

客電車車体の強さに及ぼす部材剛度の配置の影響

The Effect of Bending Rigidity of Structural Members on the Strength of Car Body.

飯 島 弘*
Hiroshi Iijima

内 容 梗 概

車体の側構を構成する上下、柱の三主部材相互の剛度変化が側構の曲げ強さに及ぼす影響を求めるため、側構を簡単なラーメンに置換えて通常の撓角法により数値計算を行つた。その際、支点外に張出部を有する場合への理論の拡張を行つた。得られた結果から、ラーメン節点に作用するモーメントと力の増減やそれらの最大値の生ずる位置、撓みの変化などの総合的傾向を知ることができた。特に側構の働きと曲げ剛性の向上のためには、柱の剛比を $\beta=0.01$ 附近に選ぶことが有利のようである。これらの結果は実際の複雑な側構の合理的な部材剛度の配置を知る上に役立つものと考えられる。

〔I〕 緒 言

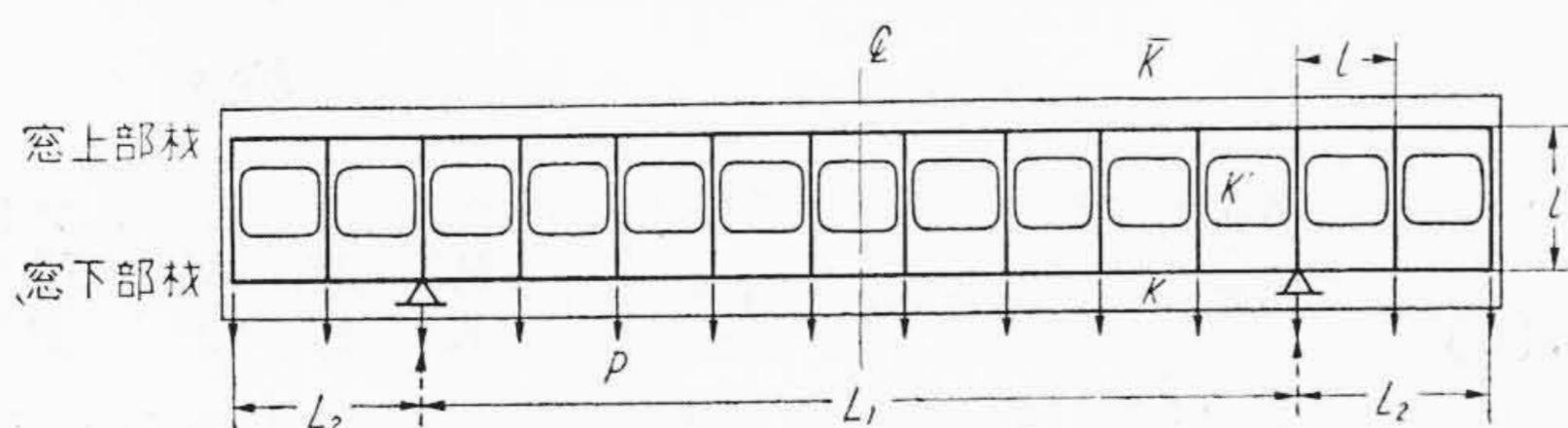
客電車の車体構造のうちで強度部材として働く側構は、窓を挟む上、下縦通材を柱部材で結合した枠組構造物と考えられる。これら三主部材の剛度は相関連して側構の強さを左右するので、剛度の配置が側構に及ぼす影響を総合的に把握することは、車体の合理的な構造を得る上に是非必要なことである。それにもかかわらずこの種の試みがあまりなされていないのは、高次不静定である側構の合理的な解析法の欠如と煩雑な数値計算の必要によるものである。筆者はさきに、一連の解析法を提示して、これが実験結果とよく一致することを確かめた⁽¹⁾が、前述の総合的な傾向を知るといふ目的に重点をおいて、側構を簡単なラーメン模型に置き換え、かつその解法を通常の撓角法に依存して数値計算を行い、部材相互の剛度が側構の曲げ強さに及ぼす影響につき検討した。

〔II〕 計算の方法

(1) 仮定

車体は通常窓部、出入口附近、車体端部で構造を異にするが、緒言に述べた目的に沿つて、ここでは簡単のためつぎの仮定をおく。

- (1) 出入口を無視し、全体を窓部の連続とみなす。
- (2) 窓上、窓下、柱各部材は側構の長さに沿つてそれぞれ一様な剛度、部材長をもつものとする。
- (3) 床上荷重はその半分が窓下部各節点に一様な集



第1図 鋼体を置換したラーメン

中荷重として働く。

- (4) 側構を部材それぞれの中立軸位置を結合してできるラーメンに置き換える。したがつて部材の結合度は剛度の中に含めて処理できるものとする。

これらの仮定にもとづいて、側構を第1図の太線で示したようなフィレンディールラーメンとして取扱う。

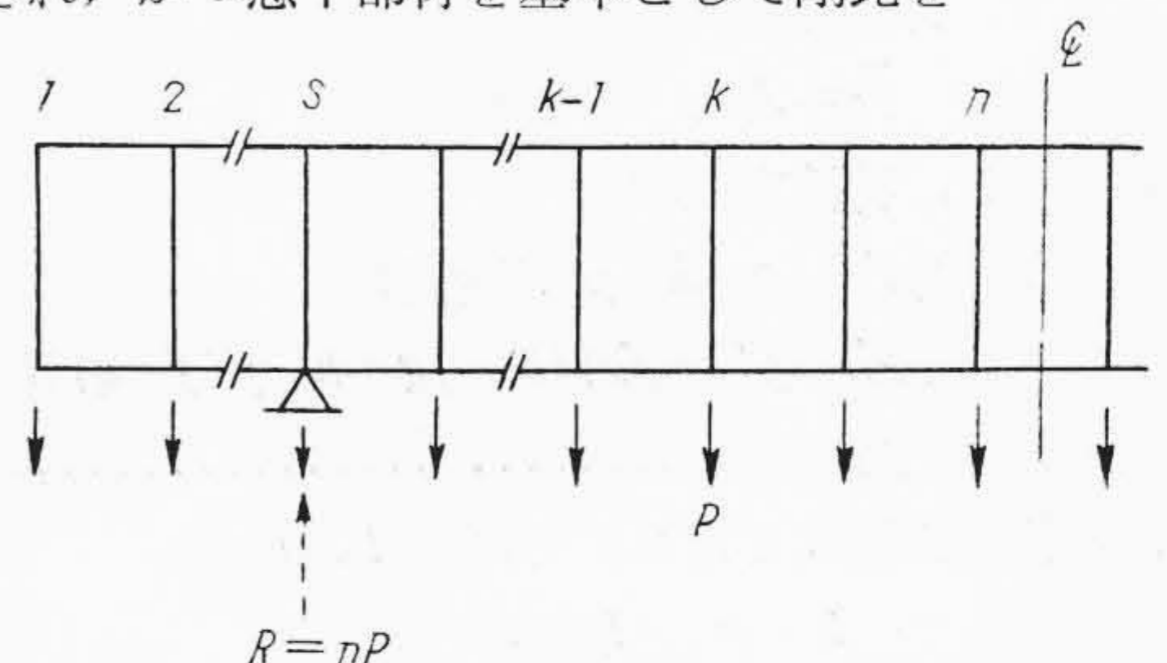
筆者の提示した解析法から出入口の形状を考慮した補正法を除けば、計算結果は通常の撓角法による林教授の方法⁽²⁾と一致する。複雑な側構の形を上述の仮定によつて単純化したラーメンに対しては撓角法でも差支えないので、本文ではこれを用いることにする。ただし林教授の論文は側構が車体端部で支えられている特殊な場合のみを取扱つているので、以下に第1図のように支点外に任意の長さの張出部を有するラーメンの一般的な場合まで理論を拡張した。

