表層地盤特性を考慮した中層RC造建物の地震応答水平力分布

THE HORIZONTAL FORCE DISTRIBUTIONS IN EARTHQUAKE RESPONSES ALONG THE HEIGHT OF MID-RISE REINFORCED CONCRETE BUILDINGS IN CONSIDERATION OF THE SURFACE SOIL

荒川利治 — *1 大城達彦 — *2

Toshiharu ARAKAWA — *1 Tatsuhiko OHSHIRO — *2

キーワード:

表層地盤, 増幅特性, 地震荷重, 地震応答, 水平力分布, 応答スペクトル, モーダルアナリシス

Keywords:

Surface soil, Characteristics of amplification, Earthquake load, Earthquake response, Horizontal force distribution, Response spectrum, Modal analysis

This paper presents the effect of surface soil in the horizontal force distributions in earthquake responses along the height of mid-rise reinforced concrete buildings. It is dealt with a lot of surface soil models and artificial earthquake waves to input into these models. Surface waves filtered through surface soil are calculated. Then, we input those surface waves to the reinforced concrete buildings to obtain earthquake responses. Consequently, we investigate the horizontal force distributions in the earthquake responses of the buildings and propose an evaluation method of these distributions.

1. はじめに

構造設計において, 建築物の耐震性能を評価する有効かつ簡便な解析法として, 静的増分法が挙げられる。この静的増分法の適用にあたっては, 部材の解析モデル化および地震荷重を想定して建物に作用させる水平力の高さ方向分布が重要となる。解析モデル化に関しては研究成果も多く, 精度の高い解析が可能になってきた。地震荷重の高さ方向分布¹⁾については, 新耐震設計法において, 建物の質量分布や1次固有周期を考慮したAi分布が提案されている。支持地盤の特性, あるいは地震動の入力レベルが, 地震荷重の高さ方向分布に与える影響を検討した報告は見あたらない。静的増分解析においては, 地盤特性や地震動レベルに関わらず, 同じ分布形を用いるのが一般的である。

本報告では121の表層地盤モデルを作成して, これに4段階の地震動レベルの模擬地震動を入力し, 「micro SHAKE」による地震応答計算を行って, 地表面の地震動を得る。この地表面地震動を建物へ入力した弾性時刻歴解析により, 建物の弾性応答水平力分布について, 表層地盤の卓越周期と地震動レベルを主要なパラメータとして検討する。さらに, この弾性応答水平力分布を評価する方法として, 地表面地震動の加速度応答スペクトルを定式化し, この応答スペクトルを用いて, 建物のモーダルアナリシスを行うことにより, 応答水平力分布を算出する方法を提案し, 評価精度を検討する。

また, 建物に入力する地震動レベルが大きくなると, 構造部材が塑性化し, 応答水平力分布にも影響を及ぼすと考えられる。そこで, 建物の1次モード, 2次モード, あるいは3次モードが支配的な振動形状となる場合において, 構造部材の塑性化が, 建物の地震応答

水平力分布に及ぼす影響についても検討する。

2. 解析仮定

2.1 表層地盤モデルへの入力地震動

表層地盤モデルに入力する地震動は, 国土交通省告示第1461号で定めている加速度応答スペクトルを目標とした模擬地震動である。地震動レベルは「稀に発生する地震動」の加速度応答スペクトルを0.5倍(レベルⅠ), 1.0倍(レベルⅡ), 3.0倍(レベルⅢ), 5.0倍(レベルⅣ)したレベルの4段階とした(レベルⅣは「極めて稀に発生する地震動」)。模擬地震動は有効帯域を0.2~50.0[Hz], 位相を一様乱数として, 各地震動レベルで10波ずつ作成した(W01~W10)。作成した模擬地震動の加速度応答スペクトルを図1に示す。

図1 模擬地震動の加速度応答スペクトル
(レベルⅠ~Ⅳ, $h=0.05$)

*1 明治大学理工学部建築学科 教授・工博
(〒214-8571 川崎市多摩区東三田1-1-1)

*2 東畑建築事務所 工修
(元 明治大学理工学研究科 大学院生)

*1 Prof., Department of Architecture, School of Science and Technology, Meiji University, Dr. Eng.

