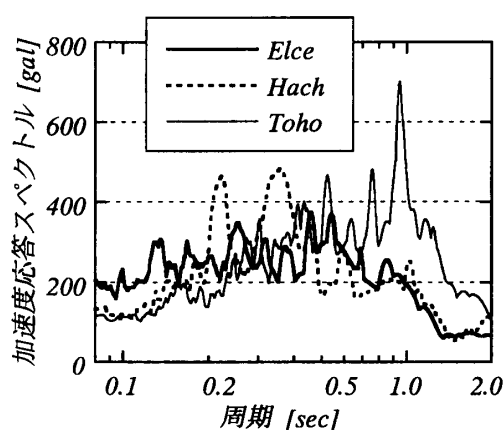


図-2 入力地震波の加速度応答スペクトル

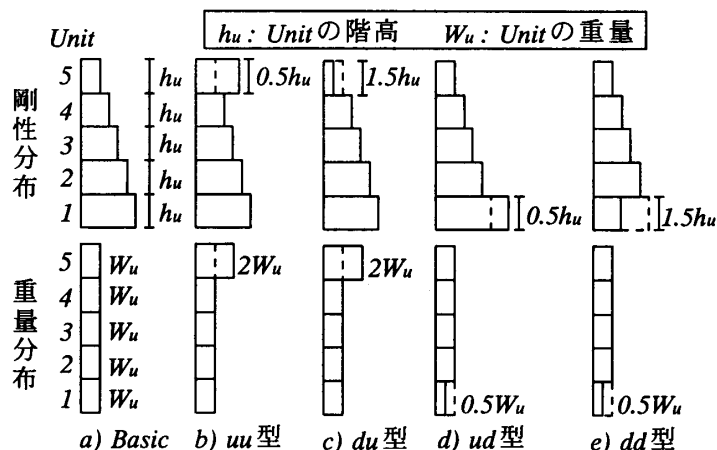


図-3 剛重比変動モデルの剛性および重量分布

は、設計 A_i 分布に基づく静的増分解析により、ベースシア係数が、それぞれ 0.37, 0.30, 0.26 のときに全体崩壊となる建物である。その中央1スパン分を梁の反曲点から取り出し、各層質量は 39.6[t]としている（図-1）。解析対象建物の梁、柱部材断面を表-1に、固有周期を表-2に示す。

部材の構造解析モデルは、梁、柱ともに柔域モデル⁵⁾を使用し、復元力特性は、材軸上の各点における曲げモーメント-曲率関係を D-Tri 型としている。なお、部材強度および降伏時の剛性低下率は菅野式から決定した。

入力地震波は、El Centro 1940 NS(Elce)、八戸港

湾 1968 NS(Hach)、東北大学 1978 NS(Toho)を使用した。最大加速度 100gal、減衰定数 2%の場合における、各地震波の加速度応答スペクトルを、図-2に示す。

2.2 剛重比変動モデルの設定

剛重比変動モデルにおける剛性分布、および重量分布の組み合わせを図-3に示す。なお、剛重比とは、水平外力を設計 A_i 分布と仮定した場合に得られる i 層の等価せん断剛性 k_i を、その層の重量 W_i で除したものである。

建物を上層から5つの Unit に分割して、剛性および重量の変動を考える。ここで、5層建物にお

いては任意の1層分, 10層建物においては任意の連続した2層分, 15層建物においては任意の連続した3層分をUnitとしている。各Unitにおいて, 剛性, 重量ともに増加(u型)させたuu型, 剛性を減少(d型)させ, 重量を増加(u型)させたdu型, 剛性を増加(u型)させ, 重量を減少(d型)させたud型, 剛性, 重量ともに減少(d型)させたdd型の4通りを取り上げている。5つのUnitに分割した建物ごとに20通り, 合計60通りの剛重比変動モデルを設定した。

剛性変動については, 考えられる方法の中から実状を考慮して, 任意のUnitにおける階高 h_u を0.5倍にして増加させるか, 1.5倍にして減少させた場合を取り上げる。また, 重量変動は, 任意のUnitにおける重量 W_u を2倍にして増加させるか, 0.5倍にして減少させた場合を取り上げる。剛重比変動モデル名の例を表-3に示す。