(2) 理論の拡張

節点数 $2n$ 、張出部の節点数 s なる第2図のようなラーメンを考える。各節点に働くモーメント、剪断力、軸力を第3図のようにそれぞれ $M, V, H (N)$ で、また節点回転角と部材回転角を ϕ, τ で表わす。任意節点 k においては suffix k を、窓上および柱部材には bar と dash をつける。そのほかの記号は第1~3図のとおりである。部材剛度は

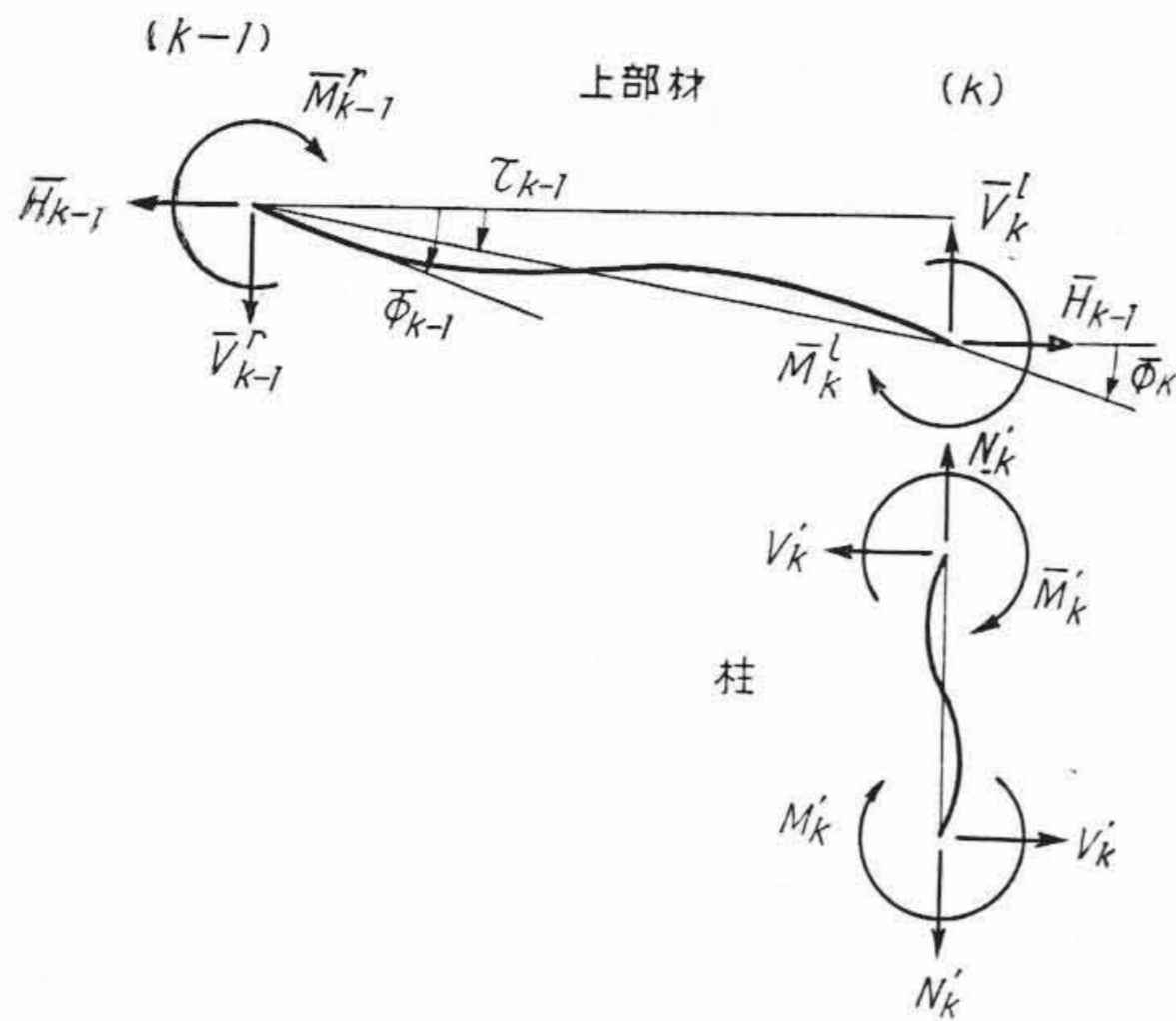
$$K = \frac{EI}{l} \quad \begin{array}{l} I: \text{部材の断面二次モーメント} \\ E: \text{ヤング係数} \end{array}$$

で表わされ、かつ窓下部材を基準として剛比を



第2図 節点番号

* 日立製作所笠戸工場



第 3 図 記 号

$$\alpha = \frac{\bar{K}}{K}, \quad \beta = \frac{K'}{K}$$

で与える。撓角法では M, V は ϕ および τ で表わされるので、節点のモーメントの均合による節点方程式と断面の垂直力の均合による層方程式を求めれば、第 2 図のラーメンにおいてはつぎの階差方程式が導かれる。

$$\bar{\phi}_{k-1} + f\bar{\phi}_k + \bar{\phi}_{k+1} = \phi_{k-1} + g\phi_k + \phi_{k+1} \dots\dots\dots (1)$$

$$\left. \begin{aligned} \bar{\phi}_{k-1} + h\bar{\phi}_k + \bar{\phi}_{k+1} - p(\phi_{k-1} + q\phi_k + \phi_{k+1}) \\ = (1-2k)rP \dots\dots k < s \\ = (n+1-2k)rP \dots\dots k = s \\ = (2n+1-2k)rP \dots\dots k > s \end{aligned} \right\} \dots\dots (2)$$

ここに

$$\left. \begin{aligned} a = \frac{\alpha}{2(1+\alpha)}, \quad b = \frac{1}{2(1+\alpha)}, \quad c = \frac{l}{12K(1+\alpha)} \\ f = 4 + 2\frac{\beta}{\alpha} - \beta, \quad p = \frac{3b}{1-3a} \\ g = 4 + 2\beta - \frac{\beta}{\alpha}, \quad q = 2 - \frac{\beta}{3b\alpha} \\ h = \frac{4 + 2\frac{\beta}{\alpha} - 6a}{1-3a}, \quad r = \frac{3c}{1-3a} \end{aligned} \right\} \dots\dots (3)$$

