

物品の偏在状態を考慮した柱軸力計算用積載荷重値

LIVE LOAD FOR COLUMN DESIGN CONSIDERING
OCCURRENCE PROBABILITY OF
FURNITURE CONCENTRATION

井戸田 秀樹*, 小野 徹郎**

Hideki IDOTA and Tetsuro ONO

The temporary concentration of live loads due to the moving or remodeling of a building must be considered as an extraordinary live loads of the multiple-story columns. In this paper, the concentration of furniture was computer-simulated using the surveyed live loads of the office building, and the design load for the axial load of the multiple-story column at the time of furniture concentration was studied. The paper shows the extent to which the reduction factor obtained from the sustained load maintains safety at the time of furniture concentration.

Keywords : live load, furniture concentration, column design, multiple story column, statistical method

積載荷重, 物品偏在, 柱設計, 複数層支持柱, 統計論的手法

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設計用積載荷重を低減することができる。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。この中でも, 常時使用状態における積載荷重の統計的性質に基づいた柱軸力計算用積載荷重値とその低減に関しては実測調査データを用いた検討が行われている⁴⁾。しかし, こうした常時使用状態におけるばらつきの中での過大な積載荷重だけではなく, 物品の入れ替えや引越等によっても一時的な偏在状態を生ずる可能性がある。特に, 複数層で同時に起こる偏在状態を考慮することにより, 常時使用状態とは別の観点から柱設計用積載荷重の評価が可能と考えられる。物品偏在時の積載荷重に関しては, 現在までに数件の検討結果が報告されているが^{5)~8)}, 複数層を支える柱で問題となる物

品偏在の同時生起確率を考慮し, 複数層を支える柱の設計荷重について検討した報告はなされていない。

本論文は, 積載荷重の偏在状態を考慮した柱設計用積載荷重, およびその階数による低減係数に関して検討を行うものである。事務所建築に関する積載荷重の実測データに基づいて荷重の偏在状態をシミュレートし, 偏在状態での積載荷重値を提示している。また, 偏在状態の生起を不規則な作用時間を有する確率過程でモデル化し, 複数層に渡る偏在積載荷重の同時生起確率とそれに基づく層数低減係数の検討を行っている。

2. 物品偏在のシミュレーション方法

テナント変更に伴う引越や物品の入れ替えに伴って積載荷重は一時的な偏在状態を生ずることがある。物品の偏在状態は一時的なものであり, その実測調査はかなり困難となる。そこで本研究では常時使用状態での積載荷重の実測調査データを用い, シミュレーションによって

本論文の一部は, 参考文献1)~3)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.

物品の偏在状態を生成して、それに基づいて物品偏在時の統計データを得る。シミュレーションに用いた常時使用状態の積載荷重調査データは基本的に文献¹⁾で報告しているものであるが、さらに最近の調査データを加えてデータ数を追加している。調査対象面積と調査物品数をTable 1に示す。総調査面積は12,847m²、総調査物品数は9,347であり、用途は全て事務所である。Fig. 1は常時使用状態における柱の負担積載荷重 L_s のヒストグラムを示したものである。 L_s は積載荷重による柱軸力をその柱の負担面積で割ったものであり、柱軸力の算定は影響関数⁴⁾を用いて行った。データ総数は340で、平均値 μ_{LS} は67.6 kg/m²、変動係数 δ_{LS} は47%であった。正規分布、対数正規分布、ガンマ分布の3分布形に対してKolmogorov-Smirnov test (K-S検定)を行った結果、ガンマ分布が最も高い適合度を示した。

物品偏在の手法は基本的には文献⁸⁾で提示されている手法に従うが、柱軸力算出用のために若干の簡略化を行っている。具体的な偏在シミュレーションの手順は以下の通りである。

- 1) 床面を1m×1mの正方形ユニットに分割し、各物品のユニット内での占有面積を計算する。
- 2) 寄せる壁に近い方の物品から順に壁際のユニットまで寄せる。このとき、物品の荷重はユニットの中心位置に集中荷重として載荷する。
- 3) 1つのユニット内の物品の占有面積を物品が寄せられるごとに累積していき、その累積専有面積が限界専有面積 α_L m²を越えたら、その物品から次の空いたユニットへ入れていく。
- 4) 以上の手順を全物品について繰り返し行う。