設定した各モデルにおける剛重比の高さ方向分布は, 剛性および重量ともに増加, あるいは減少したモデル(uu型, dd型)において変動が小さく,

剛性および重量の変動が, 互い違いとなったモデル(du型, ud型)において変動が大きくなるように, Unitのみを変動させている。

uu型, dd型モデルを例として, i 層までの高さ H_i を建物の軒高 H で規準化した座標(以下, 規準化座標)を用いて, 剛重比分布を図-4に示す。

3. 解析結果

3.1 固有周期と刺激関数

剛重比を変動させない5層, 10層, 15層建物(Basic)の固有周期 $_BT$ に対する, 剛重比変動モデルの固有周期 $_vT$ の変動率を, 式(1)から求める。1次から3次モードの周期変動率を図-5に示す。

$$\text{周期変動率(\%)} = \frac{(_vT - _BT)}{_BT} \times 100 \cdots \cdots (1)$$

各次モードとも変動Unitによらず, 剛重比の増加が著しいud型モデルの周期は, 20%程度減少し, 剛重比の減少が著しいdu型モデルの周期は, 30%程度増加することが分かった。しかし, 剛重比の

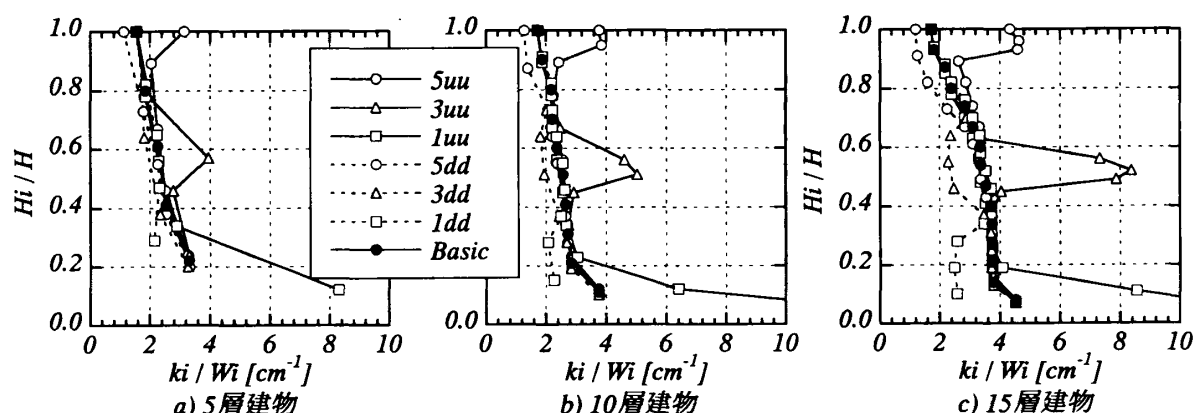


図-4 5層、10層および15層建物の剛重比分布例

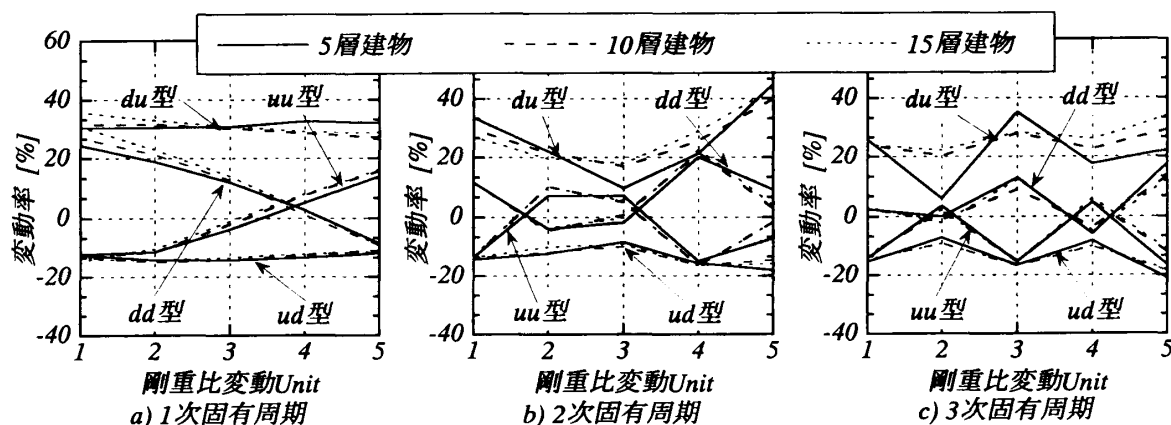


図-5 剛重比変動モデルにおける各次モードの周期変動率

変動が小さい *uu* 型および *dd* 型モデルの周期変動率は、変動 *Unit* によって傾向に違いがみられるものの、ほぼ 10% 以内の変動となっていた。これらの周期変動率に関して、建物層数による違いは、ほとんど見られなかった。

