

柱軸力計算用積載荷重の確率モデルと層数低減係数

A STOCHASTIC LIVE LOAD MODEL FOR COLUMN DESIGN AND LOAD REDUCTION FACTOR FOR MULTIPLE STORY COLUMNS

井戸田秀樹*, 小野 徹 郎**
Hideki IDOTA and Tetsuro ONO

The variation of axial compression of a column caused by live load gets smaller than the variation of a column which supports only one floor as a number of floors supported increases. Therefore, the design live load for multiple story column can be reduced in proportion to the number of floor supported by the column.

The purpose of this paper is to present a live load reduction factor for multiple story column. A stochastic live load model for multiple story column is presented using the live load survey results for office buildings. The design live load for multiple story column is discussed based on the stochastic live load model.

Keywords : Live load, stochastic model, column design, load reduction factor, multiple story column, office building

積載荷重 確率モデル 柱設計 層数低減係数 複数層支持柱 事務所建築

1. 序

積載荷重により生ずる柱軸方向圧縮力の算定においては、その柱が支える床の数に応じて積載荷重を低減することができる⁵⁾。この荷重低減は、複数階における積載荷重の同一柱位置への集中、あるいは複数階における過載荷重の同時発生が非常に希であることを考慮したものと考えられる。建築物の構造設計法が許容応力度設計法から限界状態設計法へと移行していく中、今日の新しいデータを用いて確率論的な立場に立った設計荷重の全般的な見直しが進められており、支える床数による柱軸力計算用積載荷重の低減に関しても国内の統計データに基づき、その考え方を統計論的解釈のもとに系統的に整理する必要がある。

本論文は柱軸力計算用積載荷重の確率モデルを提示し、それに基づいて支える床数による柱軸力計算用積載荷重の低減係数、すなわち層数低減係数の提示を行ったものである。Corotis に示されている積載荷重による柱軸力計算用の解析モデル⁶⁾を用いて、建物の床平面を有限個のユニットに分割することにより、積載荷重の平面的なばらつきおよび相関性の両方を考慮した柱の等価等分布

荷重を求め、複数層を支える柱の積載荷重による軸力の統計的な評価を行っている。また、事務所建築の積載荷重実測調査を複数層に渡って行い、事務所用途建築物における確率モデルのパラメータ決定、モデルの妥当性の検証を行っている。

なお、本稿では通常の使用状況に基づく常時積載荷重のみを考察の対象としている。積載荷重は物品の入れ替えや引越等に伴って一時的な偏在状態を生ずることもあり、こうした積載荷重の時間的な変動も考慮した検討も別の観点から行われるべきであるが、これに関しては稿を改めて報告する。

2. 事務所建築の積載荷重調査結果

柱軸力計算用積載荷重の荷重モデル決定のため、事務所建築物を対象に複数層について積載荷重の実測調査を行い、基本データの収集を行った。調査対象としたのは Table 1 に示す 3 つの建物であり、いずれも事務用途である。建物 A については積載荷重の実測調査を行い¹⁾²⁾³⁾、原則として各物品の重量を計測したが、測定困難なものについてはカタログデータ等を参考にした。建物 B, C につ

本論文の一部は、参考文献 1)~4) で発表している。

* 愛知産業大学 助教授・工博

** 名古屋工業大学 教授・工博

Assoc. Prof., Aichi Sangyo University, Dr. Eng.
Prof., Nagoya Institute of Technology, Dr. Eng.

いては、事務所内の家具・物品のレイアウト図および各物品の重量に関するカタログデータを参考に基本データを作成した⁴⁾。尚、今回の調査では人間荷重も含めた調査を行っている。人間荷重は通常人が事務を行っていると思われる椅子のみに 60 kgf を集中載荷した。ただし、会議室、教室等は定員分だけを載荷している。調査した総床面積は 9,667m²であり、いずれの事務所も 0.1~0.2人/m²の密度で使用されている。

2-1 ユニットごとの積載荷重データ

Table 2 は床面を 1m×1m から 10m×10m までの正方形のユニットに区切ったときの各ユニット内の積載荷重の統計値を示したものである。面積が大きくなるほどばらつきは小さくなり、10m×10m のユニットでは変動係数にして約 30% のばらつきとなった。また、確率分布形の歪度、および尖度を表わす 3 次、4 次積率（正規分布の場合それぞれ 0 および 3 となる）も Table 2 に併記した。いずれもユニット面積が増加するに従って 0 と 3 に近づいており、中央極限定理によって確率分布形が正規分布に漸近していることが分かる。Fig. 1 は正規分布、対数正規分布、ガンマ分布、極値 I 型分布の 4 分布形についてユニット解析値の Kolmogorov-Smirnov test (K-S 検定) 結果を示したものである。K-S 検定値が小さいほどその分布形との適合度が高いことを表わす。ユニットサイズが 5m×5m 以下の時はガンマ分布が良い適合度を示しているが、それ以上のユニットでは正規分布が良い適合を示し、Table 2 で示した 3 次、4 次積率の変化と良く対応した。

Table 1 Surveyed buildings

	Building A	Building B	Building C
Use	Office	Office	Office
Number of Story	15	12	10
Surveyed Floors	11(5th-15th)	4(1st-4th)	3(3rd-5th)
Surveyed Area (Office)	Each Floor Total	Each Floor Total	Each Floor Total
	645.4m ² 7,100m ²	276.5 m ² 1,106 m ²	487.1 m ² 1,461 m ²
Total Floor Area Surveyed	9,667 m ²		

Table 2 Statistical data of unit loads

Unit Size (m)	Unit Area (m ²)	Points	Mean Value (kgf/m ²)	Standard Deviation (kgf/m ²)	COV	3rd Moment	4th Moment
1	1	8277	67.8	109.0	1.608	2.23	11.03
2	4	1887	71.7	61.6	0.859	1.36	6.67
3	9	818	72.1	46.9	0.649	1.21	7.16
4	16	441	72.7	36.8	0.507	0.83	4.23
5	25	254	73.3	34.6	0.472	0.90	4.94
6	36	186	71.6	28.4	0.396	0.34	4.81
7	49	95	71.4	28.7	0.401	0.58	4.47
8	64	72	71.7	24.6	0.342	-0.04	2.37
9	81	61	71.7	22.0	0.307	-0.18	2.51
10	100	57	71.2	20.7	0.291	-0.21	2.44

