

純信橋(合成直格子斜桁橋)の研究

— 直交異方性平行四辺形板理論の応用 —

成 岡 昌 夫*
 大 村 裕**
 川 野 博 司***
 古 賀 太 郎****

要 旨 さきに提案した直交異方性平行四辺形板の数値解析法にもとづき、Facom 128 B を用いて、逆マトリックスの計算を行なって、合成直格子斜桁橋を設計した。ついで、載荷実験を行なって、実測値を著者の方法と KDC-1 (京都大学電子計算機) による計算値と比較して、著者の方法の有効であることを確かめた。

1. はしがき

格子桁構造における荷重分配理論は、F. Leonhardt¹⁾ によって研究せられ、わが国でも実験的に確かめられ、実際の設計に用いられている。一方、直交異方性矩形板理論にもとづく、Guyon、および、Massonnet の荷重分配理論^{2), 3), 4)} は、わが国でも多くの注目をひき、溶接プレート ガーダー道路橋の設計に用いられるに至っている⁵⁾。

以上は、いずれも、直桁橋に対するものであるが、斜桁橋の研究はきわめて少ない。外国ではイリノイ大学の T.Y. Chen, C.P. Siess, および、N.M. Newmark らによる 5 本主桁の斜桁橋の研究⁶⁾、および、A.W. Hendry と L.G. Jaeger の格子斜桁橋理論の研究⁷⁾があるにすぎない。この点にかんがみ、著者ら (成岡、大村) は、直交異方性平行四辺形板の解析法の研究を行ない⁸⁾、これを模型実験により確かめて、斜桁橋の解析に一つの方法を提案した^{9), 10)}。

わが国で、斜桁橋を斜角を考慮して設計するのは、本橋の設計当時 (昭和 34 年夏) まだ行なわれていなかったようであり (模型解析によるものとしては、第二潤川橋があった)、寡聞にしてよく知らないが、外国文献にも見当たらないように思う。高知県において、斜角 30° のプレート ガーダー道路橋の計画を機会に、著者らの計算法を用いて設計計算を行なったので、まず、この大要を述べたいと思う。なお、工事完成後載荷実験を行ない、実測値と計算値とを比較したので、これをともあわせて述べ、斜桁橋の特性を明らかにしたいと思う。

2. 純信橋の概要

型 式：活荷重合成直格子斜桁橋 (主桁のみ合成)
 斜 角：30°
 荷 重：鋼道路橋設計示方書第 1 種
 スパン：21.80 m 有効巾員：7.50 m
 主桁間隔：2.0 m
 床 板：鉄筋コンクリート 18 cm 厚
 舗 装：3 cm アスファルト コンクリート

本橋の平面図を 図-1 に示す。荷重分配用横桁は、非合成のものを中央に 1 個設け、なお、図-1 のように、対傾構を配置した。

図-1 平面図

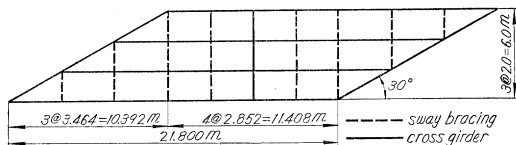
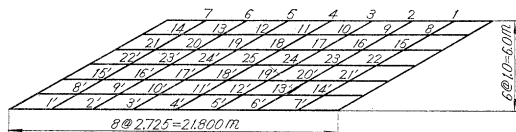


図-2 skew network



3. 主桁の曲げモーメントの影響係数の値の計算

本橋を、相対する二辺 (橋台) で単純支持され、他の二辺 (縁桁に相当する) で弾性ばり (縁桁) によって支持される直交異方性平行四辺形板とみなし、著者らの解析法によって計算することとした。平行四辺形板は、主桁方向においては 8 等分、これに直角方向においては 6 等分することとし、図-2 のような skew network を組む。したがって、この解法における未知数は、 $(8-1) \times (6+1) = 49$ 点の network point のたわみである。しかしながら、対角線に関して対称、および、逆対称の荷重状態を考えることによって、未知数を 25、および、24 に減らすことができる。

