

PS コンクリート 3 スパン連続斜ホロースラブ橋の設計

山 根 巖*
福 山 俊 郎**

1. 概 要

高根橋の概要を図-1に示す。本橋の支承は必ずしも一直線をなしていないし、また平行でもないが解析の都合上一直線かつ平行とみなし、図-1の斜角を $45^{\circ}41'$ とし、V.P. Jensen 流に、 $\phi = 44^{\circ}19' = 44.32^{\circ}$ とする。

2. 階差方程式の利用について

Asim Yeginobali は、基本的には、V.P. Jensen とまったく同様な方法で階差式を作成したが、連続スラブでは中間支承線があるので、これに関係のある格点について特別な工夫をこらした。図-2 は著者が用いた Network である。図-2 で格点 $(8, 35, 62, 89, 74', 47', 20')$ 、 $(20, 47, 74, 89', 62', 35', 8')$ がこれに相当する。

これらの格点の階差式を記述することは紙面の都合で

できないので、その考え方を述べる。これらの格点は中央支承線上にあるので、たわみは 0 と考える。つぎに、支承点は固く支持されており、かつ、中間支承線に沿って浮き上がらないとする。図-2 で支承線の方を

図-1 高根橋の概要

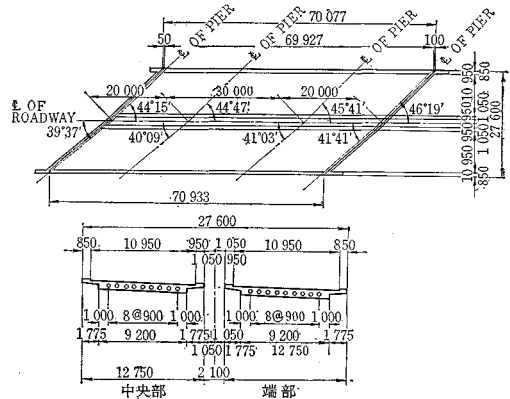


図-2(a) Skew Network

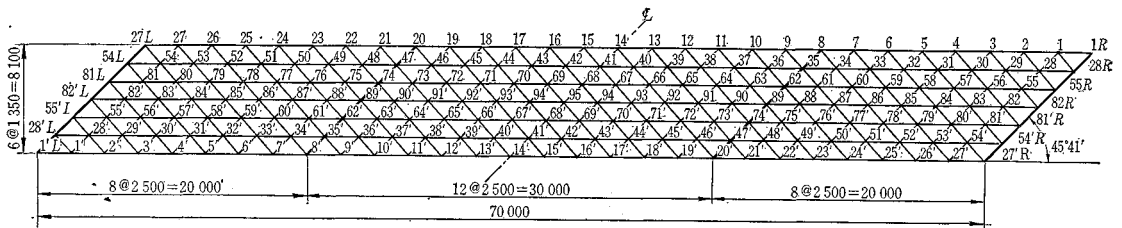
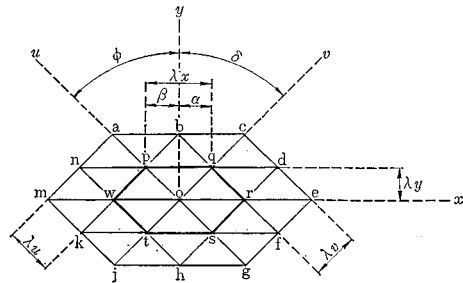


図-2(b) Skew Network



* 正会員 日本道路公団東名高速道路名古屋建設局特殊設計課
** 正会員 福山コンサルタント代表取締役

u で表わすと、 $\partial^2 w / \partial u^2 = 0$ である。これは中間支承は端支承部分と同様に、完全な線支承であることを意味している。もし、これらの格点が点支承であるとすれば、その点のたわみ $w=0$ とするだけでよいが、この設計では、実際の支承点はこれらの格点とずれているので、線支承の条件によったのである。これらの条件を利用して、在来関係式から所要の階差式を求めた。

つぎに、工夫をこらした点を述べる。図-2 の Network をそのまま考えると、格点の数は $94 \times 2 + 1 = 189$ 個となって、IBM 7090 の能力からして、所要の量を求めることは困難である。未知数を減らすために、図-3 のような方法をとった。

