

I-28 最適設計による荷重分配横桁の設計法について

室蘭工業大学 正員 杉本博之

1. まえがき

非合成のプレートガーダー橋の設計を、床版と鋼桁の設計に分けて考えると、支持桁間の不等沈下を考慮しなければ、両者はそれぞれ独立に設計することができる。しかし、鋼桁はたわみやすいものであるから、不等沈下は発生しており、本来、床版、鋼桁の相互作用を考慮して設計すべきと思われる。

床版-鋼桁系の設計を考える時、不等沈下により生ずる付加モーメントに抵抗する剛性の、床版、鋼桁への配分率を決定しなければならない。鋼桁を、不等沈下に関わりなく設計し、その結果生ずる付加モーメントは、床版の設計で考慮することもできるし、鋼桁の設計に不等沈下量に関する制約を加え、床版の支持条件を、設計モーメント式の誘導の仮定に近づける方法もある。現行の道路橋示方書（昭和55年制定、以下道示）では、床版の設計モーメントは、理論値の10~20%高い値とし、鋼桁においても、たわみ制限、剛な荷重分配横桁の設置等を規定している。床版の設計モーメントの余裕は、不等沈下の影響や施工誤差等を考慮したものであり、床版の置かれている過酷な条件を考慮すると、必ずしも余裕とはみなせない。結局、現行の道示は、鋼桁に剛性を配分する後者の考えかたを取っているようである。これは、設計の簡便さと、床版、鋼桁のそれぞれの条件の差を考慮すると、妥当なように思われる。しかし、道示では剛性の具体的内容として、格子剛度を10より大きく取るように指導しているが、これはより検討する必要があるように思われる。

そこで本報告では、従来すでに1)部を発表している3本主桁の他に、4本主桁のプレートガーダー橋の床版-鋼桁系の設計に最適設計法を応用し、その結果より荷重分配横桁の設計を考察したものである。このような問題に最適化手法を応用することにより、安全性のみならず経済性を考慮した検討が可能となる。

2. 構造モデル及び解析

本報告で設計の対象とした構造モデル及び解析法を以下に説明する。

2-1 プレートガーダー橋

本報告で設計の対象としたプレートガーダー橋は、図-1、2に示す3本主桁及び4本主桁の上路橋であり、それぞれ1横桁を有する。床版は鉄筋コンクリートである。主桁は中、外桁とも、そ