上の係数のうち、 c, r 以外はすべて α, β のみの函数である。(1) (2) 式を連立し、対称条件と端部条件によつて $\bar{\phi}, \phi$ を求めることができる。ただし一般解は (1) (2) 式の斉次方程式の解と非斉次方程式の特解との和として得られる。

まず、斉次方程式の解を

$$\bar{\phi}_k = At^k, \quad \phi = Bt^k$$

とおくと、特性方程式は

$$\begin{aligned} (1-p)t^4 + \{g+h-p(f+g)\}t^3 \\ + \{2+gh-p(2+fg)\}t^2 + \{g+h-p(f+q)\}t \\ + (1-p) = 0 \dots\dots\dots (4) \end{aligned}$$

なる相反方程式となり、その根 t_1, t_2 を

$$t_1 = e^\lambda, \quad t_2 = e^\mu$$

で表わす。そのときは

$$\left. \begin{aligned} F(\lambda, k) &= \frac{sh(m-k)\lambda - sh k \lambda}{sh m \lambda} \\ F(\mu, k) &= \frac{sh(m-k)\mu - sh k \mu}{sh m \mu} \end{aligned} \right\} (m=2n+1) \dots\dots (5)$$

とおくと斉次方程式の解は

$$\left. \begin{aligned} (\bar{\phi}_k)_h &= A_1 F(\lambda, k) + A_2 F(\mu, k) \\ (\phi_k)_h &= \gamma_1 A_1 F(\lambda, k) + \gamma_2 A_2 F(\mu, k) \end{aligned} \right\} \dots\dots (6)$$

$$\text{ただし} \quad \gamma_1 = \frac{1+ft_1+t_1^2}{1+gt_1+t_1^2}, \quad \gamma_2 = \frac{1+ft_2+t_2^2}{1+gt_2+t_2^2}$$

つぎに、非斉次方程式の特解は支点内外で異なり、各節点についてつぎのようになる。

$$\left. \begin{aligned} k \geq s \quad (\bar{\phi}_k)_p &= c_1(m-2k)rP \\ &(\phi_k)_p = c_2(m-2k)rP \\ k = s-1 \quad (\bar{\phi}_k)_p &= \left\{ \frac{n}{p-1} + c_1(m-2k) \right\} rP \\ &(\phi_k)_p = \left\{ \frac{n}{p-1} + c_2(m-2k) \right\} rP \\ k = s-2 \quad (\bar{\phi}_k)_p &= \left\{ \frac{n}{p-1}(c_3-f+g) \right. \\ &\quad \left. + c_1(m-2k) \right\} rP \\ &(\phi_k)_p = \left\{ \frac{n}{p-1}c_3 + c_2(m-2k) \right\} rP \end{aligned} \right\} \dots\dots (7)$$

$k = s-3$ 以下は略す。ここに

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{2+g}{(2+h)(2+g)-p(2+f)(2+q)}, \\ c_2 &= \frac{2+f}{(2+h)(2+g)-p(2+f)(2+q)}, \\ c_3 &= \frac{h-pq-f+g}{p-1} \end{aligned}$$

$$\text{結局、解は} \quad \left. \begin{aligned} \bar{\phi}_k &= (\bar{\phi}_k)_h + (\bar{\phi}_k)_p \\ \phi_k &= (\phi_k)_h + (\phi_k)_p \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

で与えられる。未定定数 A_1, A_2 は $k=1$ における節点方程式から求めた端部条件の式

$$\left. \begin{aligned} \left(h - \frac{2-3a}{1-3a} \right) \bar{\phi}_1 + \bar{\phi}_2 + p(1-q)\phi_1 - p\phi_2 &= -rP \\ (2+f)\bar{\phi}_1 + \bar{\phi}_2 &= (2+g)\phi_1 + \phi_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots (9)$$

に (8) 式を代入することによつてきまる。

$\bar{\phi}, \phi$ が求まれば、層方程式によつて τ および側構の撓み δ は次式のように得られる。

$$\left. \begin{aligned} \tau_k &= a(\bar{\phi}_k + \bar{\phi}_{k+1}) + b(\phi_k + \phi_{k+1}) - kcP \\ \delta_k &= l \sum_{i=1}^{s-1} \tau_i \quad k < s \\ \tau_k &= a(\bar{\phi}_k + \bar{\phi}_{k+1}) + b(\phi_k + \phi_{k+1}) + (n-k)cP \\ \delta_k &= l \sum_{i=s}^{k-1} \tau_i \quad k \geq s \end{aligned} \right\} \dots\dots (10)$$

各節点に働く $M, V, H (N)$ などは力およびモーメントの均合から求まる。しかして、 $\delta_k / \frac{Pl^2}{K}, \frac{M_k}{Pl}, \frac{V_k}{P}, \frac{N_k}{P}, \frac{V'_k}{l}, \frac{H_k}{l}$ はいずれも無次元数であつて、 α, β, n, s の函数になる。したがつてスパン数 n, s を一定にすれば部材の剛比 α, β のみの函数として得られる。

〔III〕 数値計算

郊外電車級の側構の支点間スパン数は9スパン相当が多いので、ここでは9スパンとした。 α, β および張出部の割合 $\xi = \frac{L_2}{L_1}$ には実際の設計例を考慮して下記の範囲を与えて計算した。

$$\alpha = 0.2 \quad 0.4 \quad 0.8$$

$$\beta = 0.0005 \quad 0.005 \quad 0.0167 \quad 0.05 \quad 0.167 \quad 0.5$$

$$\xi = 0 \quad \frac{1}{9} \quad \frac{2}{9} \quad \frac{3}{9}$$

その結果の一部を第4図、第5図に示す。第4図は支点外2スパン張出し ($\xi = \frac{2}{9}$) の場合の α, β の影響を、第5図は張出しスパン数の影響を示すために $\alpha = 0.4, \beta = 0.005$ のみについてまとめたものである。

〔IV〕 節点に働く力に及ぼす影響

変数 α, β, ξ が節点のモーメントおよび力の大きさに及ぼす影響を計算結果から検討して、下記の傾向を知

る。

(1) 柱の強化による影響 (β の影響)

- (i) 柱の剛性の増大により V' が増して上下材の軸力 H が大きくなり、荷重による外部曲げモーメントに抵抗すべきモーメント HV' が増す。その結果上、下の曲げモーメント \bar{M}, M は減少し、かつ一様化する。
- (ii) 柱の軸力 N' が増して荷重を上部材に伝え、 V と \bar{V} の差が少くなる。
- (iii) 柱の曲げモーメント M' が増し、かつ支点位置よりも内寄りの柱で最大になる。
- (iv) 中央の M, \bar{M} が減つて支点で増し、最大モーメントが支点に生ずるようになる。