今回の設計では、平面形が中央点 (95) について点対称であったので、図-2 に示すように、格点 95 に対して対称的に格点番号をつけて、(1~94) と (1'~94') との 2 つのブロックに分けて考えた。格点 95 をのぞいておのおのの格点是一对の対称点になるわけである (たとえば、格点 1 と 1', 2 と 2')。もし、スラブが対称荷重を受けるときは (たとえば全スパンにわたる等分布荷重、または、格点 95 の集中荷重)、同一番号の点のたわみは等しい。それで、対称荷重については中間支承線 1 列の数 7 個 (8, 35, 62, 89, 20, 47, 74) を 95 から引いた $95 - 7 = 88$ 個の格点に対して計算すればよい。

荷重が非対称であるときは、図-3(a), (b) および(c) にみるように、 $1/2$ の荷重強度をもった対称荷重と $1/2$ の荷重をもった非対称荷重について考える。すなわち、格点 24 に集中荷重 P が載荷された場合は、格点 24 と格点 24' に $P/2$ が対称に載荷されたときと、格点 24 に $P/2$ 、格点 24' に $-P/2$ が載荷されたときとの二つの場合に対して計算し、その結果を加算する。対称荷重の場合は、先に述べたように 88 個の点について計算するわけである。このとき、格子を 2 分する格点の階差式では、基本六角形の“,” のついた点のたわみをその対称点のたわみに等しいとすればよい。逆対称荷重の場合は、“' ”

” のついた点のたわみの符号をかえて、基本六角形の対称点のたわみに等しいとすればよいわけで、そのときの未知数の数は中央点を除いて 87 個でよい (逆対称荷重のときの中央点のたわみは 0 である)。もし、格子の数が偶数であって、中心点がないときは、対称、逆対称のいずれの荷重についても全部の格点から支点を除いた数の半分について解けばよい。

以上は、計算の方法、および、階差方程式の元数について論じたもので、支承線上の格子点のたわみを 0 としたものである。しかし、 $M_x, M_y, M_{xy}, M_{max}, M_{min}$ の計算については、これらの支承線上の格子点についても、もちろん計算しなければならない。

3. 高根高架橋の計算

高根高架橋の Input Data はつぎのとおりである。

H.L=70.0 m, $\nu=0.15, N=27, \lambda_x=2.50$ m

V.L=8.1 m, $P_0=1$ t/m², $M=7, \lambda_y=1.35$ m

$E_1=2.1 \times 10^6$ t/m²

$I_1=8.044008 \times 10^{-2}$ m⁴ (縁げたの断面 2 次モーメント)

$N=1.509090 \times 10^5$ t·m (板剛度)

$\phi=44.32^\circ, q_0=0$

これによって、電子計算機の内部で Stiffness Matrix が組み立てられ、その逆マトリックスが計算されて、(95-7) 個の点のたわみの影響面が求められる。ついで、格点曲げモーメントの M_x, M_y と、ねじりモーメント M_{xy} との 3 組の影響面が、95 個の格点について求められる。スラブには死荷重のほか活荷重として L-20 荷重が働き、また、高欄および地覆荷重が作用するので、すべての荷重に対し、たわみ、および曲げモーメントを求めるために、すべての格点の w, M_x, M_y, M_{xy} の影響面を Output した。影響面から任意の荷重に対する M_x, M_y および M_{xy} を求める方法は、文献 1) に述べたとまったく同様である。 M_x, M_y および M_{xy} が求められると、 M_{max}, M_{min} および M_{max} の方向が求められる。

すなわち、

$$\left. \begin{matrix} M_{max} \\ M_{min} \end{matrix} \right\} = (M_x + M_y) / 2 \pm \sqrt{\{(M_x - M_y) / 2\}^2 + M_{xy}^2}$$

$$\theta = 1/2 \tan^{-1} \{M_{xy} / (2M_x - M_y)\}$$

(θ は x 軸から左まわり M_{max} の方向の角度)

この 2 式から、その大きさと方向を求める。 M_{max}, M_{min} を計算するのに、ある荷重状態に対して求められた M_x, M_y および M_{xy} の集計値から上記の 2 式によって計算した M_{max} および M_{min} の値と、格点ごとの荷重から一つ一つの M_{max} および M_{min} を計算し、その