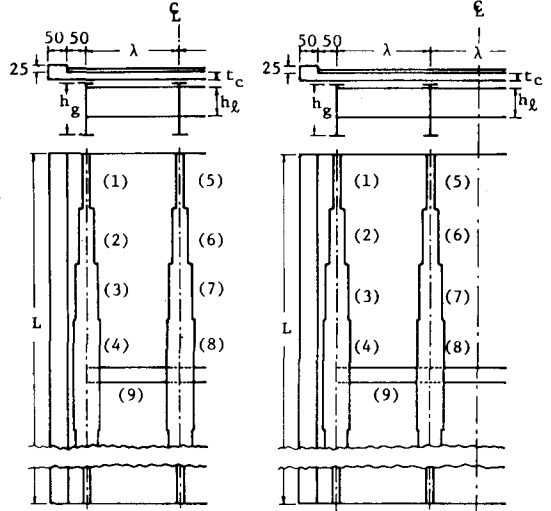


図-1 3本主桁

図-2 4本主桁

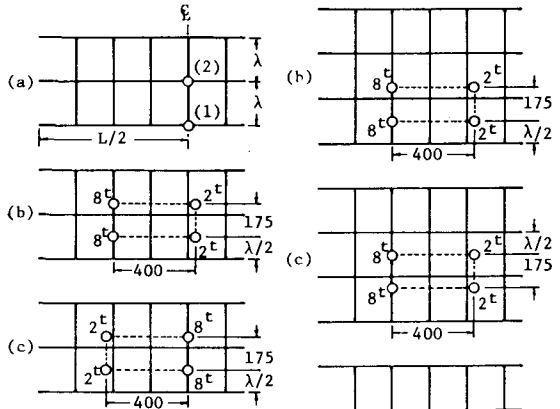


図-3 3本主桁の荷重系

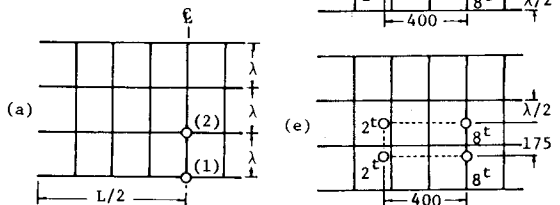


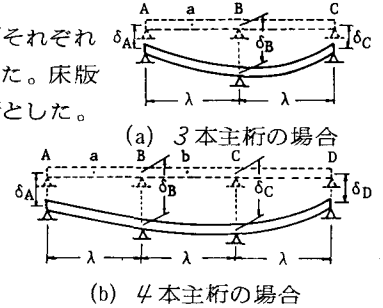
図-4 4本主桁の荷重系

それぞれの部材長が L/δ の変断面桁であり、部材番号を図に示した。

2-2 構造解析

荷重分配率、相対変位量を求める計算は、図-1、2を格子桁（それぞれ40部材、27節点、56部材、36節点）と考える変位法による。床版も荷重分配作用を分担すると考え、支間を δ 等分しそれぞれを横桁とした。主桁、横桁のねじり剛性は無視した。

荷重系を図-3、4に示した。○印の位置にそれぞれ集中荷重が載荷される。それぞれ、(a)は荷重分配率を求めるための荷重（ L 荷重）で、(1)、(2)にそれぞれ単位荷重を載荷する。(b)、(c)あるいは(b)、(c)、(d)、(e)は、それぞれ相対変位量を計算



するための荷重（ T 荷重）である。相対変位量は、 $L/4$ 、 $L/2$ 図-5 付加モーメントの計算の2点で求めているので、それぞれに後輪荷重が載るように、また、支間直角方向では、 $L/4$ 後輪荷重が主桁間の中央に載るように考慮した。変位法による解析では、それぞれの輪荷重を近傍の節点に比例配分している。

このようにして得られた不等沈下量より、支持桁間の中央で付加曲げモーメントを計算した。図-5を参照すると、それぞれ次式で計算される。

3本主桁の場合

$$M_a = \frac{3}{4} \frac{EI}{\lambda^2} (2\delta_B - \delta_A - \delta_C) \quad (1)$$

4本主桁の場合

$$M_a = \frac{1}{5} \frac{EI}{\lambda^2} (-4\delta_A + 9\delta_B - 6\delta_C + \delta_D) \quad (2)$$

$$M_b = \frac{3}{5} \frac{EI}{\lambda^2} (-\delta_A + \delta_B + \delta_C - \delta_D)$$

ここで、 EI は、単位幅当りのコンクリート床版の曲げ剛性である。ヤング係数比は7としている。

3. 最適設計

本報告の最適設計は、図-1、2に示す9部材の断面を決定するわけであるが、各断面は、図-6に示すように、上下・左右対称断面とする。その結果、設計変数は、各断面のフランジ幅および主桁腹板高となる。板厚は、次式で計算されるものとする。

$$\text{腹板厚} : t^w = \max(0.9, h/k) \quad (3)$$

$$\text{フランジ板厚} : t = \max(0.9, 1.2(b-t^w)/32) \quad (\text{cm})$$

上式において、 k は、腹板に水平補剛材が1本ある場合の最小腹板厚を求めるための常数で、各鋼材毎に道示に規定されている。

横桁腹板高、床版厚および主桁の鋼材は、パラメーターとして与えて検討した。

3-1 制約条件式

制約条件式は、道示等により以下になる。

$$(\text{主桁}) \quad b_i \geq \max(20, 0.2 \cdot h_g) \quad (\text{cm}) \quad \{ (i=1, 8) \}$$

$$\sigma_i \leq \sigma_{ta,i}$$

$$\delta_g^1 \leq \delta_a$$

$$\delta_g^2 \leq \delta_a$$

(4)