直桁橋としての中桁の断面二次モーメントを概算し、これに斜角の影響を考慮して、多少すくな目に中桁の M を計算し、これより断面二次モーメント I を概算して、 $I = 1\ 616\ 500\ \text{cm}^4$ を得た。横桁については、非合成断面

* 正員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学教室
 ** 正員 工博 神戸大学助教授 工学部土木工学教室
 *** 正員 高知県土木部道路課長
 **** 正員 三菱造船KKK広島造船所鉄構部橋梁設計係長

として、 $\bar{I}=82\ 300\text{ cm}^4$ とした。一般に、縁桁の I_R は、中桁の I より大きくすべきであるが、第1次計算では、簡便のために、 $I_R=I$ とした。

skew network による計算に必要な特性値は、次のようである。

- a) $B_x=1.6165 \times 10^6 E_s/200=8\ 030 E_s$,
- b) $B_y=(82\ 300 E_s/1\ 090)$ (横桁の分) $+(16^3 \cdot 0.1 E_s/12)$ (床板) $=110 E_s$ ($n=E_s/E_c=10$, $\nu=0$ と仮定する)
- c) $\kappa=H/(B_x \cdot B_y)^{1/2}=0$ と仮定する
- d) $\lambda_x=2\ 180/8=272.5\text{ cm}$, $\lambda_y=600/6=100$, $\kappa=100/272.5=0.366\ 97$
- e) $\alpha^2=B_y/B_x=110/8\ 030=0.013\ 47$
- f) $\varphi=60^\circ$, $\tan \varphi=1.732\ 05$

以上より、9つの階差方程式にふくまれる係数 A, B, J は、次のようになる。

$$A=K^2/\alpha=1.152\ 73, B=K \tan \varphi=0.635\ 62$$

$$J=\frac{1}{\alpha^2} \frac{K^4}{\lambda_y} \left(\frac{EJ_R}{B_x} - f \right) = A^2 = 1.328\ 78$$

上式の J の値は、さきの論文に示したものと異なり、W. Cornelius の論文¹³⁾に示されたような表現をとっており、縁桁と最外側の中桁間の桁間隔の $1/2$ を f としている。

これら3つの値と、仮定した $\kappa=H/\sqrt{B_x \cdot B_y}=0$ を用いて、さきの論文に示した9つの階差方程式に従って、25および24元の連立方程式をつくる。この連立方程式の左辺の係数よりなる matrix—stiffness matrix—を解いて、inverse matrix—flexibility matrix—を求める。この計算には、FACOM-128 B を用いた。

flexibility matrix から、各格子点のたわみの影響係数が求められる。これをもとにして、主桁方向の曲げモーメントの影響係数が計算できる。これを、縁桁、中桁の $l/2$ 断面、 $l/4$ 断面に相当する、点 2, 4, 6, および、16, 18, 20 について示すと、表-1 のようである。

4. 主桁の曲げモーメントの計算

以上のようにして求めた点、2, 4, 6, 16, 18 および 20 の曲げモーメントの影響係数を利用し、鋼道路橋設計示方書に示す線荷重、等分布荷重などの活荷重、および、合成格子桁構造に作用する追加死荷重—舗装、高

表-1 曲げモーメントの影響係数 (単位: 10^{-4})