図-3 非対称荷重の考えかた

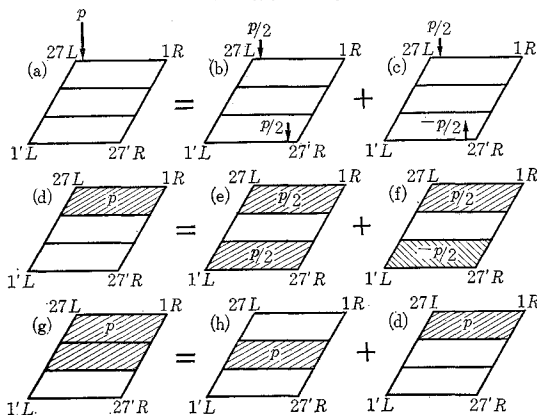


図-4 自重による主曲げモーメントの大きさ(単位 t·m/m)とその方向

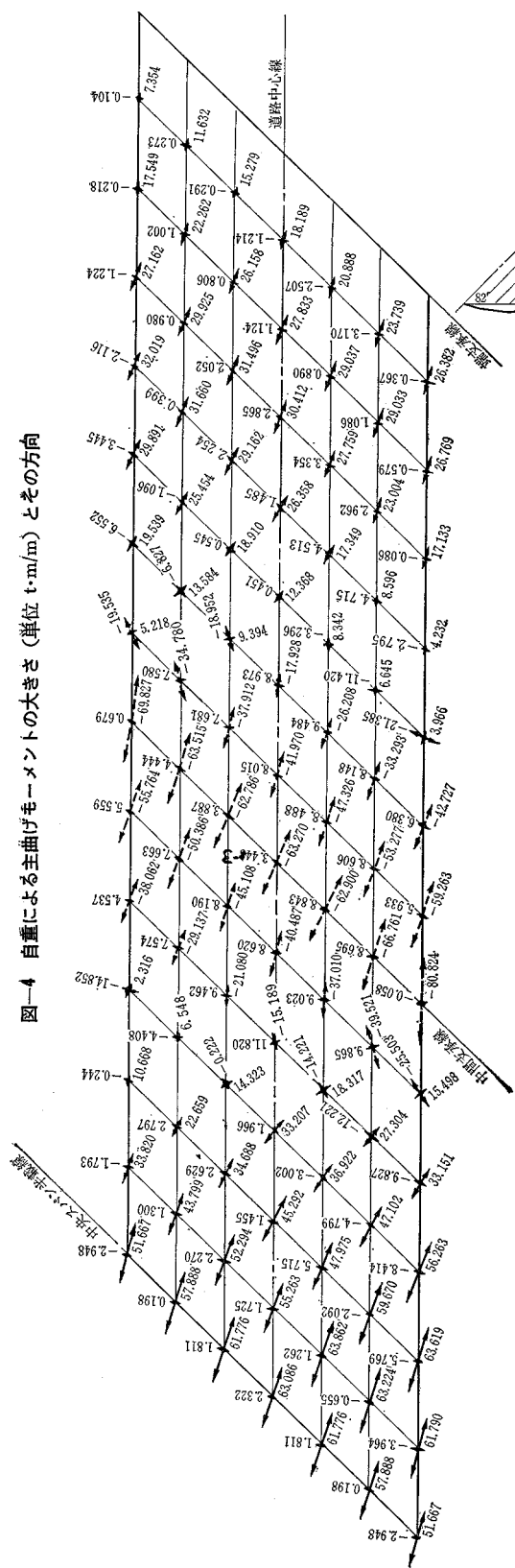
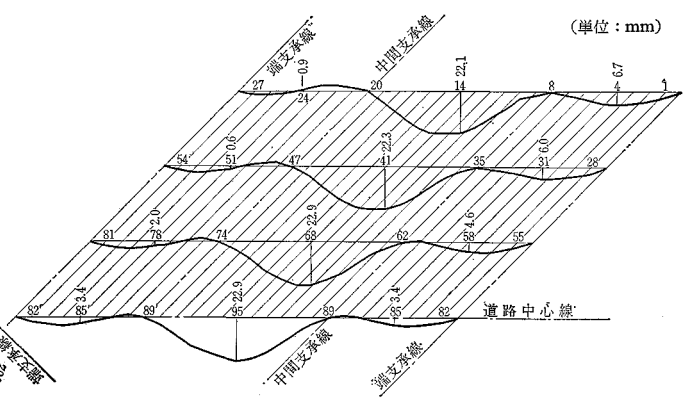