$$(\text{横桁}) \quad b_g \geq \max(20, 0.2 \cdot h_g) \quad (\text{cm})$$

$$\sigma_g^+ \leq \sigma_{ca,g}$$

$$\sigma_g^- \leq \sigma_{ca,g}$$

以上で、 σ_i ($i=1 \sim 8$) : 主桁 i 部材の下フランジ応力度、 $\sigma_{ta,i}$ 、 $\sigma_{ca,i}$: i 部材の許容曲げ引張、圧縮応力度、 δ_g^1 、 δ_g^2 : 外桁、中桁の支間中央の活荷重によるたわみ、 δ_a : 主桁のたわみ許容値、 σ_g^+ 、 σ_g^- : 横桁のそれぞれ正負の曲げモーメントによる応力度。

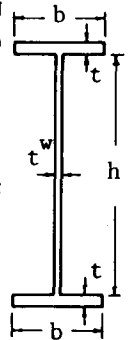


図-6

3-2 目的関数

目的関数は、鋼桁の鋼材容積と床版の鉄筋量との和とするが、両者は材料費が異なるので、SM50の材料費に対する各材質の材料費の比を、各容積に乘じた換算容積の和を用いる。結局、目的関数は次式で定義される。

3本主桁の場合、

V_c = \alpha_0 \{ \sum_{i=1}^4 (2b_i t_i + t_i^w h_g) \frac{L}{2} + \sum_{i=5}^8 (2b_i t_i + t_i^w h_g) \frac{L}{4} \} + \alpha_1 (2b_9 t_9 + t_9^w h_g) 2\lambda + \alpha_s 2(\lambda + 100) A_s L \tag{5}

4本主桁の場合

V_c = \alpha_0 \sum_{i=1}^8 (2b_i t_i + t_i^w h_g) \frac{L}{2} + \alpha_1 (2b_9 t_9 + t_9^w h_g) 3\lambda + \alpha_s 2(1.5\lambda + 100) A_s L \tag{6}

上式において、 α_0 、 α_1 、 α_s は、それぞれ主桁、横桁および鉄筋の鋼材の、SM50に対する材料費の比である。 A_s は単位幅当りの鉄筋量であり、道示に規定される床版の支間設計曲げモーメントに、不等沈下による付加曲げモーメントを加えた作用曲げモーメントにより計算²⁾される。

3-3 最適設計法

以上で定義された、9変数の最適設計問題を、まずSUMTで解いた。その結果、総ての計算例において、たわみの制約がクリテカルになるならぬに関わりなく、主桁に関しては、 b_4 、 b_8 の2変数以外は全応力設計となった。これは、主桁の平均断面2次モーメントの計算式に、プライヒの平均値法を使っているためと思われる。プライヒの平均値法は、次式で定義される³⁾。

I_m = I_4 / (1 + \frac{3}{25}(I_4 - I_1)) \tag{7}

ここで、 I_m は平均断面2次モーメント、 I_4 は支間中央の断面2次モーメント、 I_1 は支間端部の断面2次モーメントである。このように、 I_m には I_1 、 I_4 のみ関与する結果、たわみ制限がクリテカルになっても、 b_4 以外の変数は全応力設計になるのである。

よって、本報告の計算例は、 b_4 、 b_8 、 b_9 の3変数の最適設計問題として解いた結果である。他の6変数(3本主桁で、格子剛度の制約条件がない場合は、 b_9 を含めた7変数)は、全応力設計により求めた。

非制約最適化手法としては、Powellの直接探索法を用いた。応答係数は、1000、100、10、1、0.1、0.01と与えた。

4. 計算結果及び考察

本報告で計算した各パラメーター、支間長L、主桁間隔 λ 、横桁腹板高 h_g 、床版厚 t_c の値を表-1に示した。これらのすべての組合せ、それぞれ480ケースの計算を行った。それらの計算結果を整理し、得られた結果を以下に説明する。鋼材は、主桁がSM50($\alpha_0=1$)、横桁がSM41($\alpha_1=0.9$)、鉄筋がSD30、D19($\alpha_s=0.85$)である。