point	M_{x+2}	M_{x+4}	M_{x+6}	M_{x+16}	M_{x+18}	M_{x+20}
1	73.88	73.26	19.95	35.51	27.58	4.31
2	166.18	80.50	41.57	52.94	41.59	8.82
3	107.18	131.45	67.22	77.86	59.33	13.66
4	70.73	212.75	97.23	78.78	69.16	18.71
5	46.03	139.11	124.40	67.40	68.49	22.78
6	27.70	91.75	200.34	48.31	55.34	21.37
7	13.41	41.56	92.48	27.17	30.92	13.67
8	55.06	39.65	21.20	35.85	17.68	3.79
9	81.36	78.59	43.71	79.08	34.61	7.38
10	72.87	111.04	67.27	78.04	54.68	11.24
11	50.11	119.14	89.88	59.40	85.93	16.76
12	44.76	97.92	104.04	40.90	73.86	27.89
13	22.15	56.09	97.45	24.83	45.67	52.62
14	10.56	26.27	44.95	13.41	19.62	35.58
15	28.07	32.97	20.73	34.23	14.44	3.23
16	42.13	57.41	38.98	103.97	31.11	6.96
17	44.07	69.54	54.54	51.15	56.55	12.36
18	34.20	68.36	61.90	31.16	115.32	21.82
19	28.07	56.68	58.22	19.95	54.36	41.63
20	18.01	37.97	43.65	11.75	27.75	96.56
21	8.89	18.28	22.79	5.16	11.69	32.01
22	14.65	21.11	16.38	37.93	20.65	7.75
23	25.60	34.60	28.32	56.63	39.58	14.28
24	30.47	40.67	33.41	31.88	64.91	22.85
25	28.18	43.70	32.83	19.11	74.11	39.94
24'	26.11	36.38	27.37	11.90	41.73	61.04
23'	14.91	25.41	19.77	7.12	22.79	66.04
22'	7.31	12.46	10.36	3.33	10.19	79.32
21'	4.22	11.36	9.06	21.04	19.71	8.25
20'	17.29	19.06	13.66	26.70	37.69	19.29
19'	24.66	26.71	14.06	20.18	48.38	32.81
18'	20.87	24.31	11.92	13.39	45.68	45.75
17'	17.15	22.19	9.19	8.77	32.48	51.39
16'	12.44	15.85	6.55	5.53	11.57	42.65
15'	5.88	7.71	3.12	2.74	9.38	21.72
14'	6.23	4.80	1.37	9.17	15.57	11.52
13'	11.54	8.37	18	12.95	26.14	23.33
12'	14.61	10.99	-1.68	12.59	30.86	33.42
11'	14.97	12.31	-2.90	9.99	30.20	38.86
10'	13.38	11.61	-4.07	7.53	25.34	37.39
9'	9.43	8.74	-2.00	5.22	17.53	29.04
8'	-7.92	4.44	-1.20	2.73	8.96	15.61
7'	2.71	-2.48	-8.70	1.49	6.27	12.60
6'	6.05	-2.35	-14.02	5.11	12.52	22.13
5'	9.12	-27	-16.33	8.00	18.18	27.31
4'	10.87	2.45	-7.94	8.74	22.01	28.71
3'	10.99	4.47	-1.10	7.69	25.15	29.89
2'	8.41	4.71	-7.00	5.61	17.24	21.44
1'	4.95	3.32	-3.24	1.67	9.30	12.28

表-2 曲げモーメントの値 (単位: tm)

計算法	荷重	M_{x+2}	M_{x+4}	M_{x+6}	M_{x+16}	M_{x+18}	M_{x+20}
直交異方性 平行四辺形 板理論	線荷重	48.159	63.597	46.649	41.486	56.353	44.248
	等分布荷重	41.288	50.549	35.748	32.251	42.678	33.488
	舗装地覆高欄 など	12.205	14.645	10.577	7.404	10.859	9.154
	計	101.649	128.790	92.973	81.141	109.890	86.890
単独桁理論	線荷重		62.108			69.706	
	等分布荷重		47.411			53.185	
	舗装地覆高欄 など		20.673			8.198	
	計		130.192			131.089	
Guyon-Massonnet の方法	線荷重	54.568	72.758	54.568	50.317	67.090	50.317
	等分布荷重	41.613	55.484	41.613	38.405	51.207	38.405

欄、地覆など—などの荷重による、主桁の $l/2$, $l/4$ 断面の曲げモーメントを求めると、表-2 の最上行に示すようである。

直桁橋の設計に用いられている Guyon-Massonnet の方法によって、同一の stiffness factor, torsional parameter を用い、斜角を無視して計算すると、表-2 の最下段のようである。