図-5 自重によるたわみ



θ を weight とする加重平均をとった場合の二つの方法がある。単純スラブの場合は両者がほとんど一致するが、連続スラブの場合は、この二つの方法による値が同一でない。それで、前者で設計を進めた。

活荷重としては、線荷重と等分布活荷重とを、さきにもとめた影響面を利用して最も不利な主応力の大きさと方向になるように分布させて集計した。本橋は義経橋の場合よりも、スパン、幅員比が大きいので、図-4 からわかるように、主曲げモーメントは、どちらかといえば中心線よりに向いている。しかも、PSコンクリート橋であるから、主プレストレス鋼線は中心線方向に配置することが望ましいので、おのおの格点の曲げモーメントをすべて中心線方向とそれに直角の方向とに再配分した。

文献1) に述べたように、直交する M_{max} と M_{min} とを、主プレストレス方向 w とそれに直交する u 方向の鉄筋で負担させようとするれば、つぎの計算によればよい。すなわち、 w 方向の負担曲げモーメントを M_w 、 u 方向の負担曲げモーメントを M_u とおいたとき、 M_{max} と M_{min} とが同符号であれば、 M_{max} と w 方向のはさむ角を β とすれば、つぎの式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} M_u \cdot \cos^2 \beta + M_w \cdot \sin^2 \beta &= M_{min} \\ M_u \cdot \sin^2 \beta + M_w \cdot \cos^2 \beta &= M_{max} \end{aligned} \right\}$$

M_{max} と M_{min} とが異符号であれば、上の2式はつぎのように変わる。

$$M_u \cdot \cos^2 \beta = M_{min}, \quad M_w \cdot \cos^2 \beta = M_{max}$$

上式によって主曲げモーメントの方向を主プレストレス方向に再配分できるわけである。

図-4 は自重による主曲げモーメントの大きさとその方向を示すものであり、図-5 は自重によるたわみ図である。

4. 直スラブ橋との比較

直スラブ橋でも、荷重の状態によって、主応力の方向

は、中心線方向 x から横断方向 y へととれる。3 スパンの連続スラブ橋に対して、主曲げモーメントの大きさ、および方向について、田原保二は Anger の表を利用し

表-1 各種の計算法による曲げモーメントの比較

曲げモーメント	解析方法		側スパン		中央スパン	
	方向	格点	25	84	14	95
自重による曲げモーメント (t·m/m)	X方向	斜スラブ理論	17.22	33.63	54.63	69.18
		直スラブ理論	38.68	38.68	79.42	79.42
		樑理論	35.54	35.54	79.33	79.83
	Y方向	斜スラブ理論	-0.09	3.17	-3.12	2.55
		直スラブ理論	0	0	0	0
		樑理論	0	0	0	0
活荷重による曲げモーメント (t·m/m)	X方向	斜スラブ理論	10.28	26.35	25.57	33.24
		直スラブ理論	36.82	38.97	41.58	44.55
		樑理論	40.41	40.41	51.10	51.10
	Y方向	斜スラブ理論	-2.57	2.62	-1.45	3.1
		直スラブ理論	0	1.23	0	1.12
		樑理論	0	0	0	0

図-6 自重による x 軸方向の曲げモーメント

(単位 t·m/m。点線および () 内は、直橋としての値であって、**d** 線だけを表わしているが、**a**、**b** および **c** 線も同様である)

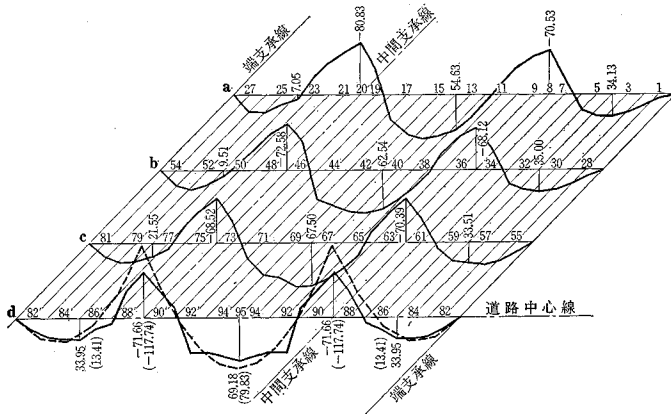


図-7 活荷重による x 軸方向の曲げモーメント

(単位 t·m/m。点線および () 内は、直橋としての値であって、**d** 線だけを表わしているが、**a**、**b** および **c** 線上も同様である)