*2 Engineer, Tohata Architects & Engineers, M. Eng.
(Former Graduate Student, Graduate School of Science and Technology, Meiji University)

2.2 表層地盤モデル

表層地盤モデルは、K-NET、道路橋示方書、建築学会学術講演梗概集および建築学会構造系論文集の論文、明治大学敷地内、JRF 荒川沖マンション敷地内を選定し、地層構造、層厚、せん断波速度などの異なる各地層データに基づいて121作成した。各地層の土質は、粘性土と砂質土の2種類とし、それぞれ異なるひずみ依存性²⁾を与えた(図2)。本報告では、作成した表層地盤モデルの弾性周期 T_E が短いものから G001~G121 と呼称する(表1)。

2.3 建物モデル

解析対象とした建物モデルは、図3に示す各層重量が388[kN]の10層RC造均等フレームで、その中央1スパン分を梁の反曲点から取り出したものとした。終局強度設計を行っており、外力を設計 A_i 分布とした静的増分解析により、ベースシア係数0.30のときに全体崩壊型となる建物である。解析対象建物の刺激関数と固有周期をそれぞれ図4、表2に示す。時刻歴解析を行う際のモード減衰定数は、1次モードを2.0[%]とし、高次モードについては、剛性比例型と仮定した。また、弾塑性解析における梁、柱部材の復元力特性はD-Tri型としている。

図2 表層地盤モデルの土質とひずみ依存性(剛性・減衰)

表1 表層地盤モデルの弾性周期 T_E [sec]

地盤	T_E	地盤	T_E	地盤	T_E	地盤	T_E
G001	0.048	G032	0.198	G063	0.444	G094	0.941
G002	0.049	G033	0.208	G064	0.485	G095	0.941
G003	0.074	G034	0.211	G065	0.516	G096	1.000
G004	0.075	G035	0.213	G066	0.533	G097	1.000
G005	0.077	G036	0.216	G067	0.571	G098	1.000
G006	0.080	G037	0.216	G068	0.593	G099	1.000
G007	0.093	G038	0.225	G069	0.593	G100	1.067
G008	0.099	G039	0.225	G070	0.640	G101	1.067
G009	0.100	G040	0.232	G071	0.640	G102	1.067
G010	0.100	G041	0.232	G072	0.640	G103	1.067
G011	0.105	G042	0.232	G073	0.640	G104	1.067
G012	0.112	G043	0.242	G074	0.640	G105	1.067
G013	0.119	G044	0.242	G075	0.667	G106	1.143
G014	0.127	G045	0.250	G076	0.667	G107	1.143
G015	0.131	G046	0.254	G077	0.696	G108	1.143
G016	0.140	G047	0.258	G078	0.696	G109	1.143
G017	0.145	G048	0.262	G079	0.696	G110	1.143
G018	0.145	G049	0.271	G080	0.696	G111	1.231
G019	0.150	G050	0.327	G081	0.696	G112	1.231
G020	0.151	G051	0.340	G082	0.727	G113	1.231
G021	0.151	G052	0.348	G083	0.727	G114	1.231
G022	0.154	G053	0.364	G084	0.762	G115	1.455
G023	0.165	G054	0.364	G085	0.762	G116	1.455
G024	0.170	G055	0.381	G086	0.762	G117	1.455
G025	0.172	G056	0.381	G087	0.800	G118	1.455
G026	0.176	G057	0.400	G088	0.800	G119	1.455
G027	0.180	G058	0.400	G089	0.800	G120	1.600
G028	0.182	G059	0.410	G090	0.889	G121	1.600
G029	0.184	G060	0.421	G091	0.889		
G030	0.184	G061	0.421	G092	0.941		
G031	0.190	G062	0.444	G093	0.941		