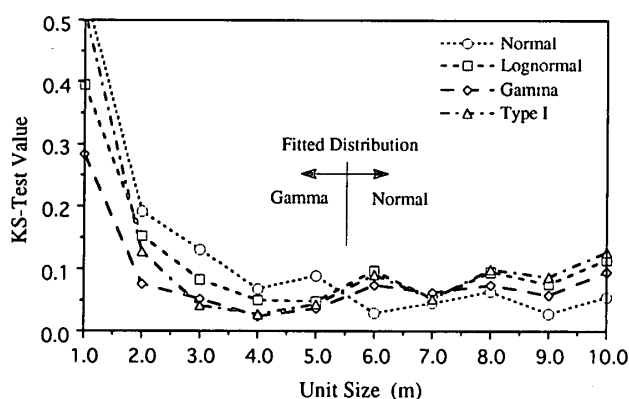


Fig. 1 K-S test results

Table 3 Statistical results of column load based on surveyed data

Surveyed Buildings	Floor	The Number of Floors Supported <i>n</i>	The Number of Columns	Single Story Columns					Multiple Story Columns				
				Mean (kgf/m ²)	S.D. (kgf/m ²)	COV	3rd Moment	4th Moment	Mean (kgf/m ²)	S.D. (kgf/m ²)	COV	3rd Moment	4th Moment
				μ_{L1}	σ_{L1}	δ_{L1}	α_{3L1}	α_{4L1}	μ_{Ln}	σ_{Ln}	δ_{Ln}	α_{3Ln}	α_{4Ln}
Building A	15F	1	18	50.67	17.18	0.339	-0.105	2.741	50.67	17.18	0.339	-0.105	2.741
	14F	2	18	75.90	22.42	0.295	-0.636	4.632	63.28	15.23	0.241	-1.504	7.057
	13F	3	18	51.94	25.64	0.494	0.175	1.684	59.50	14.66	0.246	-0.786	5.057
	12F	4	18	52.21	21.06	0.403	-0.493	2.703	57.68	15.22	0.264	-0.613	3.951
	11F	5	18	36.61	9.42	0.257	0.365	1.882	53.47	13.26	0.248	-0.370	3.483
	10F	6	18	68.59	20.26	0.295	-0.464	2.759	55.99	12.98	0.232	-0.575	3.801
	9F	7	18	65.93	25.25	0.383	0.273	3.635	57.41	13.19	0.230	-0.859	4.604
	8F	8	18	91.44	31.23	0.342	0.043	1.419	61.66	10.31	0.167	-0.540	3.880
	7F	9	18	82.84	16.30	0.197	0.524	4.121	64.02	8.84	0.138	-0.628	4.162
	6F	10	18	69.13	21.01	0.304	-0.087	3.965	64.53	9.08	0.141	-0.547	3.441
	5F	11	18	31.90	9.16	0.287	0.201	3.329	61.56	8.64	0.140	-0.379	2.988
All			198	61.56	27.87	0.453	0.395	2.793	-	-	-	-	-
Building B	5F	1	8	62.62	38.79	0.620	0.636	2.416	62.62	38.79	0.620	0.636	2.416
	4F	2	8	59.62	17.99	0.302	-0.427	2.027	61.12	26.89	0.440	0.039	1.571
	3F	3	8	97.71	35.35	0.362	0.903	3.172	73.31	29.07	0.396	0.317	1.895
	2F	4	8	62.11	17.68	0.285	-0.935	2.672	70.51	25.48	0.361	0.180	1.874
All			32	70.51	34.66	0.492	0.869	4.234	-	-	-	-	-
Building C	5F	1	12	73.53	39.58	0.538	-0.569	3.031	73.53	39.58	0.538	-0.569	3.031
	4F	2	12	81.61	20.69	0.253	1.550	6.430	77.57	21.17	0.273	-0.747	3.422
	3F	3	12	73.19	18.19	0.249	0.421	2.875	76.11	14.25	0.187	0.007	2.943
	All		36	76.11	29.24	0.384	-0.371	4.420	-	-	-	-	-
All Buildings			266	64.60	29.50	0.457	0.423	3.270	-	-	-	-	-

2-2 実測データに基づく柱軸力の計算

実測で得られた各物品の座標 (x, y) と重量 P を用い、柱軸力 C_{s1} は次式で示す影響関数 $I(x_0, y_0)$ から算出した⁷⁾。

$$C_{s1} = I(x_0, y_0) P = (3x_0^2 - 2x_0^3)(3y_0^2 - 2y_0^3) P \quad \cdots \cdots (1)$$

x_0, y_0 は Fig. 2 に示すように物品の位置 (x, y) が x, y 方向の柱スパンを内分する比率で与えられる。また、物品荷重は各物品の重心位置に集中載荷させている。

Table 3 は 3 つの建物について、各階の 1 層分の積載荷重から算出した柱の等価等分布荷重 L_1 、および支える床すべての積載荷重を考慮して算出した等価等分布荷重 L_n とそれぞれの平均値 μ_{L1}, μ_{Ln} 、標準偏差 σ_{L1}, σ_{Ln} 、変動係数 δ_{L1}, δ_{Ln} 、および 3 次、4 次積率 $\alpha_{3L1}, \alpha_{3Ln}, \alpha_{4L1}, \alpha_{4Ln}$ を示したものである。 L_1, L_n は (1) 式で算出した柱軸力を各柱の負担面積で除して求めている。支える床数による変化を建物 A で考察すると、平均値については μ_{L1} が各階で $30 \sim 90 \text{ kgf/m}^2$ とばらついているのに対し、 μ_{Ln} は支える床数 n が多くなるに従って概ね 60 kgf/m^2 に収束している。また標準偏差は σ_{L1} が各階ごとにかなり差があるのに対し、 σ_{Ln} は支える床数 n が多い階ほど小さくなる傾向がみられた。3 次、4 次積率についても標準偏差と同様に $\alpha_{3L1}, \alpha_{4L1}$ が各階でかなりばらつくのに対し、 $\alpha_{3Ln}, \alpha_{4Ln}$ では n が増加するに従ってそれぞれ 0 と 3 に収束する傾向を示した。

3. 単層を支える柱の負担積載荷重の確率モデル

3-1 ユニット荷重のモデル化

通常の使用状況に基づく常時積載荷重は、積載荷重の場所的な変動を考慮し、次式のようにモデル化できる⁷⁾。

$$W(x, y) = m + U(x, y) \quad \cdots \cdots (2)$$

ここに $W(x, y)$ は場所 (x, y) に存在する微小面積内の積載荷重の大きさを表す確率変数、 m は積載荷重の平均値、そして $U(x, y)$ は積載荷重の場所的な変動を表す確率変数である。平均値を m に代表させているため、 $U(x, y)$ の平均値は 0 である。このとき、面積 $s (= a \times b)$ のユニットに作用する積載荷重 $L(s)$ は

$$L(s) = \int_0^a \int_0^b W(x, y) dx dy \quad \cdots \cdots (3)$$

で表わされる。 $L(s)$ の平均値 μ_L 、標準偏差 σ_L は次式となる。

$$\mu_L = \int_0^a \int_0^b E[W(x, y)] dx dy \quad \cdots \cdots (4)$$

$$\sigma_L = \int_0^a \int_0^a \int_0^b \int_0^b \text{cov}[W(x_0, y_0), W(x_1, y_1)] dx_0 dx_1 dy_0 dy_1 \quad \cdots (5)$$

ここに $\text{cov}[W(x_0, y_0), W(x_1, y_1)]$ は $W(x_0, y_0)$ と $W(x_1, y_1)$ の共分散である。 $\text{cov}[W(x_0, y_0), W(x_1, y_1)]$ を求めるには異なった二点における積載荷重のばらつきの相関係数が必要となる。この相関係数については、異なる二点間の距離のみの指数関数と仮定した式⁸⁾や、ホワイトノイズ過程に従い場所的な相関性は無いと仮定した式⁹⁾などが示されてい