L	λ	h_g	t_c
12 m	2.0 m	25 cm	16 cm
16	2.5	50	18
20	3.0	75	20
24	3.5	100	22
		125	24
		150	

表-1 各パラメーターの値

4-1 最適主桁腹板高

最適主桁腹板高は、5 cm間隔で与える方向探索により求めた。

3本主桁、4本主桁の場合の結果をそれぞれ図-7、8に示した。

横桁腹板高、床版厚は、ほとんど結果に影響しなかった。また、両図を較べてわかるように、3本主桁と4本主桁との間にもほとんど差はない。

4-2 横桁腹板高

パラメーターとして与えた横桁

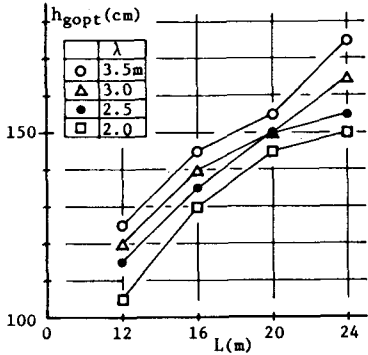
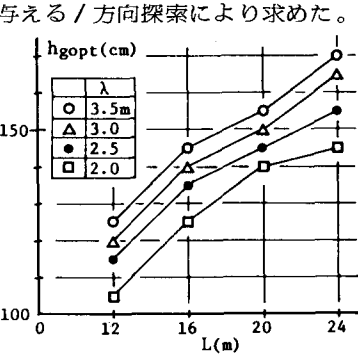


図-7 主桁腹板高(3本主桁)

図-8 主桁腹板高(4本主桁)

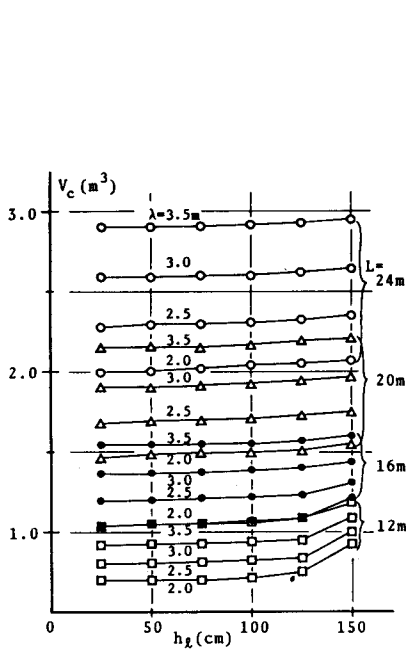


図-9 換算容積と横桁腹板高
(3本主桁の場合)

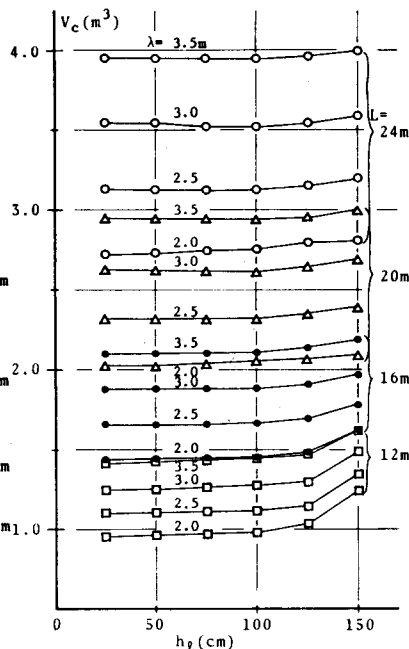


図-10 換算容積と横桁腹板高
(4本主桁の場合)