3. 建物の地震応答水平力分布

3.1 弾性応答水平力分布の性状

図5に地表面地震動の作成概念を示す。作成した121の表層地盤モデルに、4段階のレベルの模擬地震動を入力して、「micro SHAKE」による等価線形応答計算から地表面地震動を作成した。この地表面地震動を入力として、建物の弾性時刻歴応答解析を行い、建物の弾性応答水平力分布の性状について検討した。応答水平力分布の検討は、各層の応答水平力を最下層の最大水平せん断力で規準化した規準化水平力を用いた。

一例として、レベルⅠ~Ⅳ地震動がG013, G030, G057地盤を通過した地表面地震動が入力した場合の建物の弾性応答水平力分布を図6に示す。レベルⅠのc) G057モデルのように、卓越周期が長い表層地盤モデルに支持される建物の弾性応答水平力分布は、建物頂部ほど応答水平力が大きい逆三角形分布となり、設計 A_i 分布と同様な分布形となった。支持地盤が硬い、a) G013, b) G030 の場合には、鋸の刃状やS字状の分布形となり、 A_i 分布とは異なった。これは、レベルⅠ地震動がG013, G030地盤を通過した地表面地震動の卓越周期が、建物の3次固有周期、2次固有周期付近となり、建物の応答水平力分布に高次モードの影響が現われたためと考えられる。また、同一の支持地盤であれば、地震動レベルが大きい場合ほど、建物の弾性応答水平力分布は1次モードが顕著に現われる逆三角形分布となりやすいことがわかった。地震動レベルが大きくなると、表層地盤の塑性化が進行し、地表面地震動の卓越周期が長周期化するため、建物の弾性応答水平力分布には高次モードの影響が現われず、1次モードが支配的となったことが原因と考えられる。

図3 建物モデル

図4 建物モデルの刺激関数

表2 建物モデルの固有周期

モード	1次	2次	3次
固有周期 [sec]	0.814	0.283	0.167

図5 地表面地震動の作成概念

図6 表層地盤の卓越周期および地震動レベルと弾性応答水平力分布

3.2 弾性応答水平力分布の評価

建物各層の応答水平力分布を評価する方法として、本報告では地表面地震動の加速度応答スペクトルを定式化し、この応答スペクトルを用いた建物のモーダルアナリシスにより、弾性応答水平力分布 $\{P_{\max}\}$ を算出する方法を提案する(式1)。

$$\{P_{\max}\} = [M] \cdot \sqrt{\sum_{s=1}^j (s\beta \cdot \{su\} \cdot S_{as}(T_s, h_s))^2} \quad (1)$$

ここで、 $[M]$ ：質量マトリクス、 $s\beta$ ：刺激係数、 $\{su\}$ ：モードベクトル、 $S_{as}(T_s, h_s)$ ：地表面地震動の加速度応答スペクトル、 T_s ：建物の固有周期、 h_s ：建物のモード減衰定数である。なお、添え字の s はモード次数を表している。 h_s は時刻歴解析の場合と同様に、1次モ

図7 地表面地震動の加速度応答スペクトル(W05, h=0.06)

図8 表層地盤の弾性周期と塑性周期

ードが 2.0[%]の剛性比例型とし、近似的に 2 次モードを 6.0[%], 3 次モードを 10.0[%]とした。また、重ね合わせのモード次数 j については、高次モードの刺激性が低いことと、減衰定数を剛性比例型と仮定したことを考慮して 3 次までとした³⁾。

次に、地表面地震動の加速度応答スペクトルの定式化について検討する。地表面地震動の加速度応答スペクトルの例を図7に示す。同図には、応答ひずみによる剛性低下を考慮した表層地盤モデルの伝達関数を併記した。これらの例のように、地表面地震動の加速度応答スペクトルはある周期において卓越する性質を有しており、どの表層地盤モデルや地震動レベルにおいても、その卓越周期は表層地盤の伝達関数の卓越周期とほぼ一致した。この卓越周期を表層地盤の塑性周期とすると、図8に示すように、表層地盤の塑性周期 T_p