限界専有面積 α_L m²は物品をどの程度の密度で偏在させるかを表すパラメータである。オフィス内に存在する各種物品を偏在させる状況を考慮した工学的判断、および既往の文献⁵⁾⁶⁾で用いられている値を考慮して、本シミュレーションでは α_L を0.9m²~1.1m²の範囲で変化させている。Fig. 2は偏在のシミュレーション方法を模式的に示したものである。物品を偏在させる床面はデータの統一を図るため長方形に区切ることでできるオフィス部分に限り、その長辺方向(X方向)と短辺方向(Y方向)のいずれかに偏在を生じさせるものとする。また、物品の偏在は部屋単位で行うが、可動間仕切りやローパーティションは偏在させる物品として扱った。なお、物品偏在時には偏在された物品上に人が乗る可能性は低いと考え、人間荷重は偏在の対象としない。

3. 荷重偏在時の負担積載荷重

3-1 単層支持柱

前節で示した手法に従い、物品の偏在シミュレーションを行った。このときの柱の負担積載荷重 L_c のヒストグ

Table 1 Surveyed Buildings

Surveyed Buildings	The Number of Floors	Floor	Surveyed Area (m ²)		The Number of Furnitures	
			Floor	Building	Floor	Building
Building A	11	15F	645.4	7.100	438	5.183
		14F	645.4		455	
		13F	645.4		446	
		12F	645.4		475	
		11F	645.4		351	
		10F	645.4		566	
		9F	645.4		495	
		8F	645.4		516	
		7F	645.4		485	
		6F	645.4		499	
		5F	645.4		457	
Building B	4	4F	267.8	1.551	285	1.181
		3F	453.6		445	
		2F	453.6		237	
		1F	375.8		214	
Building C	3	5F	391.2	1.349	326	1.331
		4F	479.1		512	
		3F	479.1		493	
Building D	7	8F	287.4	2.874	269	1,652
		7F	287.4		154	
		6F	574.7		297	
		5F	574.7		260	
		4F	429.2		174	
		3F	574.7		202	
		2F	574.7		296	
Total		12.874		9.347		

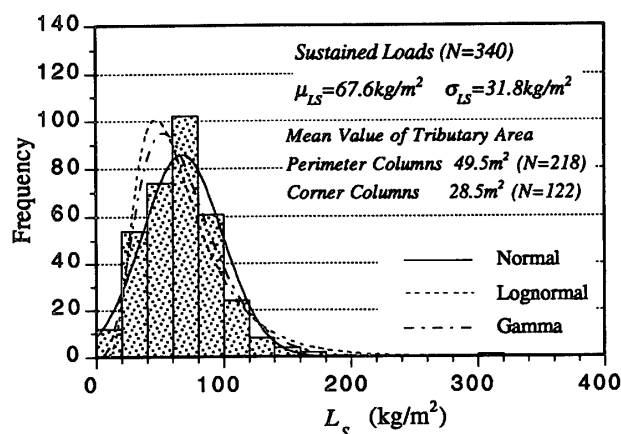


Fig. 1 Histogram of Column Sustained Load

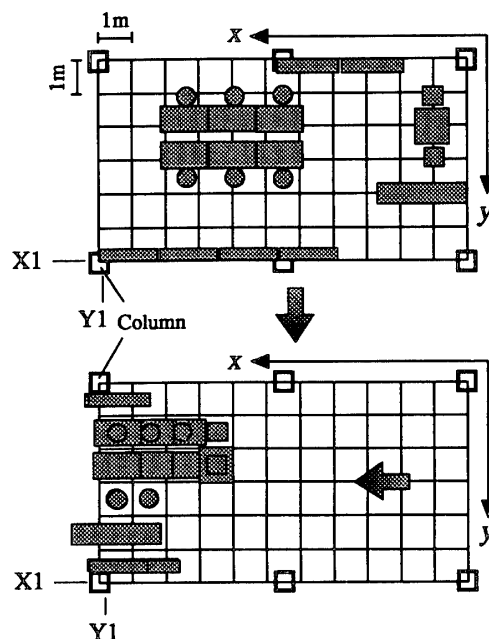
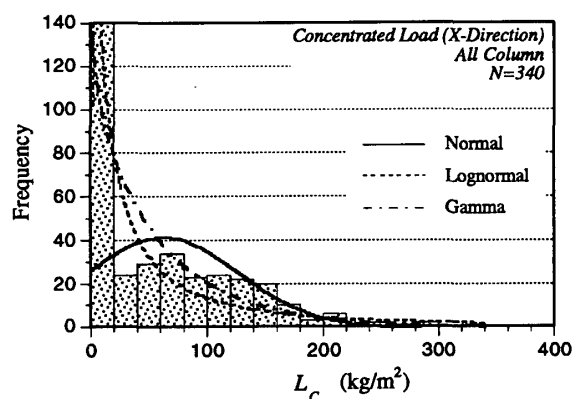
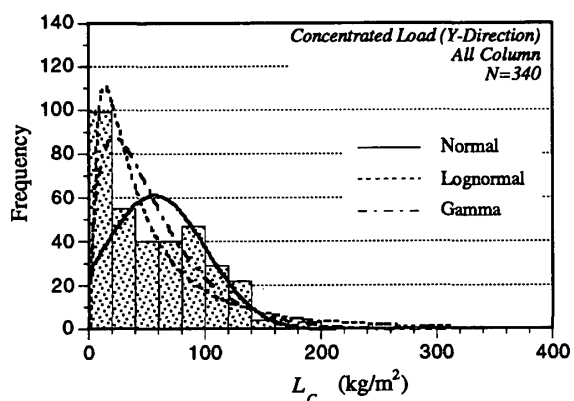