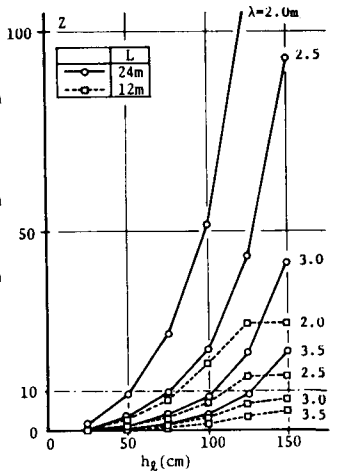
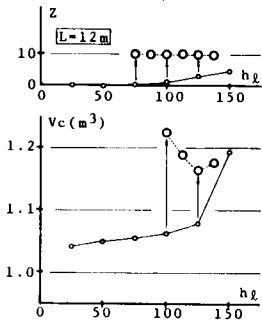
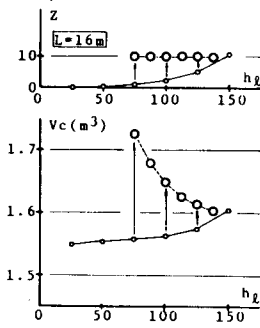


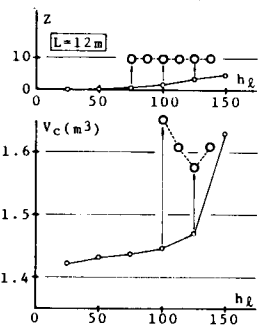
図-11 格子剛度と横桁
腹板高 (4本主桁)



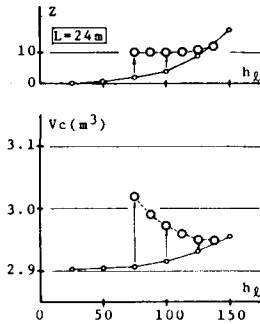
(a) $L = 12\text{m}$



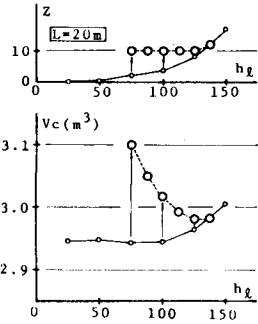
(b) $L = 16\text{m}$



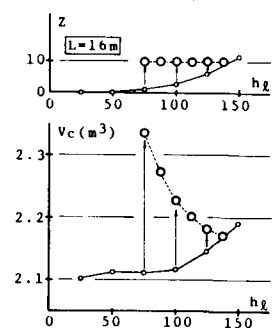
(c) $L = 20\text{m}$



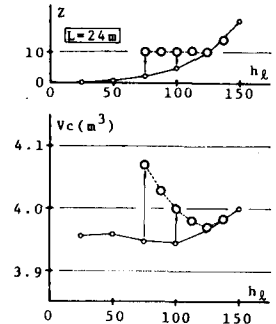
(d) $L = 24\text{m}$



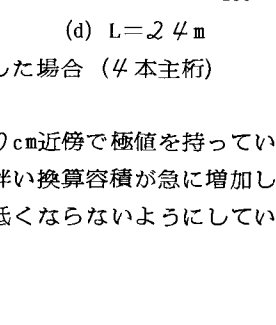
(a) $L = 12\text{m}$



(b) $L = 16\text{m}$



(c) $L = 20\text{m}$



(d) $L = 24\text{m}$

図-12 $Z \geq 10$ を付加した場合 (3本主桁)

図-13 $Z \geq 10$ を付加した場合 (4本主桁)

9、10に示した。

全体にわずかであるが左下りの曲線である。4本主桁の場合に、 $1/部/00\text{cm}$ 近傍で極値を持っているが、底の浅い曲線である。特に支間長の短い範囲で、横桁腹板高の増加に伴い換算容積が急増加しているのは、最適主桁腹板高は、パラメーターとして与えた横桁腹板高より低くならないようにしてい

るからである。

全体に、曲線は横軸に平行であり、最適設計の変数としては、横桁腹板高はどうでも良いことになる。

4-3 格子剛度

最適設計の結果の格子剛度と、横桁腹板高との関係を図-11に示した。

図は、主桁数が4で、支間長が12mと24mの場合の結果であるが、支間長が16mと20mの場合の結果は両者の中間にあり、また、主桁3本の場合の結果は、4本の場合とほとんど同じである。