(2) 上部材の強化による影響 (α の影響)

- (i) \bar{M} が大きくなつて M に近づき、 HV' が減る。
- (ii) \bar{V} が増して荷重は上部材に伝わる。
- (iii) 柱の M', V' ともにかえつて減り、柱は相対的に弱まる。



第4図 2スパン張出しの場合の α, β による変化

(iv) β の変化で生じたような最大値の位置の移動はない。

(3) 張出しスパン数増加の影響 (ξ の影響)

(i) 全荷重が増すので, V, N' は当然大きくなるが, そのほかの力, 特に曲げモーメントは減少する。

(ii) 最大曲げモーメントの生ずる位置の移動は β の場合と同様である。

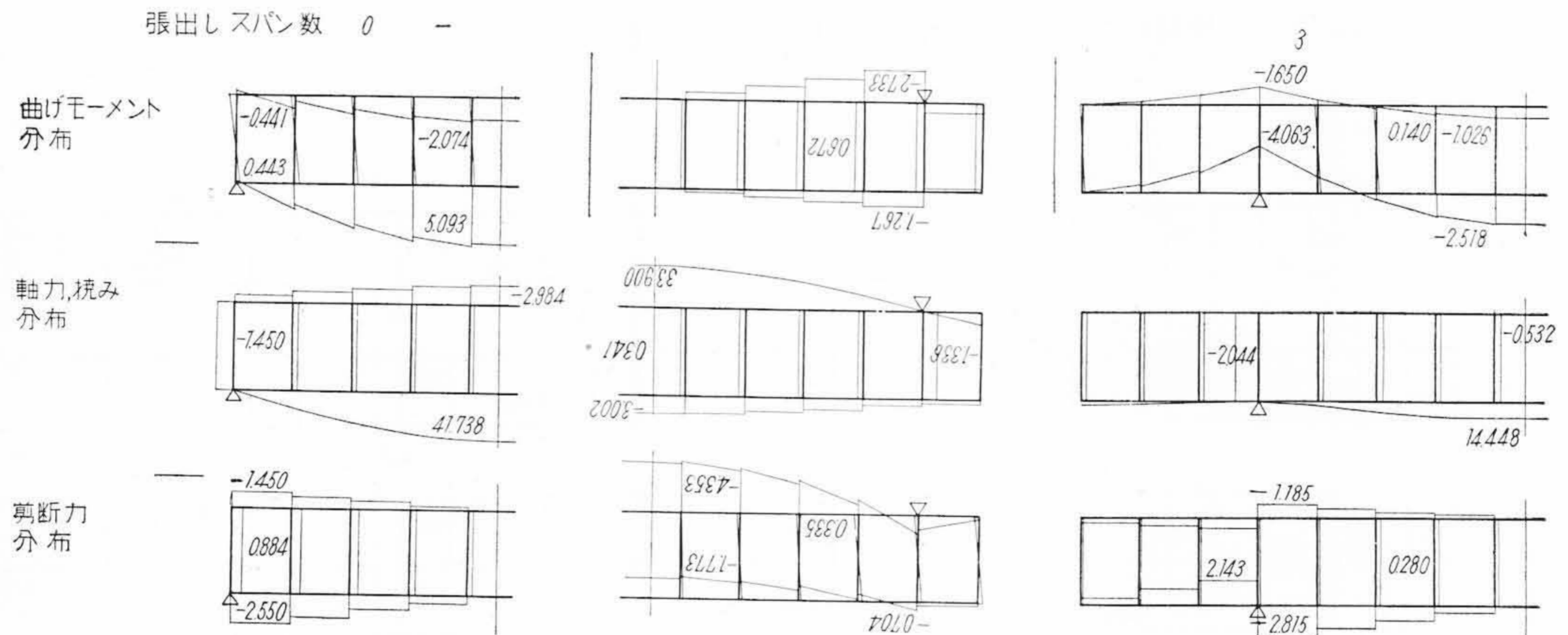
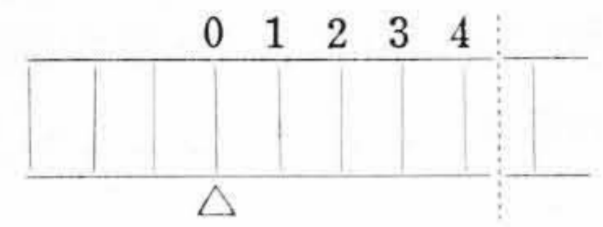
(iii) 柱の V', M' の最大値は支点から内へ移動する。

そのほか各ラーメンに共通して上下部材の剪断力と柱の軸力は支点で最大になる。したがって支点上の柱とその内寄りの外板について挫屈を考慮する必要がある。上に述べたことを一括すると第 1 表のようになる。

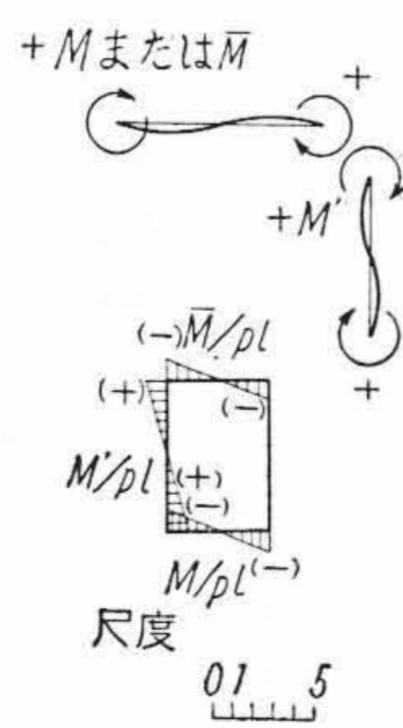
第 1 表 α, β, ξ の増加による力の変動

モーメント, 力		\bar{M}	M	\bar{V}	V	N'	M'	V'	H
増減の傾向	β	↘	↘	↗	↘	↗	↗	↗	↗
	α	↗	↘	↗	↘	↗	↘	↘	↘
	ξ	↘	↘	↘	↗	↗	↘	↘	↘
最大値の位置		0	4.0	4.3		0	0.1	0	4
		1/9	4.0	4.0		0	0.1	0.1	4
		2/9	4.0	4.0		0	1	1	4
		3/9	0	0		0	2	2	4
			中央又は支点		支 点				中央