単独桁理論によって、上記二つの parameter を無視して、 $l/2$ 断面の曲げモーメントを計算すると、表-2 の中央のようになる。これらによって、次のことがわかる。

a) 縁桁の曲げモーメントについては、単独桁理論によっても、また、著者の直交異方性板平行四辺形板理論によっても大差がないが、中桁の曲げモーメントについては、双方の理論によって大差がある。一般に F. Leonhardt の格子理論、あるいは、直交異方性矩形板理論によれば、

縁桁に対して $M_{格}$ あるいは $M_{板} > M_{単}$

中桁に対して $M_{格}$ あるいは $M_{板} < M_{単}$

となる。この計算例において、中桁について、 $M_{板} < M_{単}$ となっており、これは当然のことであり、斜角の影響も相当あると思われるが、縁桁についても、わずかであるが、 $M_{板} < M_{単}$ となっているのは、当然、斜角の影響が大きいことを意味する。

b) $l/4$ 断面の曲げモーメントが、左右で異なる。これは、斜角を考慮してはじめて理解できることであり、単独桁理論、あるいは、直格子桁理論でも説明できない。

c) 著者の直交異方性平行四辺形板理論による値が、Guyon-Massonnet の直交異方性矩形板理論による値より、相当に小さい。これは、斜角を取り入れることが、いかに大切であることを示している。

さきに仮定した断面二次モーメントの値を用いて、表-2 の結果を得、これより断面を決めて次の値を得た。

縁桁に対して $I_b = 1\,927\,300 \text{ cm}^4$

中桁に対して $I_b = 1\,754\,400 \text{ cm}^4$

横桁に対して $I_s = 86\,600 \text{ cm}^4$

縁桁と中桁の I の比は 1.1 (仮定は 1.0) α の値は、 $\alpha = 0.117\,1$ (仮定は $0.116\,8$) であり、これぐらいの差は、曲げモーメントの影響係数に影響をおよぼさない。なぜならば、 $\alpha = (B_y/B_x)^{1/2}$ で、 B_x したがって、 I_x の $1/2$ 乗根で入ってくるので、 I_x の影響の程度が小さくなるからである。

したがって、上記の値をそのまま用いることにし、第 2 次計算を省略した。

5. 載荷実験による研究

本橋は、設計にあたっては、 B_x/B_y 、スパン巾員比、および、斜角 30° を考慮したものであって、この点においては、まれにみる特色を有するものであると信ずる。従来、斜桁橋の実験では、実測値を斜角を無視した計算値と比較していたが、これでは不十分で、斜桁橋の特性を明らかにすることができない。

純信橋の完成を好機として、昭和 35 年 4 月 12, 13 日に載荷実験を行ない、著者の計算法による計算値と実測値とを比較し、その有効性を検討するとともに、斜桁橋の特性を知ろうとしたものである。

(1) 載荷荷重および載荷方法

使用した荷重は、民生ジーゼルの rear dump truck T 75 S にインゴットを積載したもので、前輪重量 4.690

(4.160)、後輪重量 15.300(16.090)、計 19.990(20.250) t の 2 種である。載荷方法は、各桁の $l/4$, $2l/4$, $3l/4$ の点において、縁桁では、後外側後輪の中心がその点に載荷されるようにし、中桁では後輪の中心がその点にくるようにし、いずれも同一載荷状態を 2 回ずつ用いて計測するようにした。

(2) 計測方法

ダイヤルゲージを、縁桁、中桁の $l/4$, $2l/4$, および、 $3l/4$ 断面の下フランジの下測にあてて、たわみを測定した。また、同じ断面の上(下)フランジの下(上)側に、ウェブプレートに対称に左右 2 枚の電気抵抗線ひずみ計を接着して、ひずみをピックアップすることにした。なお、同一のひずみ計を、横桁、床板、および支点より $l/8$ のところの桁断面に接着してあるが、これらによる実測値についての記述はさける。