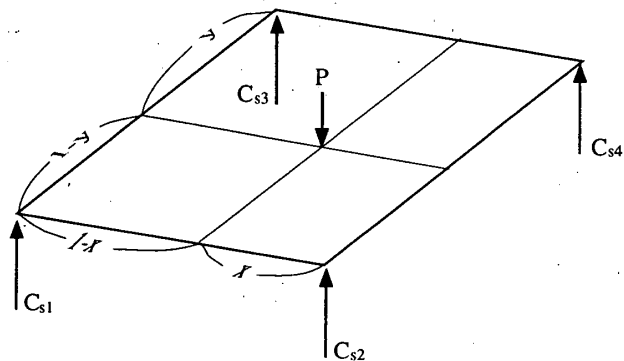
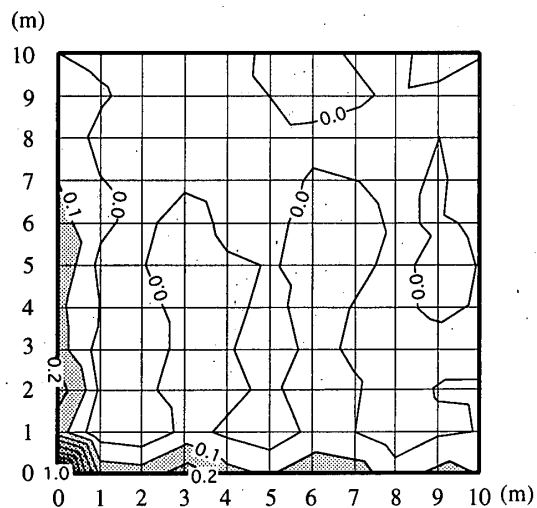
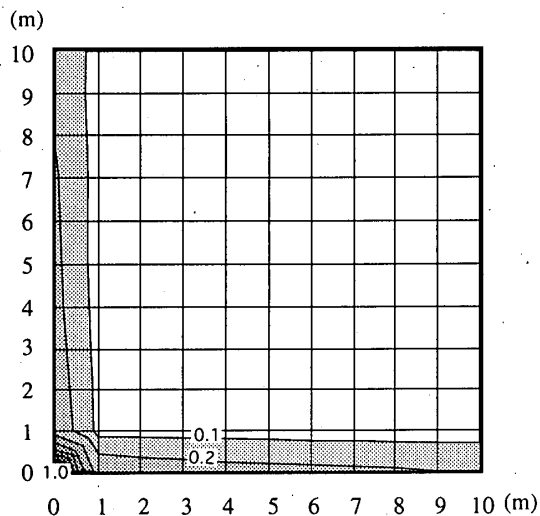


Fig. 2 Calculation of column load



(a) Surveyed



(b) Model

Fig. 3 Spatial correlation coefficients of unit load

る。しかし、積載荷重はそれが置かれる部屋の形状や家具・物品の使われ方等から考えて、床平面内の直交する 2 方向に方向性を持った相関性が存在していると考えられる。Fig. 3(a) は $1\text{m} \times 1\text{m}$ のユニットについて、あるユニットとそれから床平面内の直交する 2 方向に $x\text{m}$ および $y\text{m}$ 離れたユニットの積載荷重値の相関係数 $\rho(x, y)$ を示し

たものである。 $\rho(0,0)=1.0$ であり、 x, y が増加するに従って相関係数は急速に小さくなるが、 x, y 軸近傍では比較的大きな相関係数が観測されている。また、 x 方向に関しては事務機の配置間隔にほぼ相当する3m間隔で相関の高い点が周期的に現れている。こうした床平面内での積載荷重の相関については既に事務所建築の実測調査に基づいた結果が報告されており、本論では既報の調査報告¹⁰⁾に倣って次式で相関係数をモデル化する。

$$\rho(x, y) = \exp[-C(x^{r_1} + y^{r_2})^2] \dots \dots \dots (6)$$

ここに $C=1.20$, $r_1=0.12$, $r_2=1.04$ である。Fig. 3(b)は(6)式を x, y 平面上に示したものである。(6)式は本実測調査に基づく相関係数の結果も十分表現できているといえる。また、(5)式で示したユニット荷重の標準偏差 σ_L はTable 2で示した変動係数 δ_L の回帰分析結果(Fig. 4参照)より、次式で与える。

$$\sigma_L = m \cdot s \cdot (0.162 + 1.44 s^{-0.51}) \dots \dots \dots (7)$$

確率分布形については、ユニットサイズに応じて連続的に変化している分布形を1つに決定することがあまり現実的でないことを考慮し、Table 2で示した3次、4次積率を用いて確率分布形の非正規性を考慮する。Fig. 5はユニット荷重の3次、4次積率とユニット面積の関係、およびその回帰式を示したものである。面積が大きくなるほどどちらも正規分布の積率0および3に漸近することを考慮し、3次および4次積率 α_{3L} , α_{4L} とユニット面積 s の関係は指数関数を用いた回帰式より次式で定める。

$$\alpha_{3L} = 2.37 s^{-0.461} \dots \dots \dots (8)$$

$$\alpha_{4L} = 3.0 + 8.23 s^{-0.551} \dots \dots \dots (9)$$

3-2 柱の等価等分布荷重

(2)式で示した積載荷重値 $W(x, y)$ により、影響面積 $s_f (= a_0 \times b_0)$ を持つ柱に生ずる軸方向圧縮力 C は影響関数 $I(x_0, y_0)$ を用いて

$$C = \int_0^{a_0} \int_0^{b_0} I(x_0, y_0) W(x, y) dx dy \dots \dots \dots (10)$$

となる。よってこの柱の負担する積載荷重 L_C は C を柱の負担面積 s_T で除すことにより

$$L_C = \frac{C}{s_T} \dots \dots \dots (11)$$

で与えられる。この L_C は1層分の床を支える柱の負担積載荷重に相当し、柱の等価等分布荷重と呼ばれる。

(10)式で定義された C を用いて L_C を評価するには、床平面内で2次元的に連続な関数としてモデル化された $W(x, y)$ を用いる必要がある。しかし、積載荷重は本来離散的に存在している物品や人によって生ずるものであることから、柱軸力の算出にあたっては $W(x, y)$ をある程度の面積のユニットに離散化した確率モデルを用いるのが妥当と考えられる。そこで本論ではCorotisが示している柱軸力計算用の解析モデルを応用して評価する⁶⁾。このモ

