

I-11 不完全合成桁と合成板の 解析理論の相似性について

北海道大学工学部 正員 佐藤 浩一
北海道大学工学部 正員 渡辺 昇
(株) 釧路製作所 正員 井上 稔康

1. まえがき

橋梁における複合構造物の一つに鋼桁とコンクリート床版とを頭つきスタッドジベルで完全に剛に一体として結合した合成桁(完全合成桁という)があるが、ジベルはある間隔で離散的に配置されており、変形するため(ずれが生じるため)完全に一体となった合成桁とはならない(不完全合成桁という)。また、ジベルがなければ鋼とコンクリートとの単なる重ね梁になる。実際の合成桁は完全合成桁と重ね梁の中間の挙動を示す不完全合成桁である。不完全合成桁の解析理論は文献^{1), 2), 3), 4)}に示されており、構造特性を定性的に示しているが、定量的に示していない。

一方、CS橋⁵⁾のように鋼板とコンクリート床版とを用いた合成板においても上述のような不完全合成板となり、完全合成板と重ね板との中間の挙動を示すはずである。不完全合成板の解析理論は文献⁶⁾に示されているが、近似解析理論である。

本報告はこのような不完全合成板のより厳密な解析理論を誘導し、不完全合成桁の解析理論が不完全合成板の解析理論に包含されていることを示し、また、近似解析理論⁶⁾との関係を示すものである。更に、単純支持板(あるいは桁)の場合にコンピュータなしで解析ができ、定量的に構造特性を求めることができるように、無次元化して β なる減少率と γ なる増加率を導入したのでその詳細を示すものである。

2. 不完全合成板の解析理論の誘導(偏微分方程式の誘導)

図-1は本解析で用いる合成板を示している。また、本報告で用いる記号は次の通りである。

A_c : コンクリート床版の単位幅あたりの断面積、 A_s : 鋼板の単位幅あたりの断面積、 $A_u = A_s + A_c/n$: 鋼板に換算した単位幅あたりの合成断面積、 $D_u = E I_u / (1 - \nu^2)$: 合成板の曲げ刚性、 E_c : コンクリートのヤング係数、 $E_s = E$: 鋼のヤング係数、 I_c : コンクリート床版のその重心Cに関する単位幅あたりの断面二次モーメント、 I_s : 鋼板のその重心Sに関する単位幅あたり断面二次モーメント、 $I_u = I_s + I_c/n + A_u \cdot S_c \cdot S_s$: 鋼板に換算した合成断面の単位幅あたりの断面二次モーメント、 K : 単位長さあたりのジベルのばね定数、 $n = E_s/E_c$: 鋼とコンクリートとのヤング係数比、 $M_{uux}, M_{uuy}, N_{uux}, N_{uuy}$: 完全合成板の単位幅あたりの曲げモーメントと軸力、 $M_{uux}, M_{uuy}, N_{uux}, N_{uuy}$: 不完全合成板の単位幅あたりの曲げモーメントと軸力、 W_u : 完全合成板のたわみ、 W_o : 不完全合成板のたわみ、 $W_o = W_u - W_u$ 、 $\alpha = 1 - \beta$ 、 β : 減少率(完全合成板あるいは桁に対する)、 γ : 増加率(完全合成板あるいは桁に対する)、 δ_x, δ_y : ずれ量、 ν : ポアソン比。

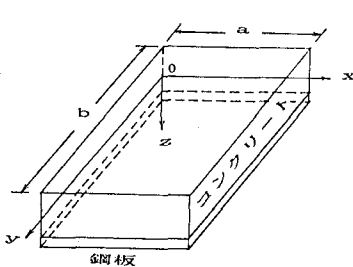


図-1(a)

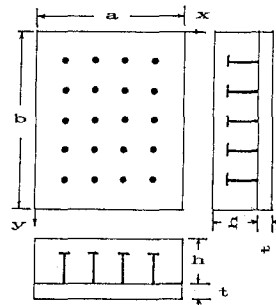


図-1(b)

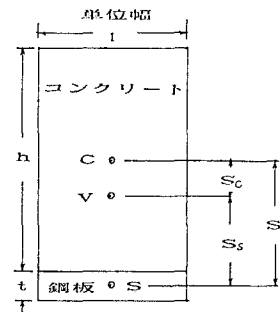


図-1(c)

次のように考えて不完全合成板の解析理論を誘導する。

(1) 完全合成板のたわみを W_u とし、合成板の曲げ剛性を D_u とすれば、

$$\nabla^2 \nabla^2 W_u = \frac{p}{D_u} \quad (1a) \quad \text{ここで} \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \quad (1b)$$

また、曲げモーメント M_{uux} , M_{uuy} は

$$M_{uux} = -D_u \left(\frac{\partial^2 W_u}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 W_u}{\partial y^2} \right), \quad M_{uuy} = -D_u \left(\frac{\partial^2 W_u}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 W_u}{\partial x^2} \right) \quad (1c)$$

$$\text{従って、} \quad M = \frac{M_{uux} + M_{uuy}}{1 + \nu} = -D_u \left(\frac{\partial^2 W_u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_u}{\partial y^2} \right) \quad (1d)$$

$$\text{とおけば} \quad \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 M}{\partial y^2} = -p, \quad \frac{\partial^2 W_u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_u}{\partial y^2} = -\frac{M}{D_u} \quad (1e)$$