(3) 計算方法

さきに、実際に用いられた桁断面の最大断面 2 次モーメントの値は、 $I_R = 1\,927\,300 \text{ cm}^4$, $I = 1\,754\,400 \text{ cm}^4$, $\bar{I} = 86\,600 \text{ cm}^4$ であることを述べた。しかし、実測値と対応する計算値を求めるために、次のような値を用いた。

a) 中央集中荷重による載荷点のたわみを等しくする場合の、断面一定とみなした桁としての換算断面 2 次モーメントは、 $I_R = 1\,763\,500 \text{ cm}^4$, $I = 1\,605\,200 \text{ cm}^4$ であり、これらの実際の桁の値に対する比は、いずれも、 0.915 である。

b) 中央に一本配置された荷重分配用横桁の断面 2 次モーメントは、 $\bar{I} = 86\,600 \text{ cm}^4$ である。対傾構の断面 2 次モーメントは、1 パネルの片持対傾構の尖端に集中荷重が作用する場合のたわみを等しくする片持ばりの断面の値をとって、 $\bar{I} = 33\,400 \text{ cm}^4$ となる。

したがって、階差方程式の計算に必要な数値は次のようになる。() 内の値は設計計算に用いたものである。

$$B_x = 1\,605\,200/2\,180 = 8\,026 E_s \quad (8\,030 E_s)$$

$$B_y = (86\,600 + 6 \times 33\,400) E_s / 2\,180 + (16^3 \cdot 0.1 E_s / 12) = 166 E_s \quad (110 E_s)$$

$$\alpha = (166/8\,026)^{1/2} = 0.143\,73 \quad (0.116\,80)$$

$$\lambda_x = 272.5 \text{ cm}, \lambda_y = 100, K = 100/272.5 = 0.366\,97$$

$$A = K^2/\alpha = 0.936\,95 \quad (1.152\,73),$$

$$B = K \tan \varphi = 0.635\,62$$

$$J = \frac{1}{0.143\,73^2} \cdot \frac{0.366\,97}{100} \left(\frac{1\,763\,500}{8\,026} - 100 \right) = 1.050\,88 \quad (1.328\,78)$$

となる。なお、また、問題となる $\kappa = H/\sqrt{B_x \cdot B_y}$ の値については、Giencke の式¹²⁾

$$2H = 2B + B_{yx} + B_{xy} + 2\nu e_x e_y D + (e_x + e_y)^2 (1 - \nu) (D/2)$$

において、 $e_y = 0$, $e_x = 27.5 \text{ cm}$ として計算すると、

$$2H = 595.768 E_s$$

となり、

$$\kappa = H / \sqrt{B_x \cdot B_y} = 595.768 E_s / 2 \sqrt{8026 \cdot 166 \cdot E_s} = 0.26(0)$$

を用いるものとする。

これらの値を用いて、25元、24元の stiffness matrix をつくりなおし、京都大学電子計算機 KDC-1 を用いて、逆マトリックスの計算を行なった。この逆マトリックスの値から、たわみの影響係数の値を求め、ついで、桁方向の曲げモーメントの影響係数の値を計算した。これらの影響係数の値に、載荷荷重を格点荷重に換算したものを乗じて、計算値をうる。

(4) 実測値と計算値との比較

1/4, 2/4, および、3/4 断面における、たわみ、および、曲げ応力の実測値と計算値との比較を、図-3, 4 に示す。計算値としては、慣用計算法、著者の直交異方性