は弾性周期 T_E に対して線形的な関係を示し、地震動レベルが大きい場合ほど表層地盤の塑性周期 T_P は長くなる傾向を示した(式2)。

$$T_P(T_E, L) = (0.32L + 1.30)T_E \quad (2)$$

ここで、 L ：地震動レベルで、レベルⅠ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳの場合を、それぞれ $L=0.5, 1.0, 3.0, 5.0$ とした。

また、表層地盤の減衰定数 h_g は、表層地盤の伝達関数に $1/\sqrt{2}$ 法を適用して求めた。地震動レベル L と表層地盤の塑性周期 T_P との有意な関係性を考慮して、式3のように h_g を回帰した。

$$h_g = \begin{cases} (1.1L + 7.5) \frac{T_P}{T_h} + 1.7L - 0.033 & (T_P < T_h) \\ (-0.20L + 0.10) \frac{T_P}{T_h} + 3.0L + 7.4 & (T_P \geq T_h) \end{cases} \times \frac{1}{100} \quad (3)$$

ただし、 $T_h = 0.018L + 0.35$

さて、提案する地表面地震動の加速度応答スペクトル $S_{as}(T, h)$ は、工学的基盤の加速度応答スペクトル $S_{ab}(T, h)$ に表層地盤の増幅率 $g_s(T)$ を乗じて算出することとした(式4)。

$$S_{as}(T, h) = S_{ab}(T, h) \times g_s(T) \quad (4)$$

工学的基盤の加速度応答スペクトルは告示波スペクトルを採用した。この告示波スペクトルに減衰定数 h を考慮した応答スペクトル $S_{ab}(T, h)$ は、三浦ら⁴⁾により提案された方法によって求めた。解析結果より、表層地盤の増幅率 $g_s(T)$ は表層地盤の減衰定数 h_g には依存しないことから、 $g_s(T)$ は減衰定数 h を考慮していない。また、 $g_s(T)$ は、表層地盤の塑性周期 T_P で卓越する1質点系の伝達関数を模した第1項と、周期 $T=0.0$ [sec]において地表面地震動の加速度応答スペクトルが地表面地震動の最大加速度となるように短周期領域を補正する第2項との和で表す評価式5を提案した。

$$g_s(T) = \frac{1 + 4B^2 (T_P/T)^2}{\sqrt{\{1 - (T_P/T)^2\}^2 + 4B^2 (T_P/T)^2}} + A \left(1 - \frac{T}{T_P}\right) \quad (5)$$

式5第1項の B は $g_s(T)$ のピーク値や増幅帯域に関する係数である。表層地盤の塑性周期 T_P が長い場合ほど、また、地震動レベル L が大きい場合ほど B は大きくなり、 $g_s(T)$ は広帯域で増幅する傾向を示した。これらを考慮して、式6のように B を回帰した。

$$B = \begin{cases} (0.017L + 0.063) \frac{T_E}{T_B} + 0.012L + 0.033 & (T_E < T_B) \\ -0.004 \frac{T_E}{T_B} + 0.029L + 0.10 & (T_E \geq T_B) \end{cases} \quad (6)$$

ただし、 $T_B = 0.063/L + 0.16$

式5第2項の A は $g_s(T)$ の短周期領域を補正する係数である。地表面地震動の最大加速度は、工学的基盤の加速度応答スペクトルや表層地盤の減衰定数 h_g によって定まり、式7のように A を回帰した。

$$A = \overline{S_{ab}}(T_P, 0.05) \left\{ \begin{aligned} & (0.022L + 0.25) \frac{h_g}{0.05} - 0.066L + 1.5 \end{aligned} \right\} \quad (T < T_P) \\ = 0 \quad (T \geq T_P) \quad (7)$$

$\overline{S_{ab}}(T_P, 0.05)$ は、減衰定数 $h=0.05$ の告示波スペクトルを規準化したもので、式8で表した。

$$\overline{S_{ab}}(T_P, 0.05) = \begin{cases} 1 + 9.375T_P & (T_P < 0.16) \\ 2.5 & (0.16 \leq T_P < 0.64) \\ 1.6/T_P & (0.64 \leq T_P) \end{cases} \quad (8)$$