剛重比変動モデルについて層間の刺激関数を検討すると、各次モードとも、剛性を減少させた層においてのみ刺激性は増加し、剛性を増加させた層においてのみ刺激性は減少することが分かった。

また、高層な建物ほど、各次モードの刺激性は全層において減少する傾向がみられた。

規準化座標を用いた、剛重比変動モデルの層間刺激関数を、*du* 型モデルを例として図-6 に示す。

3.2 応答層間変位分布

剛重比変動モデルにおける弾性および弾塑性応答時の層間変位分布を、それぞれ 10 層建物、15 層建物を例として、図-7、図-8 に示す。各建物とも、設計 *Ai* 分布による静的増分解析を行い、耐

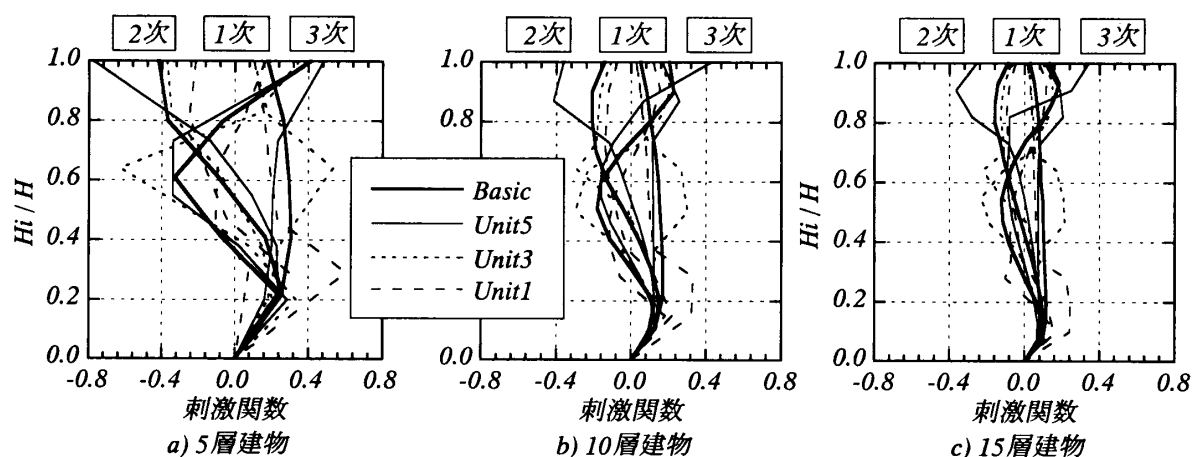


図-6 剛重比変動モデルの層間刺激関数 (*du*型)

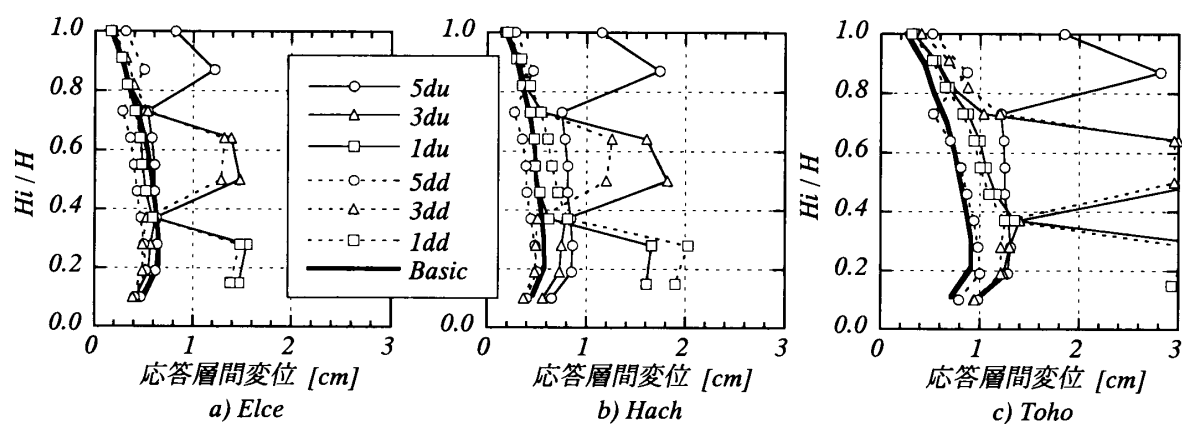


図-7 剛重比変動モデルにおける弾性応答時の層間変位分布 (10層建物)