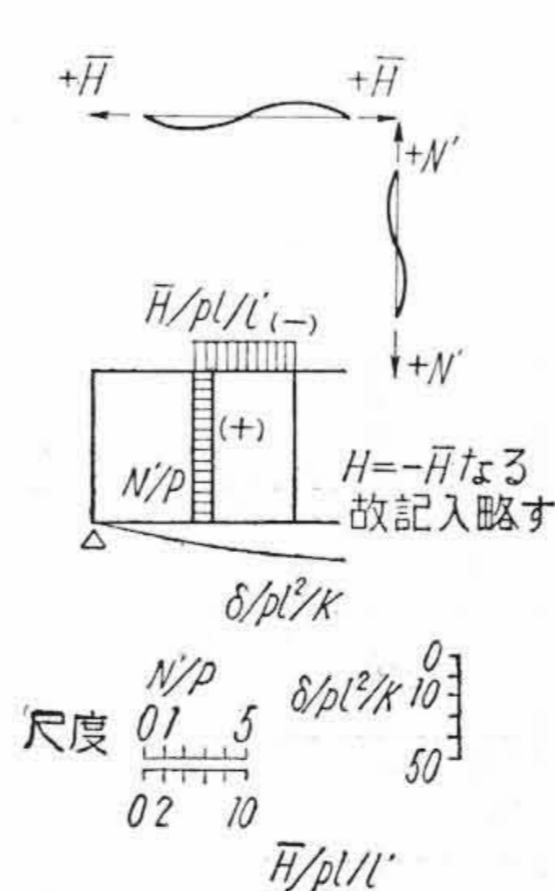
〔備考〕 ↗増加, ↘減少
最大値の節点番号は右図のとおり。
4.0 は β ↑ につれて 4 から 0 へ移る意。



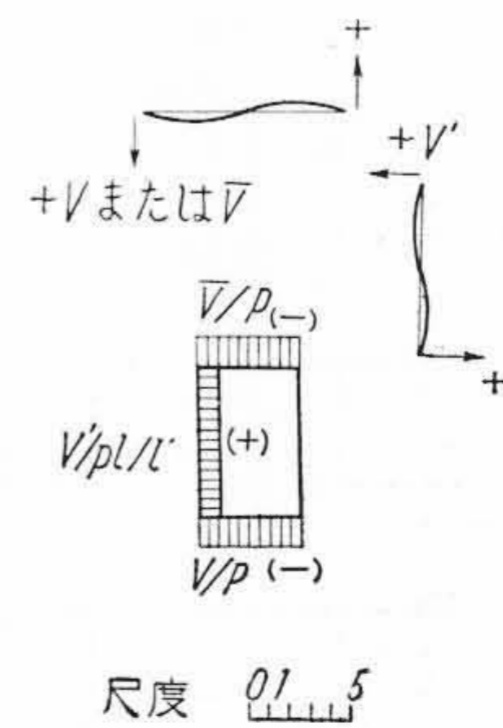
(備考) 曲げモーメント



軸力, 撓み



剪断力



第 5 図 張出しスパン数による変化
($\alpha=0.4$ $\beta=0.005$ の場合)

〔V〕 柱の結合作用

外部荷重が側構に与える曲げモーメント M_{ext} は、側構内部では上下部材の曲げモーメントと軸力の作る偶力とによつて受持たれる。節点の右側でこれを表わすと

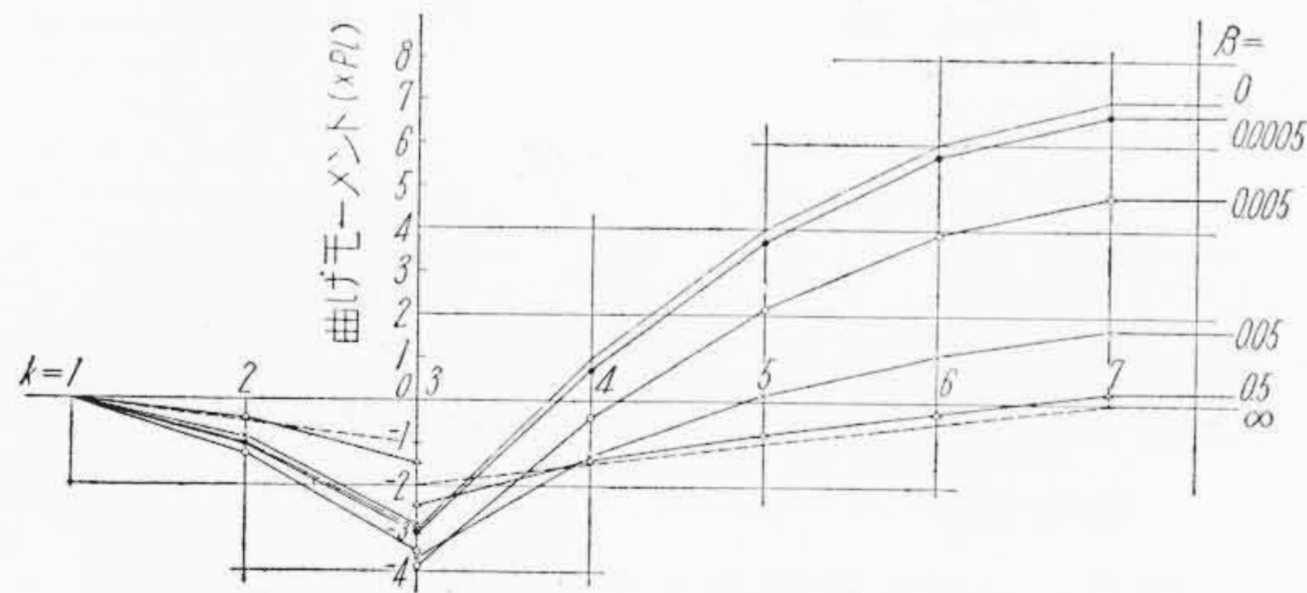
$$M_{ext} = \bar{M}_k^r + M_k^r + H_k l' \dots\dots\dots (11)$$

柱が極端に弱い場合には側構は重ね梁に近づき、 M_{ext} の大部分を上下部材の曲げモーメント ($\bar{M}_k^r + M_k^r = M_{int}$ とおく) のみで均合うようになり、ラーメンとしての働きが失われてくる。したがつて $H_k l'$ の割合が大きい程側構の働きがすぐれると云える。

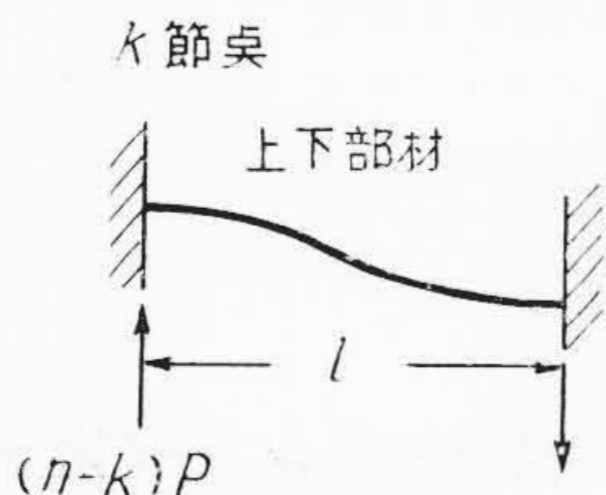
柱の剛度による M_{int} の変化を2スパン張出し、 $\alpha=0.4$ の場合を例にとつて示すと第6図のようになる。ただし、張出部節点では \bar{M}_k^l, M_k^l をとつた。この図から、 β が大きくなるにつれて M_{int} の割合が減少することがわかる。柱が極端に強い場合 ($\beta=\infty$) には k 節点の曲げモーメントは第7図から (モーメントの符号は第3図による)