Fig. 2 Furniture Concentration Simulation



(a) X-Direction



(b) Y-Direction

Fig. 3 Histograms of Concentrated Load (All Column)

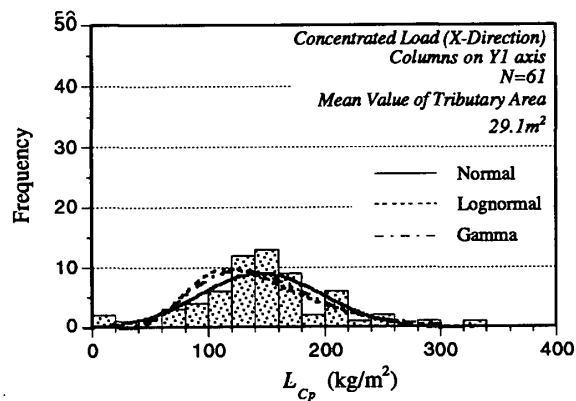
Table 2 Statistical Results of Concentrated Live Load (All Columns)

			Number of Data	Mean Value (kg/m ²)	Standard Deviation (kg/m ²)	Coefficient of Variation
Concentrated Load (All Columns)	X-direction	$\alpha_L = 0.9$	340	61.2	61.9	1.01
		$\alpha_L = 1.0$	340	61.8	65.0	1.05
		$\alpha_L = 1.1$	340	62.2	67.1	1.08
	Y-direction	$\alpha_L = 0.9$	340	56.6	41.8	0.74
		$\alpha_L = 1.0$	340	56.1	44.2	0.79
		$\alpha_L = 1.1$	340	56.2	45.0	0.80

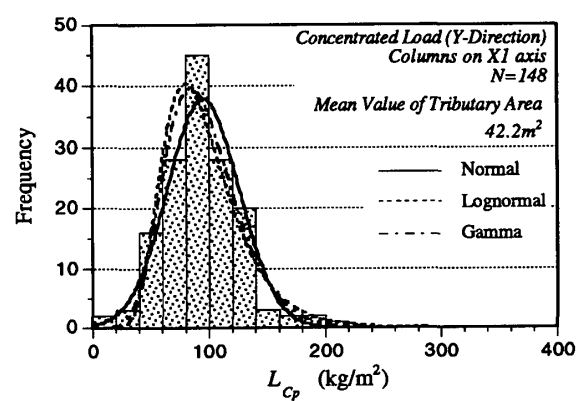
Table 3 K-S Test Results for Concentrated Live Load (All Columns)

		Normal Distribution	Lognormal Distribution	Gamma Distribution	D_n^{α}
All Columns	X-Direction	0.170	0.193	0.190	0.088
	Y-Direction	0.102	0.099	0.104	0.088

ラムを示したのが Fig. 3 である。また、荷重偏在時の統計量を Table 2 に示す。常時使用状態 L_s と比較すると、 L_c は 0 (kg/m²) から 300 (kg/m²) 付近まで広い範囲で荷重値がばらつく形となっている。 L_c の変動係数 δ_{Lc} は通常状態の変動係数よりもかなり高い値となり、物品を寄せた通り上の柱ではどちらも 30% 強となった。また、限界専有面積 α_L による影響は $\alpha_L = 0.9 \sim 1.1$ の範囲では平均値、



(a) X-Direction



(b) Y-Direction

Fig. 4 Histograms of Concentrated Load (Columns on X1 or Y1 Axis)

Table 4 Statistical Results of Concentrated Live Load (Columns on X1 or Y1 Axis)

			Number of Data	Mean Value (kg/m ²)	Standard Deviation (kg/m ²)	Coefficient of Variation
Concentrated Load	X-direction (on Y1 axis)	$\alpha_L = 0.9$	61	145.6	52.6	0.36
		$\alpha_L = 1.0$	61	152.0	53.1	0.35
		$\alpha_L = 1.1$	61	158.3	54.2	0.34
	Y-direction (on X1 axis)	$\alpha_L = 0.9$	148	89.3	31.1	0.35
		$\alpha_L = 1.0$	148	93.6	31.2	0.33
		$\alpha_L = 1.1$	148	95.1	32.0	0.34