当然ではあるが、格子剛度を制約しない最適設計の結果の格子剛度は、広い範囲に分布し、また10とは全く関係ない。

特に主桁間隔の広い範囲では、格子剛度が10より低くなる横桁腹板高の範囲も大部広がっている。このような範囲に、 $Z \geq 10$ なる条件を付加して設計すると、換算容積が増加することが予想される。

4-4 $Z \geq 10$ を付加した場合

前述のように、最適設計の結果格子剛度が10より低くなる設計がかなりあった。これらの設計は、それぞれの設計条件で最小換算容積を与えるものであり、また、不等沈下による付加モーメントは、床版の設計に考慮しているので、もちろん安全なものである。しかし、現行の道示では、 $Z \geq 10$ という条件があるので、さらにこの条件を付加して最適設計を行い、結果がどう変わるかを検討した。その結果を図-12、13に示した。

主桁間隔は3.5m、床版厚は20cmの場合の結果である。上が格子剛度、下が換算容積の変化を示している。実線が格子剛度の制約が無い場合、点線がある場合の結果である。

図より、 $Z \geq 10$ という制約を付加することにより、換算容積がかなり（図に示した範囲では、2割程度まで）増加することがわかる。これらの増加は、安全性の見地からも不必要な増加である。

つまり、この計算結果は、現行の道示の 格子剛度 ≥ 10 という条件は、場合によっては不経済な設計を強制する可能性があることを示している。

4-5 付加モーメント

格子剛度を制約しない最適設計の結果の、付加モーメントと横桁腹板高との関係を図-14、15

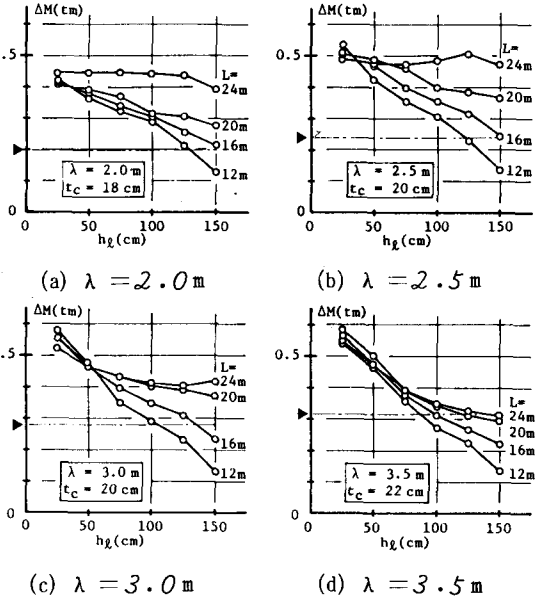


図-14 付加モーメント (3本主桁)

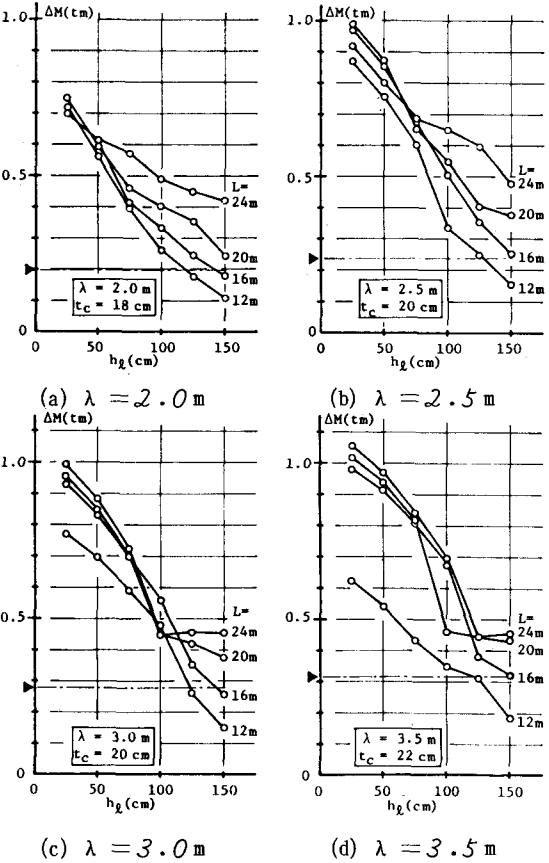


図-15 付加モーメント (4本主桁)