$$(M_{int}^r)_\infty = -\frac{(n-k)Pl}{2}$$

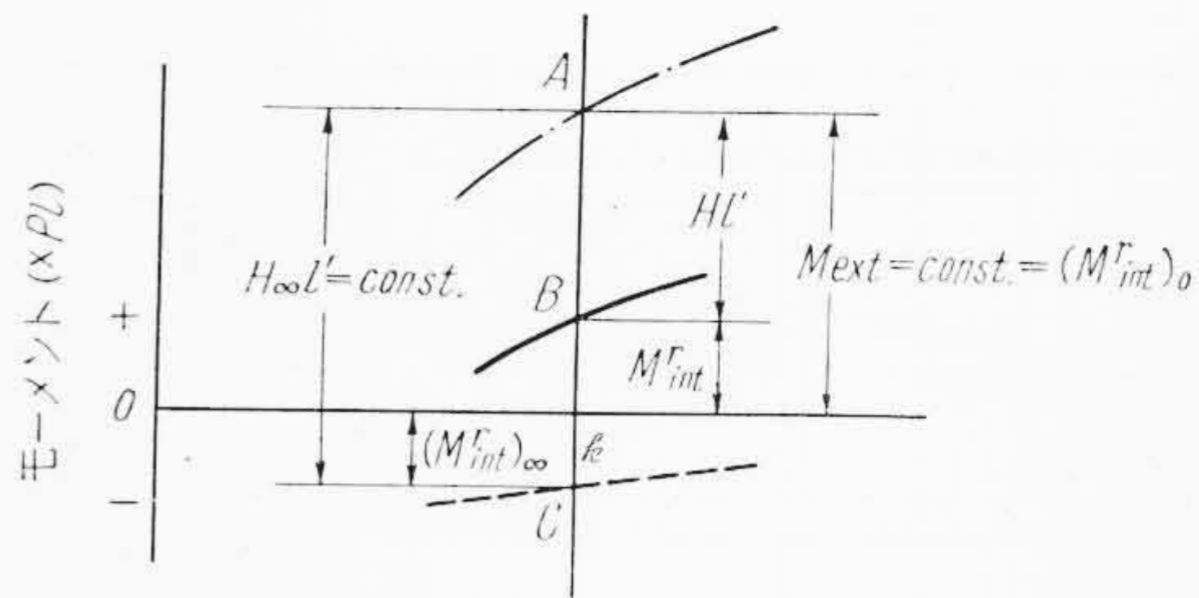
第6図にはこれを点線で示した。(11) 式の関係を図解すると第8図のようになる。すなわち B 点は $\beta=0$ で A に一致し、 β の増加と共に下つて $\beta=\infty$ の時 C にくる。したがつて柱の結合作用の程度は $\frac{H l'}{H_\infty l'}$ で表わすことができる。第9図は支点を除く中間節点でのこの値の平均を、2スパン張出しの場合と $\alpha=0.4$ とを例として示したもので、 β の両極端において0と1に漸近し、その途中の $\beta=0.001\sim 0.1$ の範囲で曲線の変化が急になっている。変曲点は $\beta=0.01$ 附近にあり、柱の重量増加



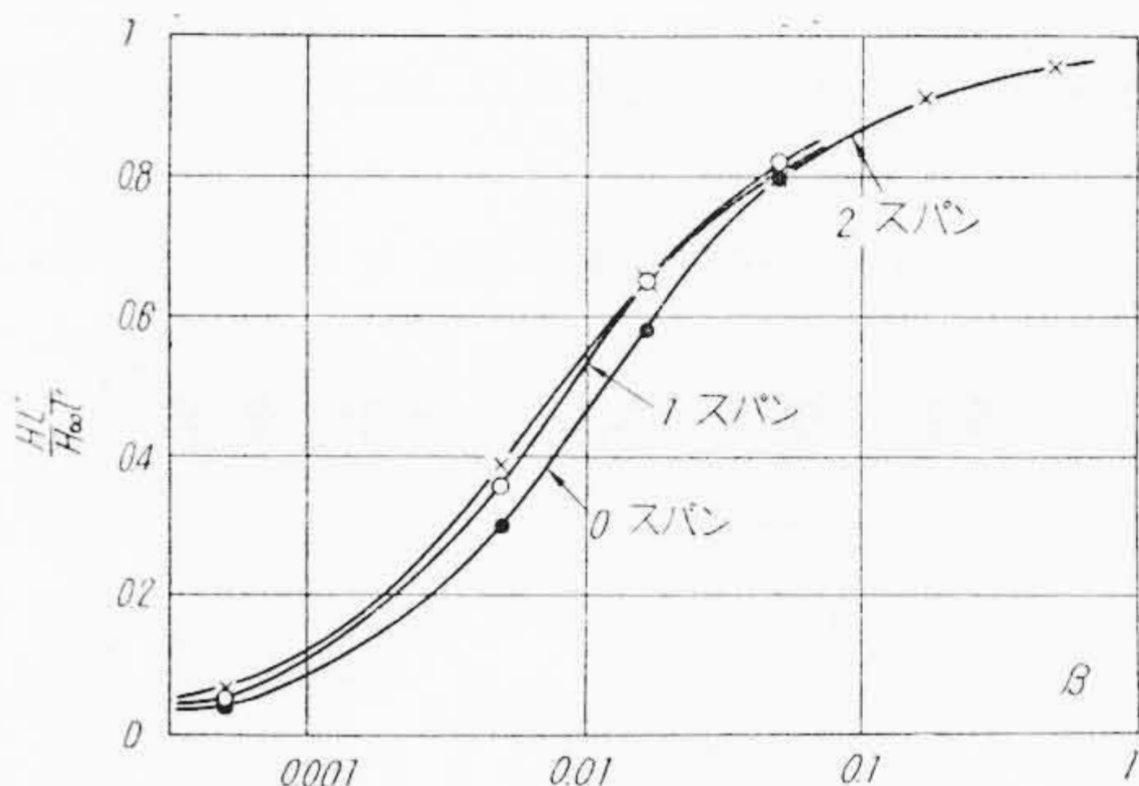
第6図 外部モーメントとの均合 ($\alpha=0.4$)