図-3 応力の比較

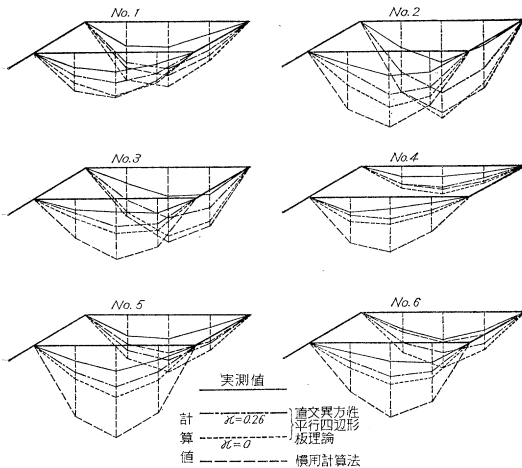
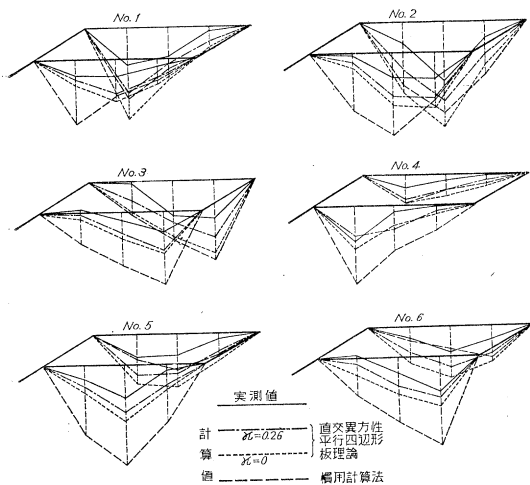


図-4 たわみの比較



平行四辺形板理論 ($\kappa=0$, および、 $\kappa=0.26$) による計算法を用いている。

実測値は、一般に計算値より小さい値を示し、慣用計

算法による値とは、いちじるしい相違がある。一方、直交異方性平行四辺形板理論による結果は、慣用計算法による値にくらべて、いちじるしく実測値に近い。高欄、地覆、舗装などの影響もあって、実測値といくぶんの差はあるが、斜桁橋の力学的性質をよく説明しているものといえよう。この程度は、中桁の方で大きくみられる。この理由は、主として、地覆、高欄による縁桁の剛度の増大を計算値の方では考慮していないことによるものと考えられる。応力の比較は、3つの断面についてのみ示してあるが、著者らの直交異方性板理論による計算値が、実測値をよく説明していることが明らかである。(実測値)/(計算値)の値が、たわみの方が応力よりも高いのは、多くの載荷実験で見られるが、ここでも同様である。

図-4 において明らかにしなかったのであるが、支点付近の下フランジにかなり大きな圧縮応力が生ずることは、注目し値する。このような現象の生ずる理由は、斜桁橋の平面構造としてのねじりモーメントの作用にもとづくものと考えられ、慣用の線構造的な解析では、現われないものである。

隅角部の床板の応力も測定したのであるが、この応力の検討は、支点付近の主桁断面の応力とともに、稿を改めて論じたいと思う。

6. むすび

以上、純信橋の斜桁橋としての設計と、架設後現地で実施した載荷実験の概要を述べた。この研究の結果、斜桁橋構造を平面構造として解析することが合理的であり、従来の慣用計算法にくらべて有利であることが、明らかになったものと思う。斜桁橋を線構造として設計することは、斜角の影響を無視し、かつ、直桁橋の設計で用いられている stiffness parameter $\theta = (b/2a) \sqrt{B_x/B_y}$ の影響を無視することになるわけで、これでは、100年前における設計法とくらべて、なんらの進歩がないわけである。これは、構造解析学上恥ずべきことと考えて、大村・成岡の直交異方性平行四辺形板理論を応用し、Digital Computer の助けを借りて、本橋の設計を行ない、かつ、実験値を計算値と比較して、著者らの方法の有効であることを確認したものである。

なお、本橋の巾員がせまくて、鋼重の軽減は 10% にとどまった。しかし、巾員がひろくて桁数の多い場合には、軽減率は大きくなると思う。本文を参考にして設計を試みられるよう切望する。

ただし、計算のたびに、ここに示したようなことをやっていたのでは、不便であるので、大村・成岡は、相対する2つの斜辺で単純に支持された直交異方性平行四辺形板に対し、さきに述べた $A=K^2/\alpha, B=K \tan \varphi$, および、 $\kappa=H/\sqrt{B_x \cdot B_y}$ の種々の組み合わせについて、曲げモーメントの影響係数の値を計算し、この計算値を集大成し