なお、係数 A および B の回帰精度の検討については、紙面の都合

上、ここでは省略する。

以上の方法により算出した地表面地震動の加速度応答スペクトルの評価式 S_{as} を、G030, G057, G069 地盤を例に、減衰定数 $h=0.06$ の応答スペクトルで図9に示す。図中の解析値は、各表層地盤モデルの「micro SHAKE」による等価線形応答計算から求めた地表面地震動の加速度応答スペクトルである。評価式 S_{as} は解析値を精度良く評価できている。他の表層地盤モデルについても、各地震動レベルにおいて評価式 S_{as} の精度は高い。ただし、応答スペクトルが長周期で卓越する表層地盤モデルにおいて多少の誤差が生じている。

式1に地表面地震動の加速度応答スペクトルの評価式 S_{as} を代入して、弾性応答水平力分布を算出する提案手法により求めた応答水平力分布を図10に示す。図10は、G013, G030, G057 地盤の場合であり、時刻歴解析により求めた弾性応答水平力分布を併記した。1

図9 地表面地震動の加速度応答スペクトルの評価式($h=0.06$)

図10 提案する弾性応答水平力分布の評価手法

次モードが支配的となる場合、提案手法により評価した建物の応答水平力分布は、時刻歴解析の分布を、特に精度良く評価できていた。また、高次モードが顕著に現われる場合においても、多少の誤差はあるが概略的に良く評価できている。なお、図10に示す表層地盤モデル以外においても、提案手法は時刻歴解析の結果と良い対応を示していた。また、10層建物モデルに加えて5層、15層の建物モデルについても、本提案手法による応答水平力分布の評価精度が高いことを確認しているが、その詳細は別報にて報告する予定である。

3.3 弾塑性応答を考慮した水平力分布の性状

弾塑性時刻歴解析を行い、建物の弾塑性応答水平力分布について検討する。弾塑性解析に用いた建物への入力地震動は、弾性解析により、建物の1次モード、2次モード、3次モードが支配的な振動形

表3 各応答レベルにおける入力地震動の標準化加速度[gal]

建物の応答レベル		降伏開始レベル			崩壊機構形成レベル		
モード		1次	2次	3次	1次	2次	3次
地震動	W01	80	200	300	300	300	500
	W02	80	150	300	100	300	400
	W03	80	150	300	100	300	400
	W04	80	200	300	200	300	400
	W05	80	200	300	100	300	400
	W06	80	200	300	100	200	500
	W07	80	200	300	200	300	400
	W08	50	150	300	80	300	400
	W09	80	200	300	200	400	400
	W10	80	200	300	200	300	400

図11 支配的な振動モードと弾塑性応答水平力分布との関係

状となることが確認された G064, G032, G013 の表層地盤モデルをレベルⅡ地震動が通過した地表面地震動である。この地表面地震動の最大加速度を 10, 30, 50, 80, 100, 150, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800[gal]に規準化して、建物へ入力した。

弾塑性応答水平力分布の検討は、梁に降伏ヒンジが現われる地震動レベル(降伏開始レベル)と、建物が崩壊機構を形成する地震動レベル(崩壊機構形成レベル)の、2段階の建物の応答レベルで行う。降伏開始レベルと崩壊機構形成レベルにおける、入力地震動の規準化加速度を表3に、建物の弾塑性応答水平力分布を図11に示す。地震動によるばらつきは大きい、どの振動モードが支配的となる地表面地震動が入力した場合でも、降伏開始レベルと崩壊機構形成レベルにおける建物の弾塑性応答水平力分布は、ほぼ同様な分布形状となった。弾性解析で1次モード、3次モードが支配的となった表層地盤の場合、建物の弾塑性応答水平力分布は、弾性応答水平力分布よりも建物下層部の水平力の割合が大きくなり、1次モードでは、建物の高さ方向に一樣に地震荷重が作用する一様分布、3次モードでは、建物下層部ほど地震荷重が大きい三角形分布となった。建物において、1次モード、および3次モードが支配的となる表層地盤を通過した地表面地震動が入力した場合の弾塑性応答水平力分布は、弾性応答水平力分布に建物下層部の地震荷重の割合を大きくすることで、評価することが可能であると考えられる。