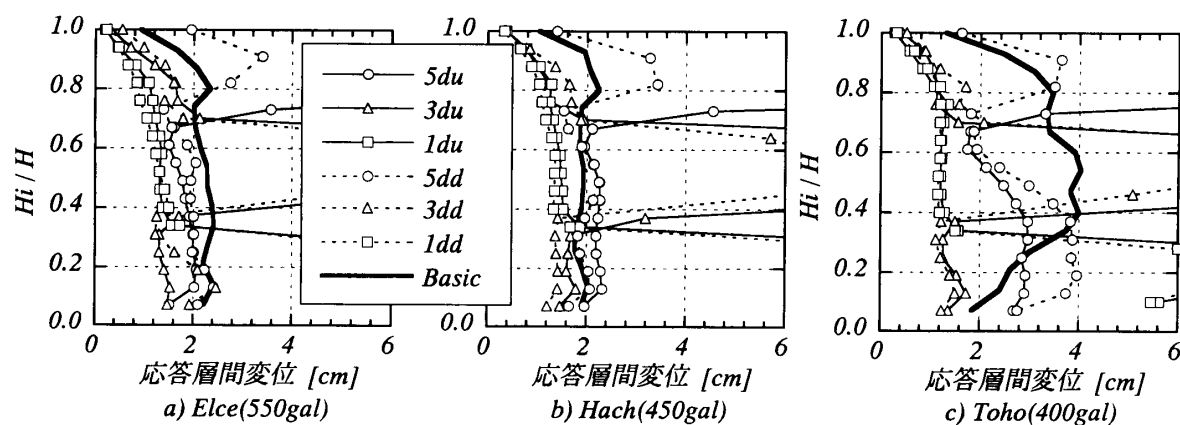


図-8 剛重比変動モデルにおける弾塑性応答時の層間変位分布 (15層建物)

力時の層間変位分布と同程度の層間変位が生じるような入力レベルを用いて、弾塑性解析を行っている。なお、階高変動にともなう強度変動は考慮していない。

剛重比変動モデルにおける弾性応答時の層間変位分布は、建物層数や入力地震波によらず、剛性を減少させた層において、*Basic* モデルより大きくなり、剛性を増加させた層においてのみ、*Basic* モデルより小さくなることが分かった。このことから、剛重比が変動するモデルにおいて、層間変位分布は、剛性分布の影響が大部分を占めることが明らかとなった。しかしながら、上層部において剛重比変動が小さいモデルは、弾性および弾塑性応答時とも、上層部の層間変位分布に変動がほとんどみられなかった。

3.3 応答水平外力分布

剛重比変動モデルにおける弾性応答時の水平外力分布は、重量を増加させた層においてのみ、*Basic* モデルより大きくなり、重量を減少させた層

においてのみ、*Basic* モデルより小さくなることが分かった。このことから、剛重比が変動するモデルにおいて、水平外力分布は、重量分布の影響が大部分を占めることが明らかとなった。しかしながら、下層部において剛重比変動の小さいモデルは、下層部の水平外力分布に変動がほとんどみられなかった。これらの傾向は、入力レベルが上がり、部材の塑性化が進んだ場合においても同様になっていた。

5 層建物を例とした、剛重比変動モデルにおける弾性応答時の水平外力分布を、規準化座標を用いて図-9 に示す。

3.4 建物層数と応答水平外力分布

3 *du* 型モデルについて、最下層の水平せん断力で規準化した応答水平外力分布（以下、規準化水平外力）と建物層数との関係を、規準化座標により図-10 に示す。なお、10 層、15 層建物については、2 倍、3 倍に増幅させた値となっている。