て、“Guyon-Massonnet の方法で計算した主桁の曲げモーメントの値に、ある係数を乗ずれば、これがただちに斜桁橋の主桁の曲げモーメントになる” というような係数を求めようという構想をもっている。T.Y. Chen が ILLIAC を用いてぼう大な計算を行なったように、われわれは、KDC-1 を用いて、Chen のやった計算量以上の計算を行なっているのです、この構想が完成すれば本文に示したような順序をふまなくても、斜桁橋の合理的設計が可能となるであろう。

参 考 文 献

- 1) F. Leonhardt : Die Vereinfachte Trägerrostberechnung. Stuttgart, 1950.
- 2) Y. Guyon : Ann. Ponts et Chauss., Sept.-Oct. (1946), p. 553.
- 3) Ch. Massonnet : Abh. Intern. Vereinigung für Brücken u. Hochbau, 10 (1950), S. 147.

- 4) P.B. Morice and G. Little : Structural Engineer, 32 (1954), p. 83.
- 5) 日本道路協会 : 道路橋設計図集 1. 昭 34.
- 6) T.Y. Chen, C.P. Siess and N.M. Newmark : Univ. of Illinois Bulletin, No. 439 (1957).
- 7) A.W. Hendry and L.G. Jager : The Analysis of Grid Frameworks and Related Structures, p. 136, London, 1958.
- 8) M. Naruoka and H. Ohmura : Stahlbau, 28 (1959), S. 187.
- 9) M. Naruoka and H. Ohmura : Publications of International Association for Bridge and Structural Engineering, 19 (1959), p. 231.
- 10) 成岡・大村・船越・浅沼・福井 : 土木学会論文集 66 号 (昭 35.1), p. 1
- 11) W. Cornelius : Stahlbau, 21 (1952), S. 20
- 12) E. Giencke : Stahlbau, 24(1955), S. 128 および, 27 (1958), S. 229.

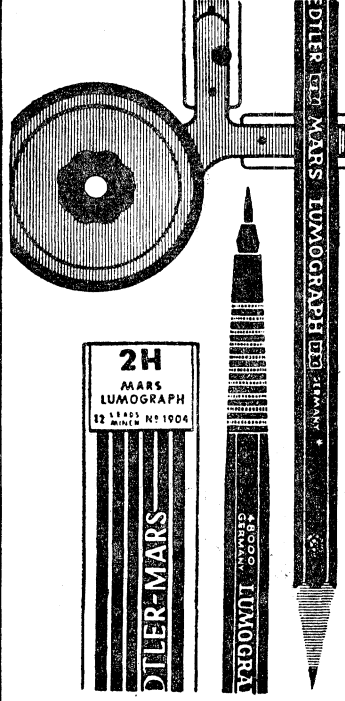
(原稿受付 : 1961.7.11)

港湾における水路測量 (46 巻 10 号) 正誤表

ページ	行	正	誤
9	12	国内法	国内港
10	下から 6	調査結果 ⁴⁾	調査結果 ⁵⁾
11	23	水路通報	航路告示
12	表-8 の次	8. 海底沈殿物ことに浮泥地帯における水深 ⁶⁾	海底沈殿物ことに浮泥地帯における水深 ⁴⁾

MARS - LUMOGRAPH

マルス製図用鉛筆と芯




MARS-LUMOGRAPH 製図用鉛筆と芯が世界中で好評のわけは次の理由です

- 独特の新製造法によって作られ 芯が保証されています
- 卓越した複写力を備えています
- 芯の高度の等級が一貫して定められています
- 芯が折れにくい
- 容易に消せて あとを残しません
- 非常に経済的です MARS-LUMOGRAPH 鉛筆と芯は他の製品よりはるかに減りが少ない

このような MARS-LUMOGRAPH の製品がもつ特質は世界中の経験豊富な専門家の方々により愛好されており、世界有数の高級品として知られております。

MARS-LUMOGRAPH 製図用鉛筆 NO.2886 硬度19種類 小売価格1本¥60

総販売代理店 **リーベルマン ウェルシュリー**
エンド カンパニー リミテッド
 中央郵便局私書函 441
 東京 (211) 2626・大阪 (23) 2227-9



STAEDTLER