に示した。床版厚は、それぞれの主桁間隔に対応した値をとっている。また、図中の / 点鎖線は、活荷重による設計モーメントの / 割の値を示している。

図より、横桁腹板高の増加に伴い付加モーメントは減少する。特に4本主桁の場合は顕著である。ただ、支間長 / 幅員の値の大きい3本主桁の場合に、横桁腹板高の効果が表われていない。これは、 $L/4$ 点の付加モーメントが $L/2$ 点のそれより大きく、かつ $L/4$ 点の付加モーメントに、荷重分配横桁の効果がほとんど無いことを示している。

3本主桁と4本主桁の結果を比較すると、横桁腹板高の低い範囲では、4本主桁の方がかなり大きい。高い範囲では、ほとんど同じになり、少なくとも活荷重による設計モーメントの2割以内には入っている。

5. 結論

本報告により得られた結論を箇条書きにすると以下ようになる。

- 1) 格子剛度 (≥ 0) を制約する方法は適当でない。少なくとも、不経済な設計をする可能性がある。
- 2) 横桁腹板高は、目的関数に大きな影響を与えない。横桁腹板高は、高い方が付加モーメントは少ない。以上より、横桁腹板高を制約する方が良い。例えば、「施工上許される最大の腹板高」と指導する方法もある。
- 3) 荷重分配横桁の間隔は、支間長 / 幅員との関係で定めるべきように思われる。

結論の2) は、まえがきにも述べたように、床版 - 鋼桁系の設計においては、設計の簡便さ、床版の置かれている厳しい環境条件を考慮して、鋼桁に剛性を配分すべきだという立場に立っている。

なお、 $Z \geq 0$ を付加した場合の付加モーメントと横桁腹板高との関係を図-16に示した。4本主桁、 $\lambda = 3.5$ m、 $t_c = 20$ cm の場合の結果である。実線が格子剛度を制約しない場合、点線が制約した場合の結果である。

図より、格子剛度を制約すると、付加モーメントは、横桁腹板高の低い範囲でかなり減少し、かつ、横桁腹板高の影響をあまり受けないのがわかる。

これより、 $Z \geq 0$ という条件は、荷重分配を良くし付加モーメントを減少させるという意味では十分条件であるが、床版 - 鋼桁系のトータルな設計を考える時には、必ずしも満足しなくても良い必要条件にすぎないことがわかる。

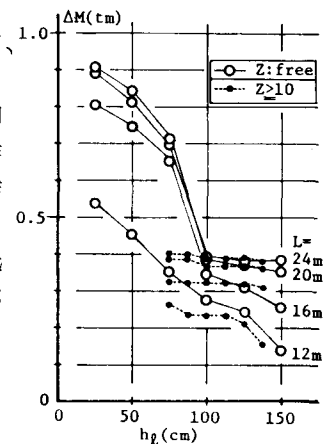


図-16 付加曲げモーメント ($Z \geq 0$)

6. あとがき

本報告の研究の / 部は、昭和55年度の文部省の科学研究費の補助を受けたものである。

本報告の計算の / 部は、室蘭工業大学昭和55年度卒業生 佐藤貴美王君（現大林組）の協力を得たものであることを付記し謝意を表する。

本報告の計算は、北海道大学大型計算機センターの HITAC M-200 を用いた。

7. 参考文献

- 1) 杉本博之：最適設計による荷重分配横桁の設計に関する考察、土木学会第36回年次学術講演会講演概要集、1981、10。
- 2) 杉本博之：床版と桁の相互作用を考慮したプレートガーダー橋の最適設計について、土木学会北海道支部論文報告集、第37号、1981、2。
- 3) 例えば、中村正平他7名：鋼合成桁橋の設計計算例、土木構造物設計計算例シリーズ 1、山海堂。