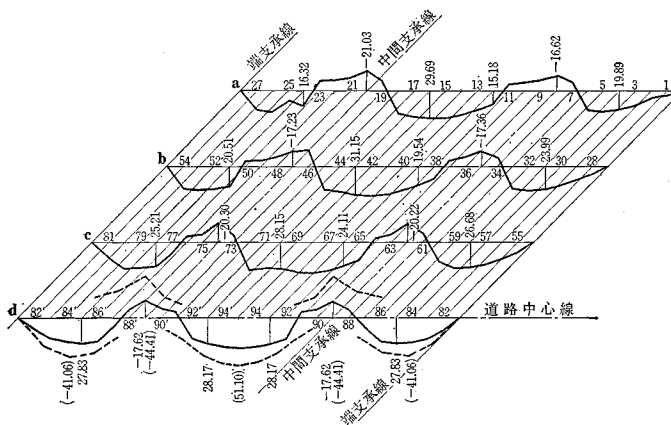
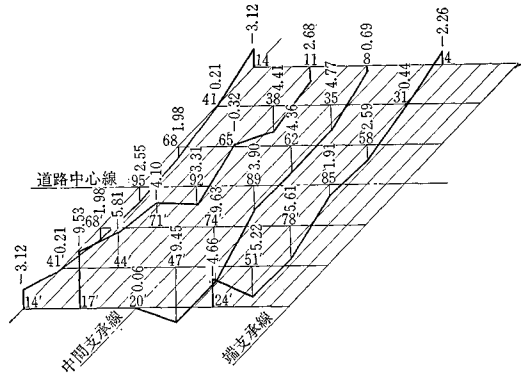


図-8 橋軸に直角方向の死荷重曲げモーメント

(単位: t·m/m)



て、連続ばりの換算スパンを求め、そのスパンに対する単純板について Olsen-Reinitzhuber の表を用いて、スラブの中央点および縁辺上の曲げモーメントを求めているので、その方法によってこれらの点の断面力を求めた。

ただし、この方法は、計算可能な点が限定されているので、3 スパン連続直スラブ橋の曲げモーメントを連続的に求めるために、幅 1 m のけたについて Anger の表を用いて計算した。その結果を表-1 に示す。

本設計では、格点の主曲げモーメントの大きさと方向が求められるので、4. に述べた方法によって、 x 軸方向の曲げモーメントに換算すれば、直橋の場合と比較することができる。

図-6 は自重による曲げモーメントを x 軸方向の幅 1 m 当りの大きさに換算したものであり、直スラブの場合と比較できるようにしてある。図-7 は、活荷重の配置を格点ごとに最大曲げモーメントが生じるようにして求めた曲げモーメントを x 軸方向に換算して図示したものである。

斜スラブ橋の場合、図-7 からわかるように、 x 軸方向にて負担される曲げモーメントは、中間支点上で見ると死荷重に対しては、格点 8, 35, 62, および 89 の順に直スラブ橋の場合の 60%, 58%, 60% および 61% となっている。また、中央スパンの最大値を比較すれば、格点 16, 42, 68, 95 について、直スラブ橋の場合の 86%, 86%, 88% および 88% となっている。

主鉄筋に直角方向の曲げモーメントは、死荷重に対しては図-8 に示す値をとり、

主鉄筋に働らく曲げモーメントに比較して非常に小さい。

活荷重に対して考察すると、格点 8, 35, 62 および 89 の順に、直スラブ橋に比較して、37%, 39%, 46% および 40% である。中央スパンの最大値は格点 16, 42, 68 および 95 について、57%, 62%, 62% および 65% となって、非常に小さな値になってくる。

斜スラブ橋について設計するときは、この方法によること——スラブとして取り扱い、さらに斜角を考慮すること——がいかに有利であるかがわかる。

5. PS コンクリートの設計

PS コンクリートとしての設計に当っては、まず自重によるたわみと応力を求め、つぎに、プレストレスによるそりと応力、およびクリープによるそりと応力を求めて、活荷重が載荷しないときの検討をする。連続構造であるので、支点の拘束に由来する二次応力についても調べなければならない。