Table 5 K-S Test Results for Concentrated Live Load (Columns on X1 or Y1 Axis)

		Normal Distribution	Lognormal Distribution	Gamma Distribution	D_n^{α}
Columns on X1 or Y1 Axis	X-Direction	0.135	0.105	0.096	0.209
	Y-Direction	0.034	0.068	0.043	0.134

変動係数ともにあまり見られなかった。Table 3 は $\alpha_L = 1.0$ m² のときの偏在荷重 L_c の K-S 検定結果を示したものである。既往の研究で報告されているように⁶⁾、相対的にはガンマ分布ないしは対数正規分布が適合度が高かったが、有意水準 1% 時の限界値 D_n^{α} を満足する適合度の分布形は認められなかった。これは、物品を偏在させた床面内のすべての柱のデータをまとめて統計処理すると、

偏在によって軸力の増加した柱と、支える物品が存在しなくなった柱とが混在しており、性質の異なる母集団の標本を混在させて扱っているためと考えられる。そこで、物品を偏在させた壁面下にある側柱と隅柱を取り出して統計処理を行った。このヒストグラムと統計処理結果を示したのが Fig. 4 および Table 4 である。分布形は両側に裾を持つ形状となり、Table 5 に示すように K-S 検定の結果、いずれの分布形も有意水準 1 % でも棄却されず、中でも X 方向偏在時にはガンマ分布が、Y 方向偏在時には正規分布が最も高い適合度を示した。床平面の長辺方向に偏在させた X 方向偏在時には $\alpha_L = 1.0 \text{ m}^2$ のとき平均値 152 kg/m^2 と、常時使用状態の約 2.2 倍となった。

Table 6 は Table 5 で採択した確率分布形を用いて、ある非超過確率値に対応する荷重値を算定したものである。偏在密度の高い X 方向偏在の方が全体的にかなり高い値となった。常時使用状態の統計データから算出した設計荷重値との対応は、偏在荷重が生起する頻度等を考慮して決定した非超過確率に対応する荷重値を求めて検討する必要がある。

3-2 複数層支持柱

複数層を支持する柱では、支持する層数の中に偏在荷重が存在する層がいくつ存在するかによって負担積載荷重が影響を受けることになる。今、 N 個の層を支える柱に n 個 ($n \leq N$) の層で偏在荷重が存在するとき、この柱の負担積載荷重の平均値 $\mu_{LC}(N, n)$ は常時荷重状態での柱の負担積載荷重の平均値 μ_{LS} と荷重偏在時の柱の負担積載荷重の平均値 μ_{LC} とを用い、

$$\mu_{LC}(N, n) = \frac{n\mu_{LC} + (N-n)\mu_{LS}}{N} \quad (1)$$

と表すことができる。ここでは各階の μ_{LC} 、 μ_{LS} は等しく、各階での偏在の生起に統計的な相関性はないものと仮定している。Fig. 5 は 10 層の事務所建築を想定し、最上階から 1 層分、2 層分、および 10 層全部に偏在荷重が存在するときの各階の側柱の負担積載荷重の平均値を示したものである。計算では μ_{LS} は Fig. 1 より 67.6 kg/m^2 、 μ_{LC} は Table 4 の X 方向偏在時のシミュレーション結果に基づき 152.0 kg/m^2 とした。最上階のみに偏在荷重が存在するときには、支える床数が増えるに従い負担積載荷重値は減少して μ_{LS} に漸近するのに対し、偏在荷重が存在する床数が増えるほど支える床数に対する負担積載荷重値の減少の割合は小さくなっている。全層で偏在荷重が存在すると、支える床数による平均値の変化はなくなる。

以上、単層支持柱、および複数層支持柱について物品の偏在が生じたと仮定した条件下での柱の負担積載荷重について検討した。しかし、偏在荷重の生起は不規則な時間間隔で出現し、この生起確率と複数層での同時生起確率を考慮した上で柱の負担積載荷重を評価する必要がある。

Table 6 Percentile Value of Concentrated Live Load for Columns on X1 or Y1 Axis

	Distribution Types	99% Value (kg/m ²)	98% Value (kg/m ²)	95% Value (kg/m ²)	90% Value (kg/m ²)
X-Direction	Gamma	300	279	248	222
Y-Direction	Normal	166	157	145	133