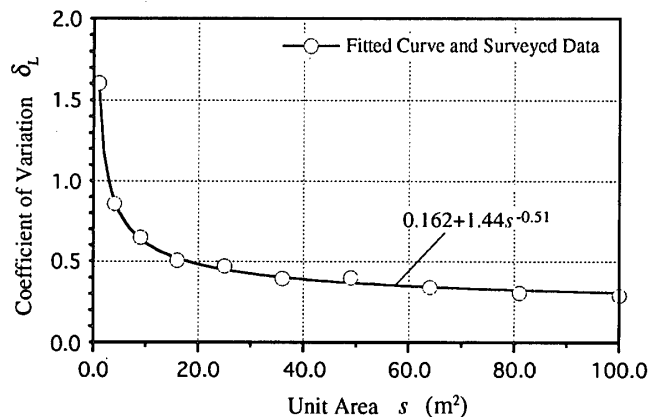


Fig. 4 Coefficient of variation and fitted curve of unit load

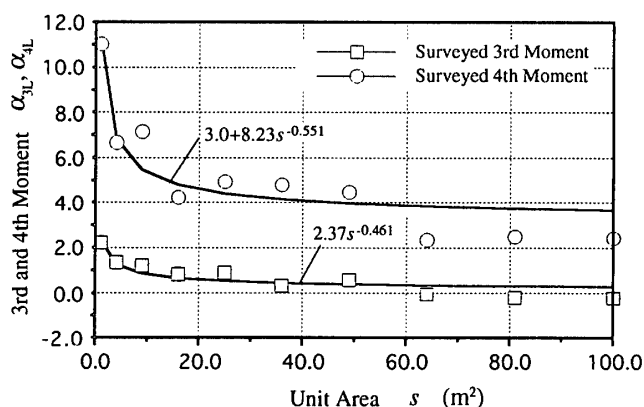


Fig. 5 3rd and 4th moments of unit load

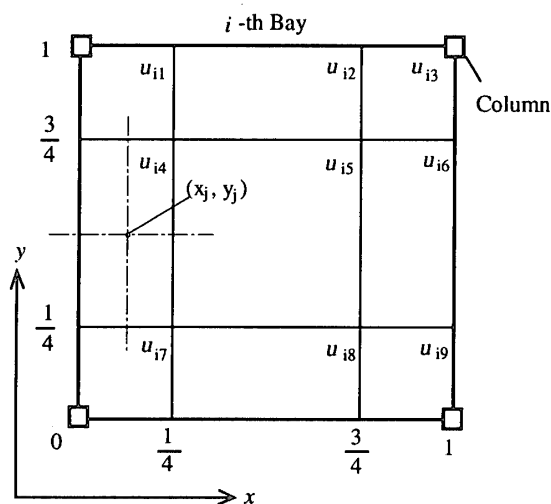


Fig. 6 Bay subdivisions by NBS model

デルは積載荷重による柱軸力算定を簡略化するために用いられるもので、Fig. 6に示すように4本の柱で囲まれた1ベイ部分を9つのユニットに分け、その各ユニット内にある物品はすべてユニットの中心位置に載荷して柱軸力を算定する。以降、本論文ではこの解析モデルをNBSモデルと呼ぶ。NBSモデルでは、 i 番目のベイの j 番目のユニット u_{ij} の中心座標、およびユニット荷重をそれぞれ (x_j, y_j) , $L(s_{ij})$ とすると、積載荷重による柱の軸方向圧縮力

C は(1)式で示した影響関数 $I(x_0, y_0)$ を用いて

$$C = \sum_{i=1}^{n_F} \sum_{j=1}^9 I_i(x_{0j}, y_{0j}) L(s_{ij}) \cdots \cdots (12)$$

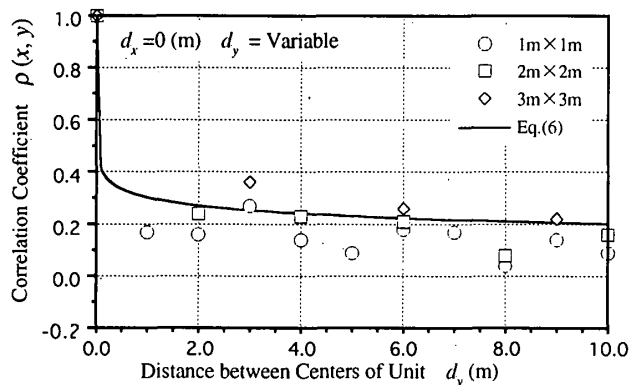
となる。ここに n_F はその柱が支えるベイの数であり、内柱では $n_F=4$ 、側柱では $n_F=2$ 、隅柱では $n_F=1$ である。 $L(s_{ij})$ の統計量は u_{ij} の面積 s_{ij} に応じて(7)~(9)式から決定される。

Fig. 7はユニットサイズが1m, 2mおよび3mの場合についてユニット中心間のY方向への距離 d_y と(6)式で定義した床平面内の荷重の相関係数 $\rho(x, y)$ を示したものである。(a)はX方向の距離 d_x が0mのとき、(b)はX方向の距離 d_x が6mのときを表わす。ユニットの面積にかかわらずユニット荷重の相関係数は各ユニットの中心座標間の x, y 方向の距離を用いた(6)式で概ね評価できていることが確認できる。このことから、ユニット u_{ij} とユニット u_{kl} の相関係数 ρ_{ijkl} は各ユニットの中心座標間の距離の x, y 成分を用いて(6)式で定義する。(12)式を用いることにより C は確率変数 $L(s_{ij})$ の和で表わされるため、影響関数を含む C の平均値 μ_C と標準偏差 σ_C は次式の様に簡便な足し合わせで求められる。

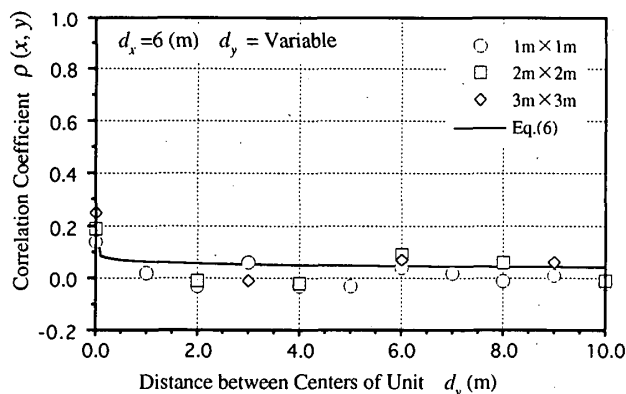
$$\mu_C = \sum_{i=1}^{n_F} \sum_{j=1}^9 I_i(x_{0j}, y_{0j}) m s_{ij} \cdots \cdots (13)$$

$$\sigma_C^2 = \sum_{i=1}^{n_F} \sum_{j=1}^9 \sum_{k=1}^{n_F} \sum_{l=1}^9 I_i(x_{0j}, y_{0j}) I_k(x_{0l}, y_{0l}) \sigma_{L_{ij}} \sigma_{L_{kl}} \rho_{ijkl} \cdots \cdots (14)$$

Fig. 8 は(13)(14)式から求められた柱軸力 C の変動係数 $\delta_C (= \sigma_C / \mu_C)$ と1ベイの面積との関係を示したものである。実線は積載荷重の平面的な相関性を(6)式に基づいて評価した場合、点線は平面的な相関性はないと仮定した場合である。また、図中に実測データから計算した柱軸力の変動係数を内柱、側柱、隅柱に分けてプロットした。内柱、側柱については相関を評価した場合のモデルの解析値と良く一致しており、解析モデルの妥当性が示されている。隅柱に関しては実測値がやや解析値よりも



(a) $d_x = 0$ (m)



(b) $d_x = 6$ (m)