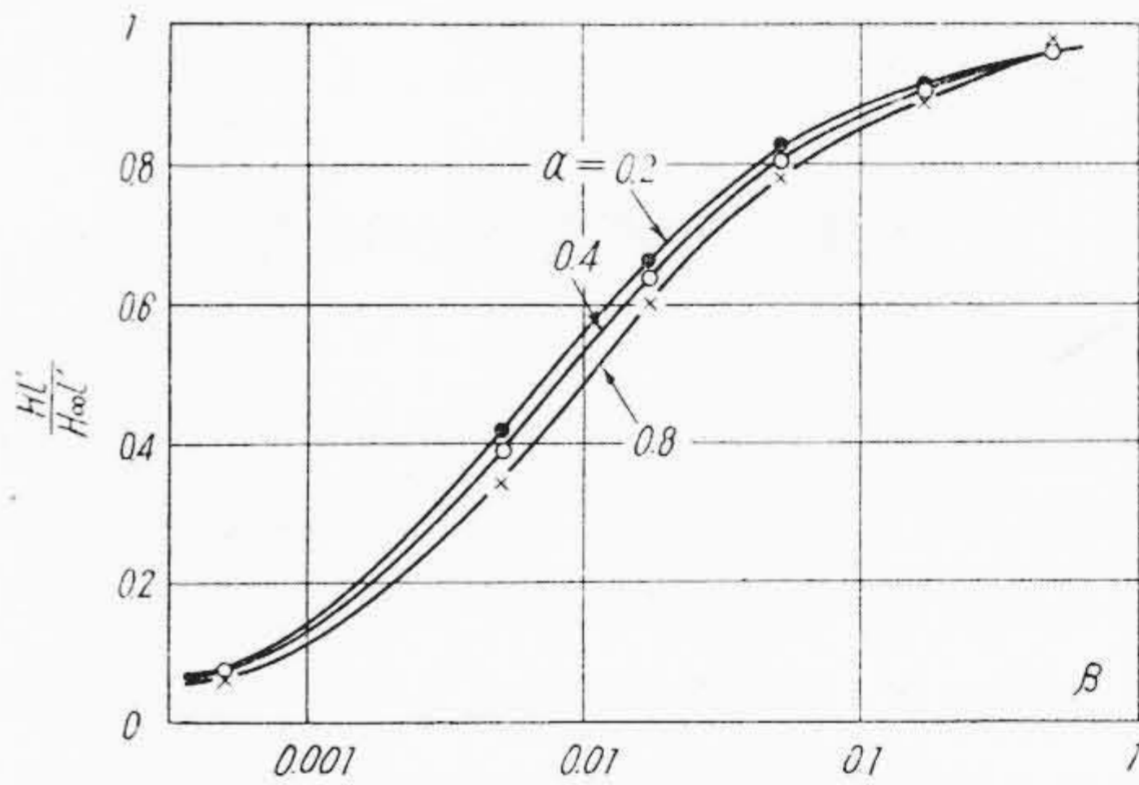
第7図 柱 $\beta=\infty$ の場合



第8図 外部モーメントとの均合

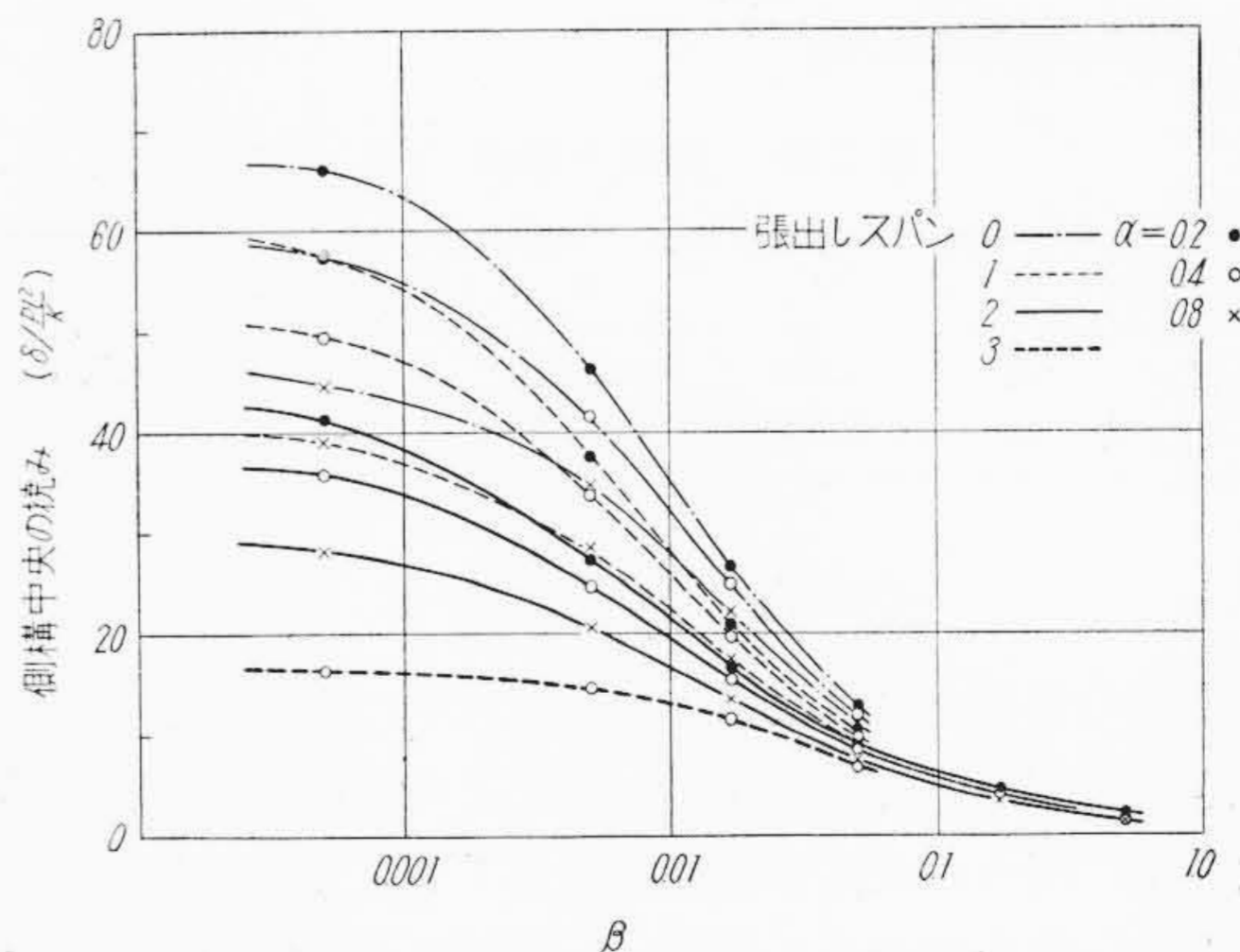


(a) $\alpha=0.4$ の場合

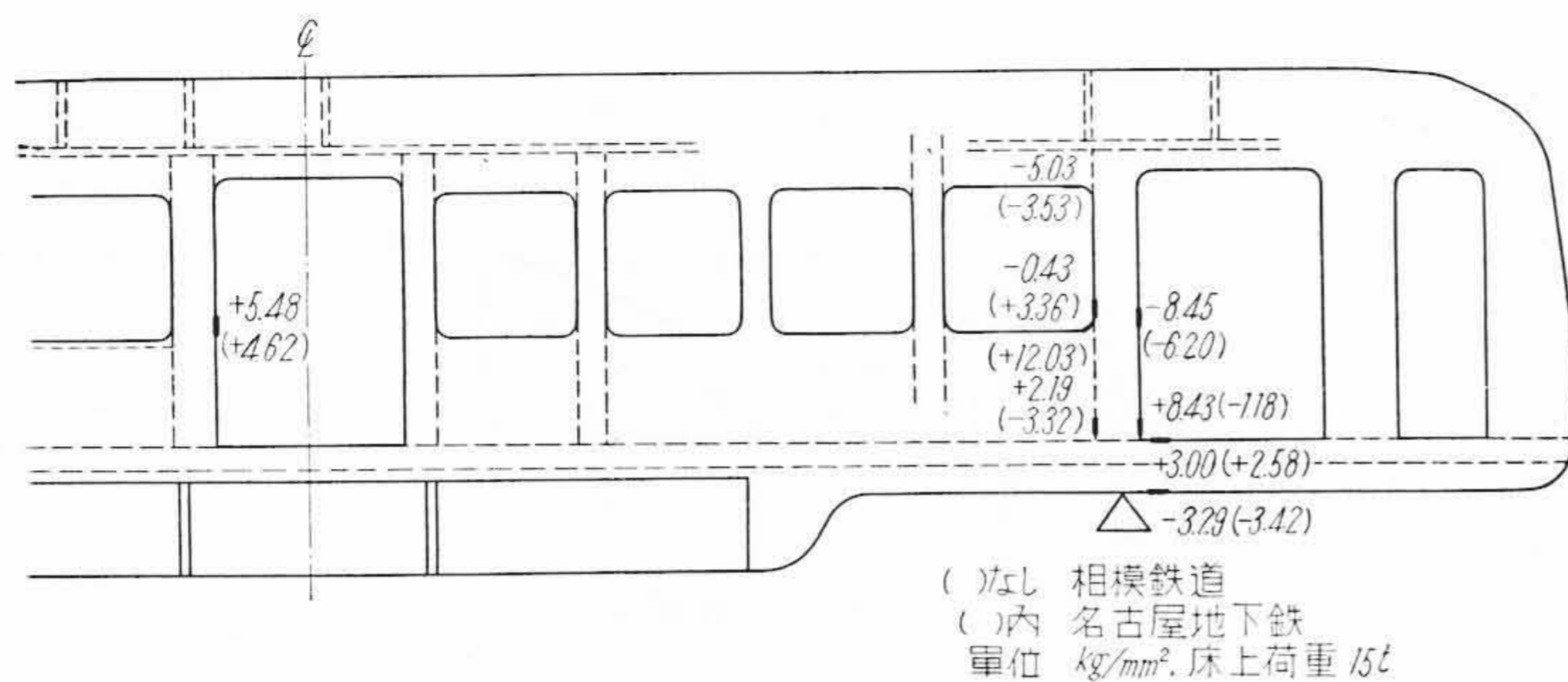


(b) 2スパン張出しの場合

第9図 軸力によるモーメントの割合



第10図 側構中央の撓み変化



第11図 現車の応力測定値例

を考慮すれば、 β をこの変曲点以下に抑えた方が有利であろう。

また、 α を増すと柱の効果が悪くなることがわかる。

〔VI〕 側構の撓みに及ぼす影響

ラーメン中央の垂直変位を第4,5図からまとめると第10図のようになる。変数の増加によつて撓みが減少する。 β による変化は第9図の傾向と一致し、変曲点も同様である。また α 小なる程 β による撓み減少の割合は大きいので、上部材の弱いときは柱強化の効果が著しい。なお、撓みは K の値にも依存することを注意しておく。

〔VII〕 現車実験との比較

第1表からわかるように、モーメントと力の最大値は支点附近に生ずる。このことは、現車の応力測定例として第11図に示した相模鉄道⁽³⁾、名古屋地下鉄の結果において、比較的大きな応力の箇所が支点附近に集つてゐることと一致する。図には両車体とも約150箇所の測定値のうちから比較的大きなものだけを記してある。第2表は窓部の α 、 β を示したもので、両者とも β は第9,10図の変曲点 $\beta=0.01$ に近い。

支点の内隣りのスパンには最大剪断力が働き、窓隅には大きな応力が発生するので、応力集中を緩和する処置が必要である。

第2表 側構の剛比の例

車種	α	β	全長(m)	ξ
相模	0.094	0.0077	17	0.273
名古屋	0.157	0.0062	15	0.25

〔VIII〕 結 言

車輛の側構を簡単なフィレンディール・ラーメンに置き換えて、部材配置 α 、 β および支点外張出の割合による力、撓みの変化を数値計算して下記を知つた。