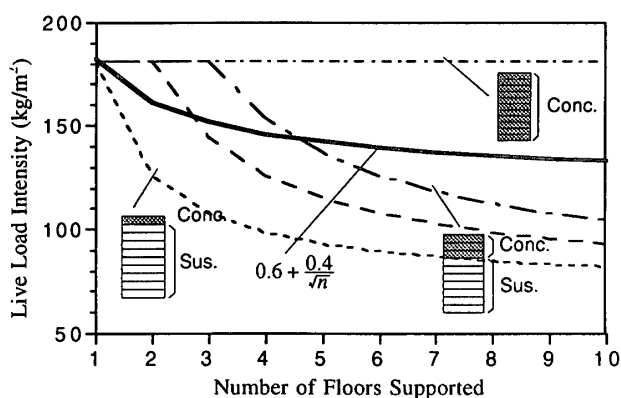


Fig. 5 Mean Value of Concentrated Column Live Load Intensity for 10-Story Office Building

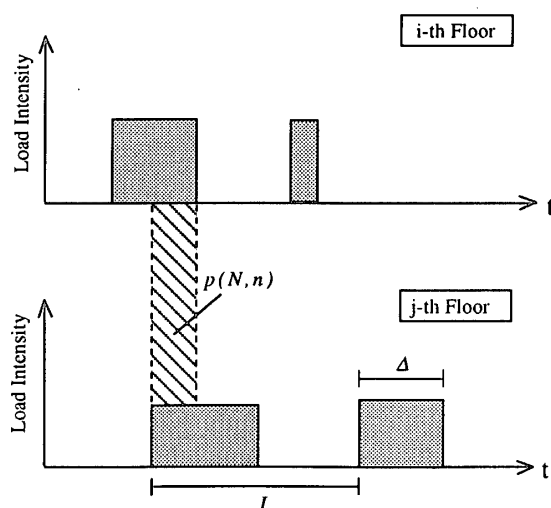


Fig. 6 Random Process Model of Extraordinary Live Loads

ある。次章ではこの偏在荷重の生起にかかわるランダム性を考慮した検討を行う。

4. 複数層における積載荷重の偏在状態の同時生起確率

物品の偏在状態は、テナント変更に伴う引越や物品の入れ替え等に伴って一時的に生ずる。したがって、偏在荷重はその継続時間、再現周期に不規則性があるため Fig. 6 に示すような離散的な確率過程としてモデル化することができる¹¹⁾。荷重偏在状態の継続時間を Δ 、荷重偏在状態の再現周期を I とすると、ある時点 t で偏在状態が起こる確率 p_i は、 Δ と I の平均値 μ_Δ 、 μ_I を用いて

$$p_i = \frac{\mu_{\Delta}}{\mu_i} \quad (2)$$

と表わされる。偏在荷重の Δ と I が各階ごとで同一の確率量に従い、各階での偏在荷重の発生に統計的な相関性がないものとするれば、ある時点 t において n 個の層で同時に偏在荷重が生起している確率 p_{nt} は

$$p_{nt} = p_i^n \quad (3)$$

となる。また、 n 個の層で同時に発生している偏在荷重の継続時間 Δ_n の平均値 $\mu_{\Delta n}$ は

$$\mu_{\Delta n} = \frac{\mu_{\Delta}}{n} \quad (4)$$

で表される¹¹⁾。このとき、 n 個の層で同時に発生している偏在荷重の再現周期 μ_{in} は、 $p_{nt} = \mu_{\Delta n} / \mu_{in}$ と(3)(4)式より

$$\mu_{in} = \frac{1}{n} \frac{\mu_i^n}{\mu_{\Delta}^{n-1}} \quad (5)$$

となる。構造物の耐用期間 T に対して(5)式の μ_{in} が $\mu_{in} \gg T$ という条件下では、期間 T の間に少なくとも1回は n 個の層で同時に偏在荷重が生起する確率 p_n は次式で表される¹¹⁾。

$$p_n = \frac{p_{nt} T}{\mu_{\Delta n}} = \frac{p_i^n n T}{\mu_{\Delta}} \quad (6)$$

ところで、 N 個の層を支える柱で同時に n 個の層 ($N \geq n$) が偏在状態となる組み合わせは ${}_N C_n$ 通りある。従って N 個の層を支える柱において期間 T の間に少なくとも1回は n 個の層で同時に偏在状態の存在する確率 $p(N, n)$ は次式で提示される。

$$p(N, n) = 1 - (1 - p_n)^{{}_N C_n} \quad (7)$$

Fig. 7 は $p(N, n)$ を上式により算出し、(1)式で求めた負担積載荷重の平均値 $\mu_{LC}(N, n)$ で整理して示したものである。具体的には、(1)式と(7)式から n を消去し、 $\mu_{LC}(N, n)$ と $p(N, n)$ の関係に直したものである。ここでは $T=100$ 年、 $\mu_{\Delta}=1$ 日、 $\mu_i=7.4$ 年¹²⁾と仮定している。なお、この仮定の下では(5)式で求められている μ_{in} は $\mu_{in} = (7.4 \times 365)^n / n$ となり、(6)式を導くための条件 $\mu_{in} \gg T$ は満足されている。支える床数が多いほど偏在荷重は各階で平均化されるため、生起確率 $p(N, n)$ が等しいところとみると N が大きいほど負担積載荷重も小さくなっている。例えば、偏在荷重の生起確率を 10^{-2} 程度に見積もるならば、3個の層を支える柱の平均負担積載荷重は概ね 140 kg/m^2 となる。