Fig. 7 Correlation coefficients between unit loads

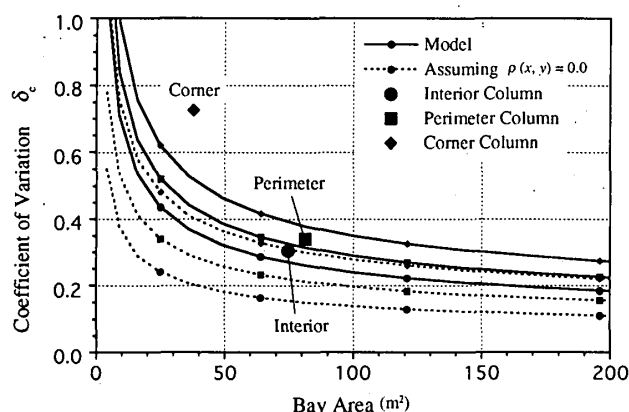


Fig. 8 Coefficient of variation of column live loads

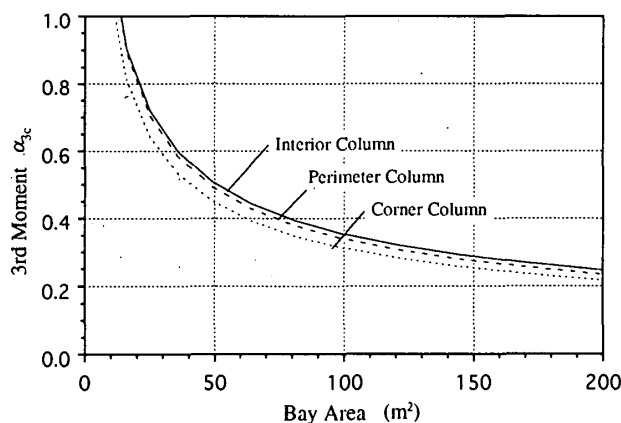


Fig. 9 3rd moment of column live loads

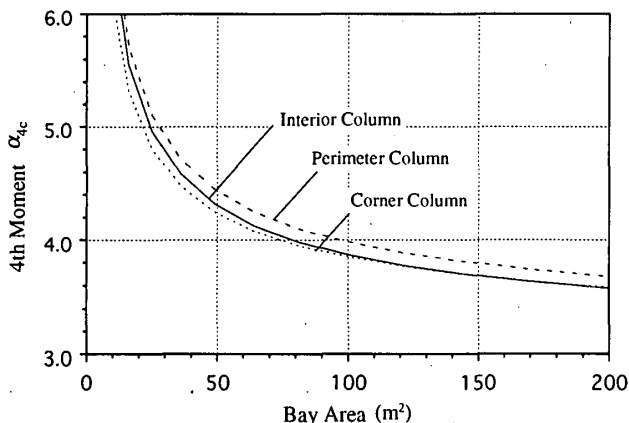


Fig. 10 4th moment of column live loads

大きくになっているが、平面的な相関を考慮した方が相関を無視した場合よりも実測データに近い値となった。

Fig. 9, Fig. 10は(8)(9)式でモデル化した α_{3L} , α_{4L} を用い, L_C の3次, 4次積率 α_{3C} , α_{4C} をベイ面積で整理して示したものである。 α_{3C} , α_{4C} は(12)式に基づき次式で計算した¹¹⁾。

$$\alpha_{3C} = \frac{\rho_F \sqrt{\rho_F^3 \alpha_{3L} + (1-\rho_F) \sqrt{1-\rho_F} \alpha_{3L}}}{\sigma_L^3} \dots\dots\dots (15)$$

$$\alpha_{4C} = \frac{\rho_F^2 t_1^4 \alpha_{4L} + (1-\rho_F)^2 t_4 \alpha_{4L} + 3(1-\rho_F) t_{22} + 6\rho_F(1-\rho_F) t_1^2 t_2}{\sigma_L^4} \dots\dots\dots (16)$$

ここに

$$t_1 = \sum_{i=1}^{n_F} \sum_{j=1}^9 I_{ij} \sigma_{L_{ij}} \dots\dots\dots (17)$$

$$t_2 = \sum_{i=1}^{n_F} \sum_{j=1}^9 I_{ij}^2 \sigma_{L_{ij}}^2 \dots\dots\dots (18)$$

$$t_3 = \sum_{i=1}^{n_F} \sum_{j=1}^9 I_{ij}^3 \sigma_{L_{ij}}^3 \dots\dots\dots (19)$$

$$t_4 = \sum_{i=1}^{n_F} \sum_{j=1}^9 I_{ij}^4 \sigma_{L_{ij}}^4 \dots\dots\dots (20)$$

$$t_{22} = \sum_{i=1}^{n_F} \sum_{j=1}^9 \sum_{k=1}^{n_F} \sum_{l=1}^9 I_{ij}^2 I_{kl}^2 \sigma_{L_{ij}}^2 \sigma_{L_{kl}}^2 \dots\dots\dots (21)$$

である。(17)~(21)式では $I_i(x_{0j}, y_{0j})$ および面積 s_{ij} のときの(7)式による σ_L をそれぞれ I_{ij} , $\sigma_{L_{ij}}$ と省略した。また, (15)(16)式の α_{3L} , α_{4L} , ρ はその柱軸力算定において最も影響の大きいユニットの積率を代表値として用いた。3次, 4次積率ともにベイ面積の増加に伴ってそれぞれ0と3に漸近する傾向にあるが, 変動係数に比べると内柱, 側柱, 隅柱による差は小さくなっており, 柱軸力においては分布形状は内柱, 側柱, 隅柱でほとんど等しくなっている。

4. 複数層を支える柱の負担積載荷重の確率モデル

複数層の床を有する建物では, 柱の負担する積載荷重値は L_C と等しい統計的性質を持つ n 個の積載荷重 L_{C1} , L_{C2} , \dots が高さ方向に足し合わされていくことになる。従って, n 層の床を支える柱の負担積載荷重 L_{Cn} は