弾性応答時の水平外力分布は、建物層数が異なる

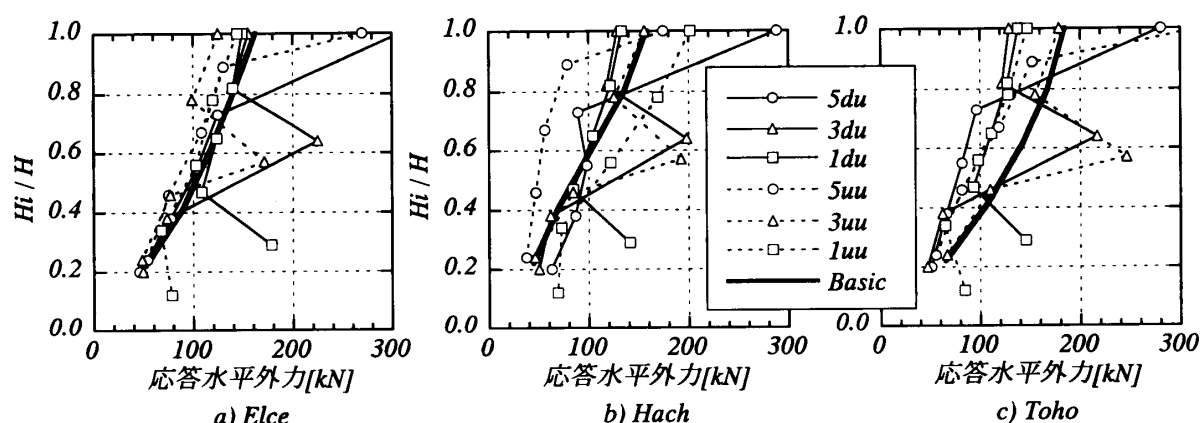


図-9 剛重比変動モデルにおける弾性応答時の水平外力分布（5層建物）

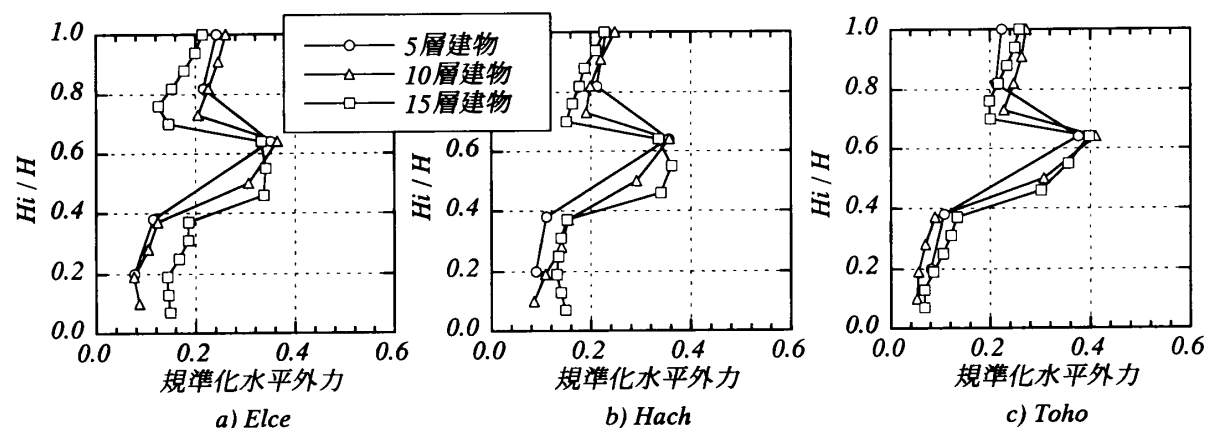


図-10 弾性応答時の規準化水平外力分布（3du）

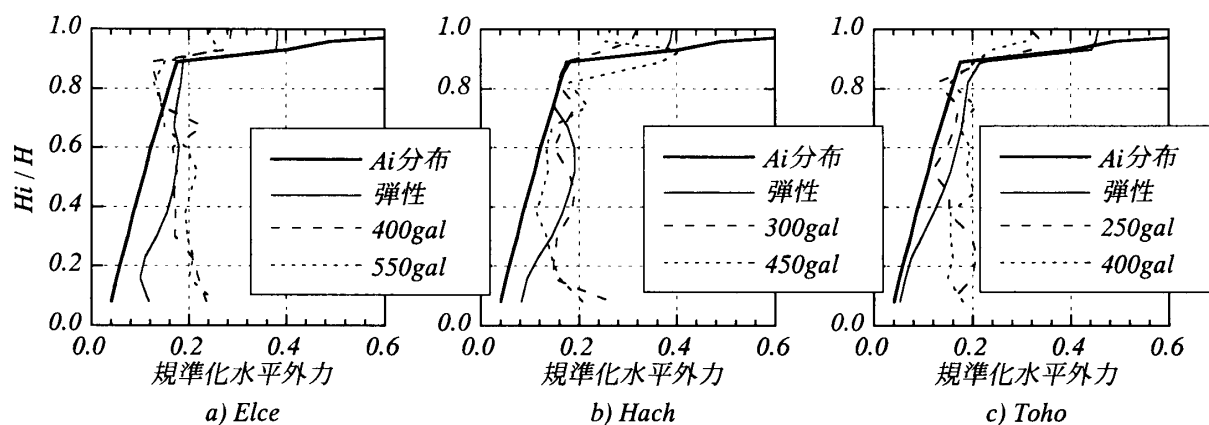


図-11 15層建物における地震応答時の標準化水平外力と設計 Ai 分布 (5uu)

っても、入力地震波および剛重比変動モデルによらず、ほぼ同一の分布形状となることが分かった。また、入力レベルが上がり、部材の塑性化が進んだ場合においては、水平外力分布が、等分布的な分布形状となるものの、建物層数による違いは現れなかった(図省略)。

3.5 応答水平外力分布と設計 Ai 分布

剛重比変動モデルにおける弾性応答時の水平外力分布は、入力地震波および剛重比変動モデルによらず、設計 Ai 分布によってほぼ表現できていた。しかし、入力レベルが上がり、部材の塑性化が進むと、水平外力の高さ方向分布は、等分布的な分布へと移行するため、上層部あるいは下層部において、設計 Ai 分布による評価に、大きな誤差が生じてしまうことが分かった。

15 層建物における 5 uu 型モデルを例として、弾性および弾塑性応答時の標準化水平外力と設計 Ai 分布との関係を、標準化座標により図-11 に示す。ここでは、3.2 および 3.3 節で取り上げた入力レベルに加えて、それより低い入力レベルについても検討している。

4. まとめ

本研究は、高さ方向の剛重比分布が、RC 造建物における地震応答時の水平外力分布に及ぼす影響を、5 層、10 層、15 層建物を取り上げて検討したものである。また、弾性および弾塑性応答時の水平外力分布を設計 Ai 分布によってどの程度評価できるかを検証し、以下の結論を得た。