尚、 μ_{Δ} 、 μ_i に関してはほとんど統計データが得られず、今後の調査に期待するところが大きい。また、設計荷重の決定にあたっては μ_{Δ} 、 μ_i の想定値をあらかじめ設定し、それに対応した設計荷重を導くという考え方も必要になろう。

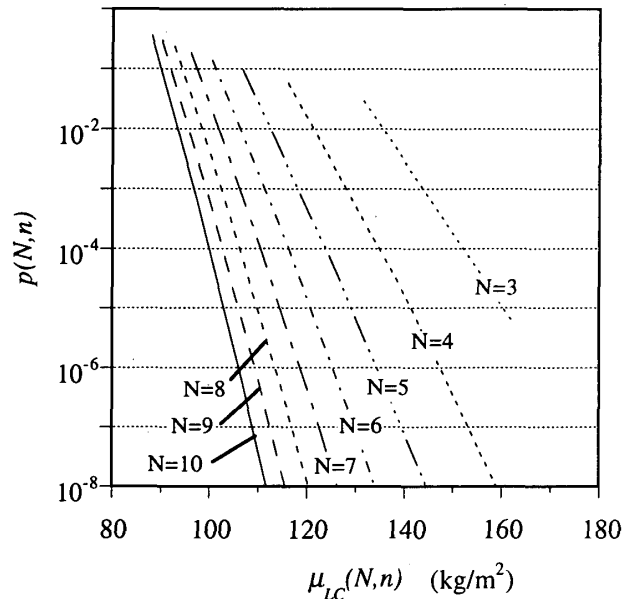


Fig. 7 Mean Value of Concentrated Column Live Load Intensity and Simultaneous Occurrence Probability