プレストレスのクリープによるそりと応力および支点の拘束による二次応力を求めることは、原理的には簡単である。

まず、二次応力を求めるには、Network の両端の支承線だけを支承とし、中間支承点の拘束をとした単純斜スラブとして、中間支承点に相当する格点のたわみと曲げモーメントの影響線を求める。これを利用して、プレストレス P と中立面からの偏心距離 e に基づく曲げモーメント、 $M_x = P \cdot e$ を全部の格点について計算し、これを弾性荷重として、すなわち $(M_x + M_y)/(1 + \nu)N$ (y 方向にはプレストレスをかけないので、ここでは $M_y = 0$ である) を荷重として、先に求めた中間支承点に相当する格点の m_x 、および m_y を集計すれば、 $(m_x + m_y)$ がその点のたわみとなる。先に求めたたわみの影響線を利用して、その点のたわみを 0 にする荷重が逆算されるので、その荷重による曲げモーメントを求めると、それがプレストレスによる二次応力になる。ただし、計算が非常に面倒である。計算値は一応算出されたが、その集計結果のチェックが容易でないので、今回は直げたとしての二次応力の計算値を用いて設計した。計算機が大型化すれば、これは簡単に解決できると考えられる。

プレストレスおよびクリープによるたわみは、3 スパン連続斜スラブとしての本橋の計算結果として得られている曲げモーメント M_x および M_y の影響線を利用する。すなわち、 $\{(M_x + M_y)/(1 + \nu)N\} \times (1 + e^{-\phi})$ を

弾性荷重としたときの曲げモーメント ($m_x + m_y$) を求めればよい。ここに、 ϕ はクリープ係数である。

これもぼう大な計算を必要とし、一応計算したが、大変な労力であった。

このように、PS コンクリートとしての設計には多少の問題点を残したが、主プレストレスの大きさに比較して、二次応力の値は比較的小さいので、実用上の見地からして、今回の設計方法で十分実用的であると考えられる。参考のため、死荷重による応力の絶対値とこの設計に使用した二次応力の大きさおよびこれらの比を求めると、表-2 のようになる。

表-2 直げたとしての二次応力と斜スラブ橋としての死荷重応力

格 点	8	35	62	89	16	42	69	95
二次応力 (kg/cm ²)	14.4	15.9	15.9	15.9	15.9	15.9	15.9	15.9
死荷重応力 (kg/cm ²)	70.5	68.1	70.4	71.7	68.9	68.5	70.0	69.2
二次応力/死荷重応力 (%)	20.4	23.3	22.6	22.2	23.1	23.2	22.7	23.0

以上の計算のもとに、この斜スラブ橋はけた高が 1 m、直径 70 cm の中空部を 90 cm 間隔に 9 本配置し、PC 鋼線として、SWPC7 本より 12.4 mm を 3 段に間隔 90 cm に 10 列配置した。横断方向の応力は非常に小さかったので、SD 30 の異形鉄筋径 25 mm を橋梁中心線に直角方向に 12.5 cm 間隔で配置し、支承線付近では支承線方向に SD 30 異形鉄筋径 25 mm を 12.5 cm 間隔に補強筋として使用した。

6. む す び

PC 3 スパン連続、斜ホーススラブ橋の設計は珍らしいと思われるので、あえて報告する次第である。今後、このような構造が多くなると思うが、参考になるところがあれば幸いである。

この研究に当っては、名大工学部土木工学教室成岡教授のご指導を得た。ここに記して、謝意を表したい。

参 考 文 献

- 1) 山本・西辻・福山・成岡：鉄筋コンクリート斜スラブ橋の設計，土木学会誌，第51巻第10号，p. 22.
- 2) Asim Yeginobali：Continuous Skewed Slabs, Engineering Experiment Station, Collage of Engineering, The Ohio State University Columbus, 1962.
- 3) Anger：Zehnteilige Einflusslinien für durchlaufende Träger, Frederick Anger Publishing Co. New York.
- 4) Olsen・Reinitzhuber：Die zweiseitig gelagerte Platte, Berlin, 1959.

(1967.6.3・受付)