- 1) 固有周期は、剛重比によって決まり、刺激関数は、大部分が剛性分布によって決まっていた。
- 2) 剛重比が変動する建物において、層間変位分布は剛性分布、水平外力分布は重量分布の影響が大部分を占めることが分かった。
- 3) 高さ方向の剛性分布が不連続な建物でも、上層部において剛重比の変動が小さい建物は、上層部の層間変位に変動が少ないことを確認した。
- 4) 剛重比が変動する建物における弾性応答時の水平外力分布は、設計 Ai 分布によってほぼ表現できていた。しかし、弾塑性応答時の水平外力分布は、等分布的な分布となるために、上層部および下層部において、設計 Ai 分布による評価に、大きな誤差が生じてしまうことを明らかにした。

本研究の一部は、平成 11 年度文部省科研費基盤研究 B(研究代表者：洪 忠憲、課題番号：10450206)によるものである。

<参考文献>

- 1) 加藤誠一，荒川利治：高さ方向の剛性分布が不連続な建物の水平せん断力分布-曲げせん断型均等フレームの地震応答性状-，日本建築学会学術講演会梗概集，B-2，pp.497-498，1999
- 2) 海津貴将，加藤誠一，荒川利治：質量の高さ方向分布に不均等性を有する建物の水平力分布-曲げせん断型均等フレームの弾塑性地震応答-，日本建築学会学術講演会梗概集，B-2，pp.499-500，1999
- 3) 松島 豊：ホワイトノイズを受ける多自由度系の最適せん断力係数分布，日本建築学会論文報告集，No.342，pp.22-28，1984
- 4) 石山祐二：種々の建物に対する地震層せん断力の分布とベースシア係数，日本建築学会構造系論文報告集，No.439，pp.65-72，1992
- 5) 荒川利治，田村 正，洪 忠憲：柔域モデルによる柱及び壁柱平面架構の耐力と変形，日本建築学会構造系論文報告集，No.420，pp.19-30，1991