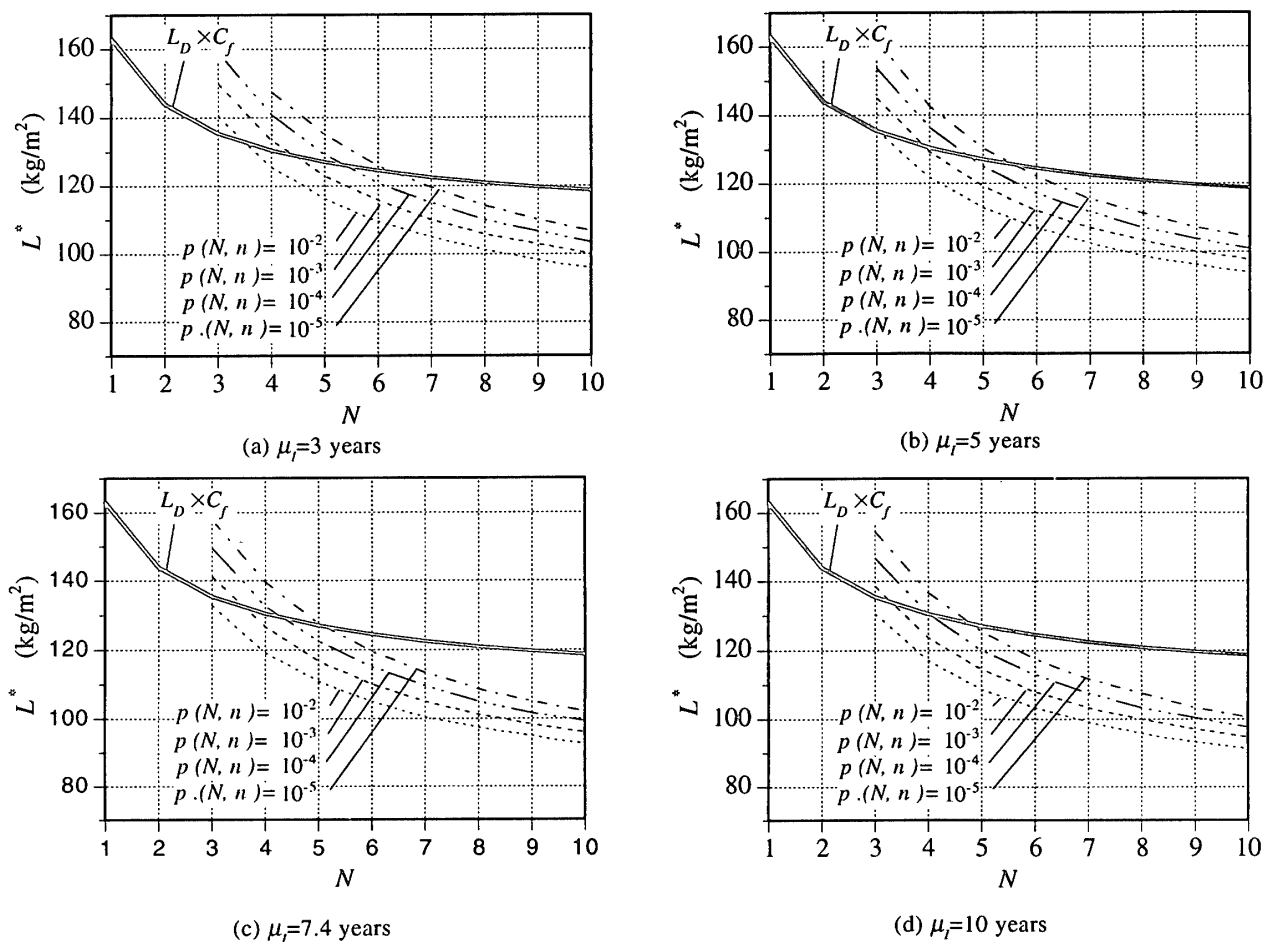
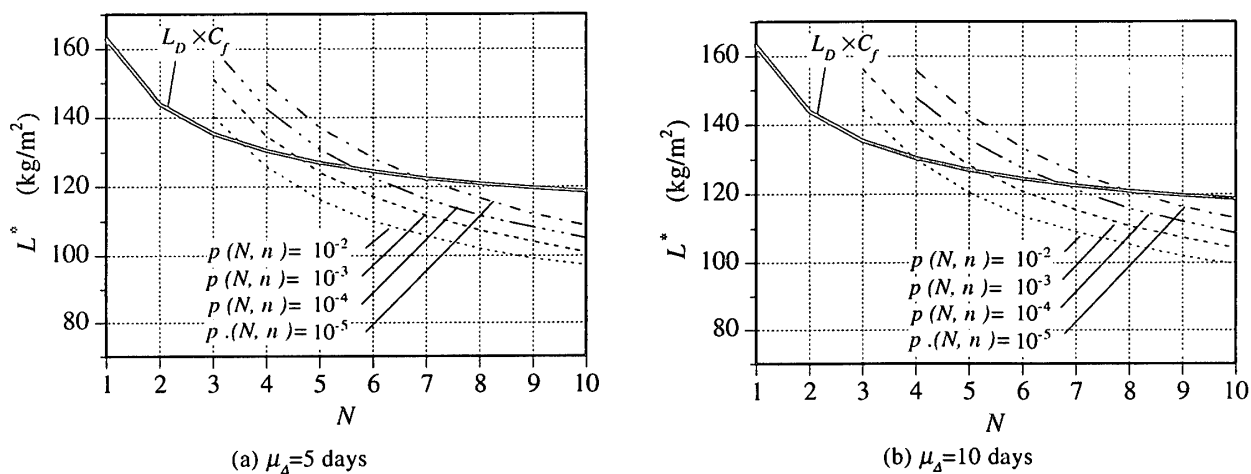
5. 柱軸力計算用積載荷重値の低減係数の検討

前節で求められた複数層での偏在荷重の同時生起確率 $p(N, n)$ を用い、本節では柱軸力計算用積載荷重値の低減係数の検討を行う。設計用積載荷重値の決定においては、 $p(N, n)$ を考慮したある限界荷重に対応した非超過確率を考える必要がある。荷重偏在時の負担積載荷重値の確率密度関数を $f_c(x)$ とすれば、偏在によって柱の負担積載荷重が限界荷重 L^* を超過する確率 $p_{ex}(N, n)$ は、複数層での偏在荷重の同時生起確率 $p(N, n)$ と荷重偏在時の柱の負担積載荷重が L^* を越える確率の積として次式のように表わされる。

$$p_{ex}(N, n) = p(N, n) \int_{L^*}^{\infty} f_c(x) dx \quad (8)$$

$f_c(x)$ は常時荷重および偏在荷重の確率密度関数や柱の負担面積等を考慮して求めなければならないが、今の段階ではこれを決定するに十分な統計データがまだ充実されていないことより、ここでは $f_c(x)$ を正規分布と仮定して $p_{ex}(N, n) = 0.5 p(N, n)$ とする。