$$L_{Cn} = \sum_{i=1}^n L_{Ci} \dots\dots\dots (22)$$

で定義される。このとき, L_{Cn} の平均値 μ_{Cn} , 標準偏差 σ_{Cn} は(14)式で求めた σ_C を用い,

$$\mu_{Cn} = n \mu_C \dots\dots\dots (23)$$

$$\sigma_{Cn}^2 = n \sigma_C^2 + n(n-1) \sigma_C^2 \rho_F \dots\dots\dots (24)$$

となる。(24)式における ρ_F は異なる層間の柱軸力の相関係数であり, 各階がどの程度似かよった物品配置で常時

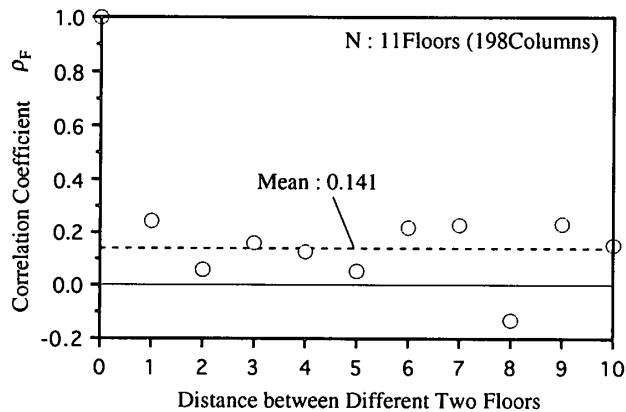


Fig. 11 Correlation coefficient between different two floors

使用されているかを表わすパラメータである。 ρ_F に関する実測調査結果はほとんど得られていないのが現状であり, 建物の用途や置かれる物品の特徴によって詳細に検討が加えられる必要がある。本論文で実測調査の対象とした事務所建築物はすべて自社ビル用途であり, OA機器を含む事務用途に用いられている。賃貸のビルで同一ビル内に異なるテナントが入居している場合や, 自社ビルであっても階によって異なる用途に用いられている場合には, ρ_F はさらに小さくなることも予想される。異なる階間の積載荷重に関する統計的相関性の実測データの充実を待って, 各階の用途の違いも含めた ρ_F の評価が今後必要である。ここでは限られた数のデータであるが, 建物Aに関して実測調査結果より算出した柱軸力の相関係数を2つの階の差で整理したものをFig. 11に示す。2層間の距離の変化による ρ_F への有意な影響は認められず, ここでは2層間の距離にかかわらず相関係数の平均値0.141を ρ_F の値として採用する。また, L_{Cn} の3次, 4次積率 α_{3Cn} , α_{4Cn} は(15)(16)式で求めた α_{3C} , α_{4C} を用い, それぞれ次式で算出する。

$$\alpha_{3Cn} = \frac{\rho_F \sqrt{\rho_F^3 n^3 \sigma_C^3 \alpha_{3C} + (1-\rho_F) \sqrt{1-\rho_F} n \sigma_C^3 \alpha_{3C}}}{\sigma_{Cn}^3} \dots\dots\dots (25)$$

$$\alpha_{4Cn} = \frac{\rho_F^2 n \sigma_C^4 \alpha_{4C} + (1-\rho_F)^2 n \sigma_C^4 \alpha_{4C} + 3(1-\rho_F)^2 n(n-1) \sigma_C^4 + 6\rho_F(1-\rho_F) n^4 \sigma_C^4}{\sigma_{Cn}^4} \dots\dots\dots (26)$$

Fig. 12はベイ面積が実測調査データのベイ面積の平均値81.23m²の場合について, (23)(24)式で算出した μ_{Cn} と σ_{Cn} から求めた L_{Cn} の変動係数 δ_{Cn} を支える床数 n で整理して内柱, 側柱, 隅柱ごとに示したものである。異なる層間の相関係数 ρ_F は実測データに基づき, $\rho_F = 0.141$ としている。支える床数が増加するに従って各柱ともほぼ等しい割合で δ_{Cn} が低下している。また, 図中○は建物Aの実測調査データから得られた各階の柱の負担積載荷重の変動係数を表わす。データ数の関係から実測データは内

柱、側柱、隅柱の区別をしていないため多少ばらつきはあるものの、全体的な変動係数の低減傾向はモデルに基づく変動係数と良い対応をしている。

5. 柱軸力計算用積載荷重の層数低減係数

前節までで得られた複数層を支える柱の負担積載荷重の統計データを用い、本節では設計における柱軸力計算用積載荷重値の層数による低減係数について考察を行う。

設計荷重の評価においては、複数層を支える柱の負担積載荷重値 L_{Cn} の統計データとして得られている(23)～(26)式の積率から、ある非超過確率 p_e に対応する積載荷重値 L_e を求める必要がある。 L_e の算出には次の3つの手法を用いる。

- 1) (23)(24)式を用いた2次モーメント法による評価
- 2) (23)(24)式の平均値、標準偏差を有するガンマ分布を仮定した場合の評価
- 3) (23)～(26)式の積率を用いた高次積率標準化手法に基づく評価

1)の手法では L_e は標準正規確率分布関数 Φ を用い

$L_e = \mu_{Cn} + \Phi^{-1}[1 - p_e] \sigma_{Cn}$ (27)
で求められる。2)では、パラメータ $v = \mu_{Cn} / \sigma_{Cn}^2$, $k = \mu_{Cn}^2 / \sigma_{Cn}^2$ を用い、次式を満たす L_e を計算すれば良い。

$$p_e = \int_0^{L_e} \frac{v(vx)^{k-1}}{\Gamma(k)} dx \quad \text{.....(28)}$$

ここに Γ はガンマ関数である。また、3)の手法では、(23)から(26)までの積率を用い

$$p_e = \Phi \left[S_{4Z} \left(S_{3Z} \left(\frac{L_e - \mu_{Cn}}{\sigma_{Cn}} \right) \right) \right] \quad \text{.....(29)}$$

を満たす L_e を求めれば良い。ここに

$$S_{3Z}(x) = \frac{3\alpha_{3Z} + 6x - \alpha_{3Z}x^2}{\sqrt{36 - 10\alpha_{3Z}^2}} \quad \text{.....(30)}$$

$$S_{4Z}(x) = \frac{x + (3 - \alpha_{4Z})x^3}{60\sqrt{\frac{1 + (3 - \alpha_{4Z})\alpha_{4Z}}{30}}} \quad \text{.....(31)}$$

である¹¹⁾。なお、ここでは(30)(31)式の標準化関数の性質を考慮し、 α_{3Z} , α_{4Z} が正規分布と大きく異なるときには $\alpha_{3Z} < 0.8$, $\alpha_{4Z} < 5.0$ と範囲を限定している。

Fig.13は実測結果に基づき $p_F=0.141$, ベイ面積 81.2m^2 のときの非超過確率99%に対応する積載荷重値 L_{e99} を上記の1)～3)の手法で求めたものである。確率モデルの基本となるユニット荷重のばらつきが右に裾の伸びた形状であったため、正規分布を仮定している手法1)よりもガンマ分布を仮定した手法2)の方が全体的に大きな L_e が得られた。また、3次、4次の積率から分布形の非正規形状の