2次モードが支配的な場合、弾塑性応答水平力分布は、建物中層部の地震荷重が大きい弓形の分布形状となる傾向を示した。建物の2次モードが支配的となる場合、降伏ヒンジが発生する層と弾塑性応答水平力分布との関係を図12に示す。2次モードが支配的となる建物では、モードの節となる7層付近で降伏ヒンジが発生する傾向があり、降伏ヒンジが発生した層の応答水平力は小さく、その下層部で大きくなるために、弾塑性応答水平力分布は弓形の分布形状になったと考えられる。

地震動レベルが大きい場合、建物の弾塑性応答水平力分布の評価にあたっては、3.2節で提案した弾性応答水平力分布を評価する方法に、建物の支配的な振動モードごとに異なる構造部材の塑性化の影響を考慮することで応答水平力分布を評価できることがわかった。

4. まとめ

表層地盤の卓越周期と地震動レベルをパラメータとして、一般的な柱、梁フレーム構造の中層 RC 造建物における弾性および弾塑性応答水平力分布の検討を行った。得られた成果を以下に示す。

- 1) 建物の弾性応答水平力分布には、建物を支持する表層地盤が硬い場合、また、地震動レベルが小さい場合に、高次モードの影響が顕著に現われ、S字状や鋸の刃状の分布形状となった。
- 2) 表層地盤を通過した地表面地震動の加速度応答スペクトルを、表層地盤の卓越周期と地震動レベルをパラメータとして定式化した。この応答スペクトルを用いたモーダルアナリシスにより求めた建物の地震応答水平力分布は、表層地盤特性を考慮した弾性応答水平力分布を精度良く評価できていることを示した。
- 3) 弾塑性応答水平力分布は弾性応答水平力分布とは若干異なり、建物の支配的な振動モードごとに異なる構造部材の塑性化の

図12 建物の2次モードが支配的な場合の弾塑性応答水平力分布と降伏ヒンジが発生する層との関係

影響を考慮することで応答水平力分布を評価できることがわかった。1次モード、および3次モードが支配的な場合には、弾性応答水平力分布より建物下層部の地震荷重の割合が大きく、上層部が小さくなった。また、2次モードが支配的な場合には、建物中層部の地震荷重が大きい弓形の分布形状となった。

本報告は、文献5), 6)の内容を加筆、再構成したものである。

謝辞

本研究は、文部科学省学術フロンティア推進事業の重点研究(明治大学理工学研究科)による。論文作成にあたり、お世話になった、地震工学研究所の内田治氏、オリエンタル建設の加藤誠一氏、清水建設の井上洋介氏に謝意を表します。なお、データ処理は、宮城大輔君、金田健太郎君と共同で行ったものである。

参考文献

- 1) 日本建築学会：地震荷重(その現状と将来の展望)，丸善，pp.211-226，1992
- 2) 日本建築学会：入門・建物と地盤との動的相互作用，丸善，pp.236-252，1996
- 3) 加藤誠一，荒川利治：応答スペクトル法に基づく中層および中低層建物の地震時水平力分布，日本建築学会学術講演梗概集，B-2，pp.503-504，2001
- 4) 三浦賢治，古山田耕司，飯場正紀：応答スペクトル法による表層地盤の非線形増幅特性の解析法，日本建築学会構造系論文集，第539号，pp.57-62，2001
- 5) 大城達彦，井上洋介，荒川利治：表層地盤特性を考慮した中低層建物における地震応答水平力の高さ方向分布(その1.建物への入力地震動特性に及ぼす表層地盤の影響)，(その2.建物における応答水平力分布の評価)，日本建築学会学術講演梗概集，B-2，pp.993-996，2004
- 6) 大城達彦，荒川利治：表層地盤特性を考慮したRC造建物の地震応答水平力分布，日本建築学会関東支部研究報告集Ⅰ，pp.189-192，2005

[2005年4月11日原稿受理 2005年7月22日採用決定]