Fig. 8 は $\mu_{\Delta}=1$ 日の場合について、一定の $p_{ex}(N, n)$ を与える柱の負担積載荷重の平均値 $\mu_{LC}(N, n)$ を求め、支える床数 N との関係で示したものである。 μ_i は Fig. 7 で用いた実測データに基づく値 $\mu_i=7.4$ 年の他にパラメトリックな検討のため、 $\mu_i=3, 5, 10$ 年の場合の結果もあわせて示している。また、図中の太い実線は常時荷重状態での統計値から導かれる積載荷重値と支える床数の関係を表すものであり、Fig. 1の統計値から算出した積載荷重値 $L_D = \mu_{LS} + 3\sigma_{LS} = 163 \text{ kg/m}^2$ を層数低減係数 $c_f = 0.6 + 0.4/\sqrt{n}$ ¹⁴⁾ で低減した曲線である。 L^* 、 $L_D \times c_f$ とともに N が大きいほど減少するが、変化の割合は異なっており、 N の小さい

Fig. 8 Live Load Intensity of Concentrated Live Load ($\mu_d=1$ day)Fig. 9 Live Load Intensity of Concentrated Live Load ($\mu_f=7.4$ years)

ところで $\mu_{LC}(N, n)$ が $L_D \times C_f$ を上回る傾向にある。例えば N が 3 以下の場合には $C_f=1$ とするか、 L^* を下回らない C_f の値に修正する必要がある。また、 μ_f が長くなるほど L^* は全体に小さくなり、 $L_D \times C_f$ を上回る N の値も小さくなる。

Fig. 9 は $\mu_f=7.4$ 年の場合について μ_d が 5 日と 10 日のときの $\mu_{LC}(N, n)$ を支える床数 N で整理したものである。 $\mu_d=1$ 日の場合と比べると全体的に荷重値は高くなっており、 L_D を上回る N の範囲も広がっている。

これらの結果から、物品の偏在を考慮した荷重値は、

支える床数が比較的少ないときに常時荷重に基づいて求められた設計荷重値を越える可能性のあることが示された。また、常時使用荷重から導いた柱軸力計算用積載荷重値の低減は、偏在荷重の生起する頻度 $p(N, n)$ から決定される N の範囲でのみ許す必要がある。

6. 結

物品の偏在からみた柱軸力計算用積載荷重値と偏在荷重の同時生起確率を示した。また、この同時生起確率を用いて算出した柱の負担積載荷重から、柱軸力計算用積載荷重値の低減係数の検討を行った。物品偏在状態を考慮した積載荷重値は、支える床数が小さいときに常時荷重に基づいて求められた積載荷重値を上回る確率が大きくなることを述べた。さらに、その範囲は物品偏在の再現周期と偏在状態の継続時間を考慮して決定する必要があることを示した。

謝 辞

本論文の実測調査データの整理および統計処理にあたり、(株)鴻池組六嶋敬子氏、および大和ハウス工業(株)近藤祐子氏にご協力いただきました。付して感謝いたします。

参考文献

- 1) 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、構造I、pp.215-216、1992年、9月
- 2) 井戸田秀樹、小野徹郎：積載荷重の偏在状態を考慮した柱設計用積載荷重の低減係数、東海支部研究報告集、1994年、2月
- 3) 近藤祐子、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4 ―物品偏在の同時生起確率を考慮した検討―、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造I、pp.37-38、1994年、9月
- 4) 井戸田秀樹、小野徹郎：柱軸力計算用積載荷重の確率モデルと層数低減係数、日本建築学会構造系論文報告集、第455号、pp.37-45、1994年1月
- 5) 木下一也、神田 順：事務所積載荷重の物品偏在荷重および床用等価等分布荷重、日本建築学会関東支部研究報告集、pp.225-228、1984年
- 6) 神田 順、木下一也：事務所用積載荷重の物品偏在荷重モデル、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1021-1022、1984年10月
- 7) 山村一繁、神田 順：引越し時積載荷重に関する調査・研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造I、pp.211-212、1992年8月
- 8) Jun Kanda and Kazuya Kinoshita, "A Probabilistic Model for Live Load Extremes in Office Buildings, Structural Safety and Reliability, Proc. of ICOSSAR'85, Vol.II, pp. 287-296, 1985
- 9) 石川孝重、久木章江：積載荷重の偏在が評価値に及ぼす影響に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造I、pp. 217-218、1992年8月
- 10) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説、1993年6月
- 11) A.P.ルジャーニツイン：「構造物の信頼性解析」、丸善、1980.
- 12) Jong-Cherng Peir and C. A. Cornell, "Spatial and Temporal Variability of Live Loads", Journal of the Structural Division, ASCE, Vol.99, No. ST5, pp. 903-922, May, 1973

(1995年4月10日原稿受理、1995年8月16日採用決定)