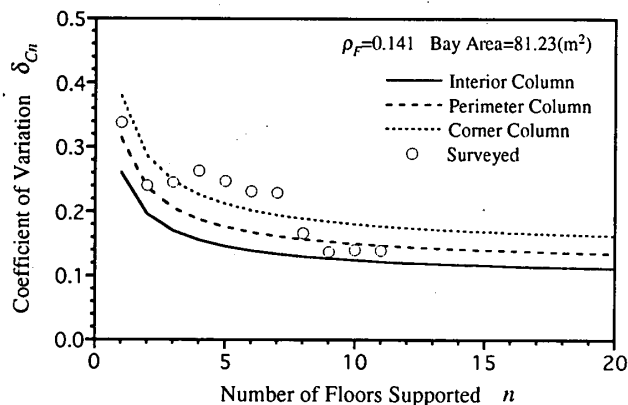


Fig. 12 Coefficient of variation of multiple story column δ_{Cn}

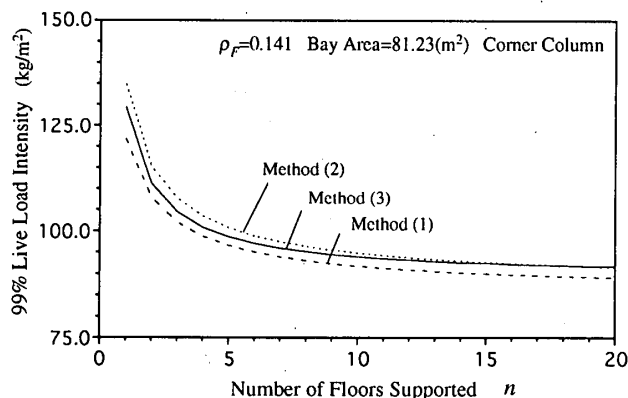


Fig. 13 99% live load intensity in changing of calculation method

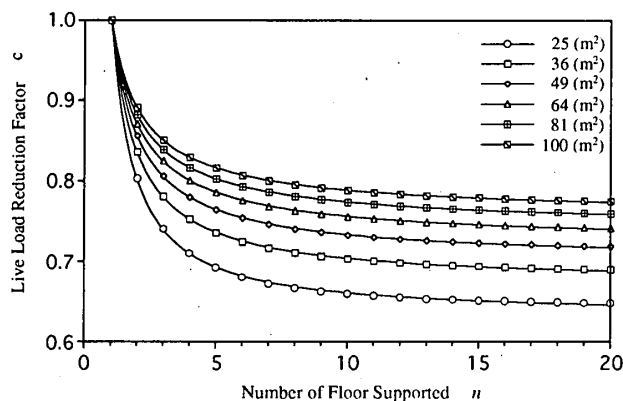


Fig. 14 Live load reduction factors and fitted curves

変化を評価している手法3)で算出した L_{e99} は1)と2)の間となった。

こうした支える床数による L_e の低下から層数低減係数を算定するため、中柱について、1層を支えるときの99%積載荷重で L_{e99} を除した値 c_f をベイ面積が 25m^2 から 100m^2 の場合について Fig. 14 に示す。 L_{e99} は手法3)で算定している。 c_f はベイ面積の大きさによって変化の割合が異なってくる。 c_f は $n=1$ のとき1となり、以後指数関数的に減少することを考慮し、 c_f を支える床数 n の関数として次式で近似する。

$$c_f = a + \frac{1-a}{n^b} \quad \text{.....(32)}$$

このときの最小自乗法で得られたパラメータ a , b を Table 4 に示す。また、各近似曲線は Fig. 14 中に実線で示している。こうして求めた低減係数 c_f と各規準および指針の層数低減係数を比較したものが Fig. 15 である。いずれの規準・指針も曲線的に n の影響を反映しているが、低減の程度は Eurocode¹²⁾ が最も小さく、以後日本建築学会荷重指針⁵⁾, ISO¹³⁾ という順になっている。また、本解析モデルから算出した c_f は他の指針と比べ n の小さいところで比較的大きな低減がみられた。

こうして算出された c_f を用いて設計用積載荷重値の検討を行うには、層数や面積による低減を行う前の基本荷重値の設定や、柱部材の影響面積の変化による面積低減係数の影響を含めて c_f を評価する必要がある。ここでは実用性を考え、 c_f を n だけの関数で定義した場合の設計荷重に基づいて c_f の評価例を示す。Fig. 16 は本解析モデルで算出した面積が 25m² から 100m² の場合の L_{e99} 、および Fig. 14 で示した c_f のうちベイ面積が 25m² のときの c_f を用い、柱軸力計算用設計荷重値 L_d を次式

$$L_d = L_0 \times c_a \times c_f \cdots \cdots (33)$$

で計算した結果を示したものである。ここに c_a は面積による設計荷重の低減係数であり、事務所建築物に関する調査結果¹⁴⁾ に基づき

$$c_a = 0.64 + \frac{2.15}{\sqrt{s_f}} \cdots \cdots (34)$$

とした。上式中 s_f は柱の影響面積である。また、 L_0 は面積および支える床数による低減を考えない場合の積載荷重値であり、 $L_0 = 189 \text{ kgf/m}^2$ と仮定した⁵⁾。なお、本実測調査結果および解析モデルに基づく L_0 は 178 kgf/m^2 (影響面積=16m²の場合) であり、その比率は1.06である。ベイ面積が大きいほど L_{e99} の低減率は少ないが、全体的な積載荷重値も小さくなっており、 L_d は 25m² のときの c_f を用いても、 $L_0 = 189 \text{ kgf/m}^2$ および(34)式の c_a を用いればベイ面積の影響を考えても過剰な低減が行われることはなく、ほぼ妥当な低減係数が提示できているといえる。

L_{Cn} の統計量は(24)~(26)式で定義されることから、異なる層間の相関係数 ρ_F に大きく影響される。事務所建築を対象とした本調査データでは $\rho_F = 0.141$ であったが、

Table 4 Parameters of load reduction factor

Bay Area	Parameter	Interior Column	Perimeter Column	Corner Column
25m ²	a	0.635	0.613	0.592
	b	1.139	1.101	1.056
36m ²	a	0.674	0.647	0.622
	b	1.023	1.007	0.972
49m ²	a	0.701	0.673	0.647
	b	0.960	0.951	0.922
64m ²	a	0.723	0.694	0.670
	b	0.914	0.910	0.886
81m ²	a	0.741	0.712	0.684
	b	0.850	0.878	0.862
100m ²	a	0.755	0.726	0.698
	b	0.862	0.858	0.843