- (1) 柱を強めると荷重は上部材によく伝わり、上下部材の曲げモーメントが減少して全節点のモーメン

ト一様化が得られる。また側構中央の曲げモーメントが減つて最大値が支点に生ずるようになる。

- (2) 側構の働きは柱の強化と共に増し、 $\beta=0.001\sim 0.1$ の範囲で急激に大きくなる。重量増加を考慮すれば、柱の剛度を $\beta=0.01$ 附近に選ぶのが有利であると思われる。一方窓上部材の強化はこの柱の効果を弱める。

- (3) 柱の曲げモーメント、剪断力は、張出部の増加につれて支点よりむしろ内寄りの柱で最大になる。

- (4) 側構の撓みは部材の強化、張出部の増加により減少する。 β によるその変化は上述の側構の働きと同傾向で、 $\beta=0.01$ 附近が側構の曲げ剛性向上に有利のようである。

- (5) 実際の車体に生ずる最大応力の箇所が支点附近に集つてゐることは、この計算結果と一致する。

以上の結果は、部材配置が実際の複雑な側構の強さに及ぼす影響を総合的に知る上に役立つものと考えられる。

終りに、有益なご助言をいただいた九州大学石橋教授、多数の数値計算を遂行された日立製作所笠戸工場永弘、今村両氏に深く感謝の意を表す。

参 考 文 献

- (1) 飯島、永弘、伊藤：機械学会第34期通常総会講演会前刷第3室 61 (昭32-4)
- (2) 林：機械学会論文集 20, 201 (昭29-3)
- (3) 飯島、永弘：日立評論 38, 933 (昭31-7)

日 立 造 船 技 報

Vol. 18

No. 2

目 次

- ◎隔壁構造の強度
- ◎流電陽極による防食法の研究
- ◎小形艦艇用ウインドラスの軽量化および非磁性化について
- ◎ディーゼル機関のクランク軸の強度に関する研究
- ◎特殊型給排気用通風筒および機動用通風筒の性能に関する研究
- ◎T-2タンカー“スタンバック・シドニー号”の貨物油倉内船殻構造の取替えについて
本誌につきましての御照会は下記発行所へ御願致します。

日立造船株式会社技術研究所

大阪市此花区桜島北之町60