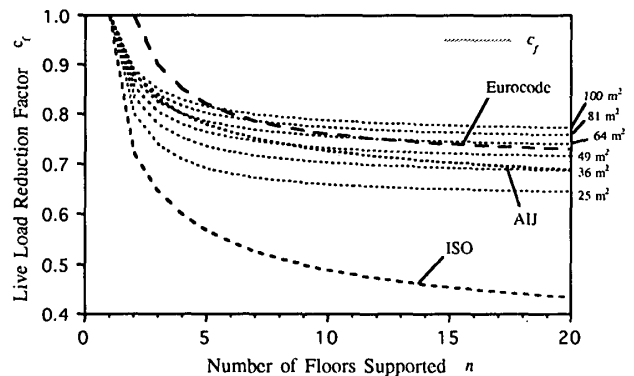


Fig. 15 Code comparison of live load reduction factor

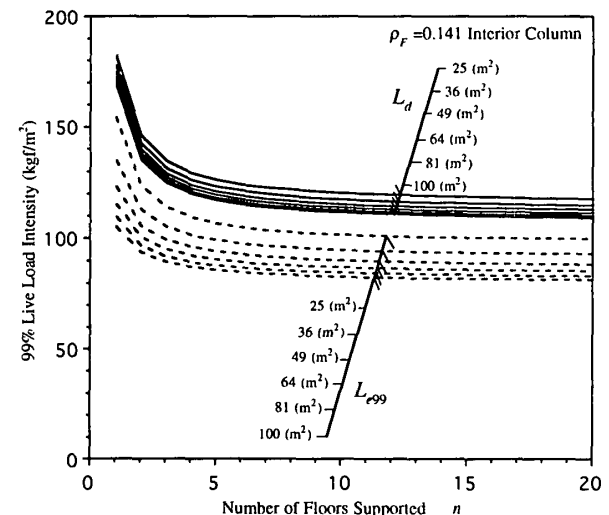
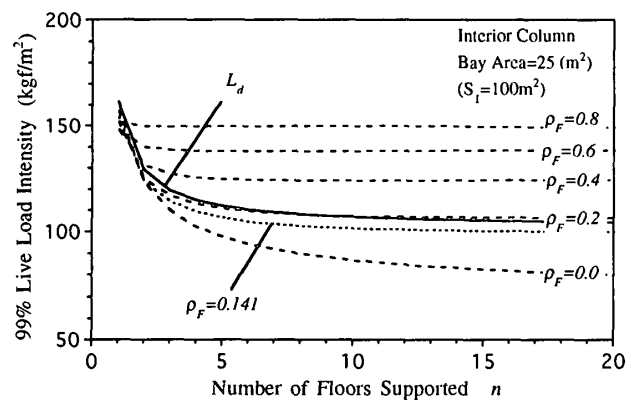
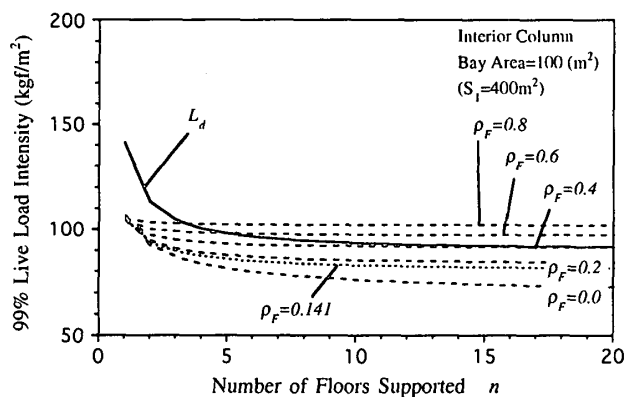


Fig. 16 99% live load and reduced design load

(a) Tributary area = 25 (m²)(b) Tributary area = 100 (m²)Fig. 17 99% live load intensity in changing of tributary area and ρ_F

用途の異なる建物や、複数の用途に用いられる建物を考慮すると ρ_F の変化による L_e への影響についても考慮する必要がある。Fig. 17は負担面積が25m²(a), 100m²(b)の場合について、 ρ_F が0.0から0.8まで変化したときの内柱の L_{e99} を点線で示したものである。また、実測調査に基づく $\rho_F=0.141$ を用いた L_{e99} を太い実線で併記した。負担面積が25m²の場合についてみると、 $\rho_F=0.0$ では20層を支える柱の L_{e99} は単層を支える柱の L_{e99} の50%程度まで低下しているのに対し、 $\rho_F=0.8$ の場合には L_{e99} はほとんど変化しておらず、 ρ_F が L_e に与える影響は非常に大きい。負担面積が100m²の場合は全体に L_{e99} が小さくなるとともに $\rho_F=0.0$ の場合でも20層を支える柱の L_{e99} は単層を支える柱の L_{e99} の70%程度までしか低下していない。また、図中太い実線は(34)式で示した L_d をプロットしたものである。負担面積が100m²の柱では ρ_F が0.6以上のときに若干 L_d が L_{e99} を下回る程度であるが、負担面積が25m²の柱では ρ_F が大きくなると L_d が L_{e99} を大きく下回る場合がみられた。こうした結果より、事務所以外の用途については、建物用途による ρ_F を適切に評価し、特に負担面積の小さい柱の積載荷重に十分注意して層数低減係数を決定する必要がある。

6. 結 論

以上、実測データに基づき、NBSモデルを用いた柱軸力計算用積載荷重の確率モデルを提示し、それに基づいて設計用積載荷重の層数による低減係数についての検討を行った。本論文で得られた結論は以下の通りである。

- 1) 柱軸力計算用積載荷重の各種統計量を事務所建築物に関する実測調査データより明らかにした。
- 2) 柱軸力計算用の等価等分布荷重の統計量をNBSモデルを用いて評価する手法を提示した。
- 3) 柱軸力計算用積載荷重の層数による低減係数は、基本積載荷重値および面積による積載荷重の低減とあわせて評価される必要があるが、本実測で得られた統計データに基づいて等しい非超過確率を与える積載荷重の低減係数の提示が行えた。
- 4) 複数層を支える柱の負担積載荷重は柱の負担面積、異なる

層間の相関性に影響を受ける。特に、層間の相関係数の影響は大きく、今後、用途や置かれる物品ごとに調査データを充実し、この相関性を明確にしていける必要がある。

謝 辞

積載荷重の実測調査にあたり、新日本製鐵(株)大矢俊樹氏には多大のご協力をいただきました。また、事務所の物品データに関して、内田洋行(株)稲餅正幸氏に資料の提供を賜りました。ここに深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 井戸田秀樹, 小野徹郎: 実測に基づく事務所建築の積載荷重に関する考察 - 柱軸力用積載荷重の階数による低減に関する検討 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.163-164, 1991年
- 2) 釜田 学, 井戸田秀樹, 小野徹郎: 事務所建築における柱設計用積載荷重の階数による低減 その1 - 常時積載荷重に基づく低減係数 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.213-214, 1992年
- 3) 井戸田秀樹, 小野徹郎, 早川由則: 事務所建築における柱設計用積載荷重の階数による低減その2 - 荷重偏在時の低減係数の検討 -, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.215-216, 1992年
- 4) 井戸田秀樹, 小野徹郎: 実測調査に基づく柱軸力計算用積載荷重の確率モデル, 東海支部研究報告集, 1993年
- 5) 日本建築学会: 建築物荷重指針・同解説, 1993年6月
- 6) Corotis, R.B., "Statistical Analysis of Live Load in Column Design", Journal of the Structural Division, ASCE, August, 1972, pp.1803-1815
- 7) Choi, E.C.C., "Live Load Model for Office Buildings", The Structural Engineer, Vol.67, No.24/19, December, 1989, pp.421-437.
- 8) Peir, J.C., "A Stochastic Live Load Model for Buildings", Research Report R71-35, School of Engineering, MIT, Massachusetts, USA, 1971
- 9) McGuire, R.K. and Cornell, C.A., "Live Load Effects in Office Buildings", Journal of the Structural Division, ASCE, July, 1974, pp.1351-1366
- 10) Kanda, J. and K. Kinoshita, "A Probabilistic Model for Live Load Extremes in Office Buildings", ICOSSAR'85, Vol. II, pp.287-296
- 11) 小野徹郎, 井戸田秀樹, 戸塚明宏: 高次積率標準化手法を用いた構造系の信頼性評価法, 日本建築学会構造系論文報告集, 第148号, 1990年2月, pp.71-79
- 12) Eurocode for Actions on Structures, June 1990
- 13) Draft International Standard ISO/DIS 2103, 3, 1985
- 14) 山村一繁, 神田 順: 面積による積載荷重低減に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1991年9月, pp.169-170

(1993年3月9日原稿受理, 1993年10月18日採用決定)