これらの式は、いずれも表面に垂直な荷重を受ける薄膜のたわみの偏微分方程式と同形である。式(1d)のような M を考えれば、ねじりモーメント M_{uuxy} を直接用いなくても、たわみに関する偏微分方程式を誘導することができる。

(2) 剛に結合された普通の合成断面を考える。曲げモーメント M_{uux} が作用している時の合成板の曲率はジベルの弾性変形を考慮した時のたわみを W_{ue} とすれば

$$\frac{1}{\rho_x} = \frac{M_{uux}}{D_u} = - \left(\frac{\partial^2 W_{ue}}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 W_{ue}}{\partial y^2} \right) \quad (2a)$$

コンクリート部に作用する応力の総和 N_{uex} は、圧縮力を正とすると

$$N_{uex} = \frac{A_c S_c}{n I_u} M_{uux} \quad (3a)$$

同様に、曲げモーメント M_{uuy} が作用している時の合成板の曲率は

$$\frac{1}{\rho_y} = \frac{M_{uuy}}{D_u} = - \left(\frac{\partial^2 W_{ue}}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 W_{ue}}{\partial x^2} \right) \quad (2b)$$

コンクリート部に作用する応力の総和 N_{uey} は、圧縮力を正とすると

$$N_{uey} = \frac{A_c S_c}{n I_u} M_{uuy} \quad (3b)$$

(3) コンクリート床版重心に圧縮力 N_{2x} 、 N_{2y} 、鋼板重心に引張力 N_{2x} 、 N_{2y} を作用させてやる。コンクリート床版と鋼板とが絶縁されていれば、曲率はそのまま、コンクリート床版と鋼板とに歪みの食い違いができる。この量は単位長さあたり

$$\epsilon_x = \left\{ \frac{n}{EA_c} + \frac{1}{EA_s} \right\} N_{2x} = \frac{n S}{EA_c S_c} N_{2x} \quad (4a)$$

$$\epsilon_y = \left\{ \frac{n}{EA_c} + \frac{1}{EA_s} \right\} N_{2y} = \frac{n S}{EA_c S_c} N_{2y} \quad (4b)$$

また、 N_{2x} 、 N_{2y} によって与えられる曲げモーメントは

$$M_{2x} = S \cdot N_{2x} \quad (5a)$$

$$M_{2y} = S \cdot N_{2y} \quad (5b)$$

結局、断面に作用する全モーメント M_{uux} , M_{uuy} とコンクリート部の応力の総和の N_{uux} , N_{uuy} は

$$M_{uux} = M_{uux} + M_{2x}, \quad M_{uuy} = M_{uuy} + M_{2y} \quad (6a), (6b)$$

$$N_{uux} = N_{uex} + N_{2x}, \quad N_{uuy} = N_{uey} + N_{2y} \quad (7a), (7b)$$

(4) この状態で、コンクリート床版と鋼板を x , y 方向に δ_x , δ_y だけずらせる。ずれに抵抗する T_{uux} , T_{uuy} は弾性的なジベルによって起こり、ジベルのバネ定数 K を使って次の形に考える。

$$T_{uux} = K \delta_x, \quad T_{uuy} = K \delta_y \quad (8a), (8b)$$

ジベルに作用する力は、コンクリート断面の圧縮力の増加分に見合うから

$$\frac{\partial N_{uux}}{\partial x} = T_{uux}, \quad \frac{\partial N_{uuy}}{\partial y} = T_{uuy} \quad (9a), (9b)$$

また、ずれの量 δ_x, δ_y は式(4)の歪みの x, y 方向に加算されて生ずるから

$$\frac{\partial \delta_x}{\partial x} = \varepsilon_x, \quad \frac{\partial \delta_y}{\partial y} = \varepsilon_y \quad (10a), (10b)$$

これが、弾性的なジベルを考慮する場合の基本的な関係である。

式(1)～式(10)までの関係を使って、

$$w^2 = K \frac{n I_u}{n I_s + I_c} \frac{n}{E A_c} \frac{S}{S_c} \quad (11)$$

とおき、ジベルの弾性変形を考慮した場合の平板の変形 W_u で整理すれば

$$D_u \nabla^2 \nabla^2 W_u - D_u w^2 \nabla^2 W_u = -w^2 D_u \nabla^2 W_u + \frac{n I_u}{n I_s + I_c} p \quad (12)$$

式(12)に ∇^2 を施せば

$$D_u \nabla^6 W_u - D_u w^2 \nabla^4 W_u = -w^2 p + \frac{n I_u}{n I_s + I_c} \nabla^2 p \quad (13)$$

式(12)あるいは式(13)が不完全合成板（ジベルの弾性変形を考慮した合成板）のたわみに関する偏微分方程式である。

次に、不完全合成板の場合のたわみ W_u を次の2つの和と考える。

$$W_u = W_u + W_e \quad (14)$$

ここで、 W_u は完全合成板の場合のたわみである。

式(14)を式(12)に代入すれば

$$D_u \nabla^4 W_u + D_u \nabla^4 W_e - D_u w^2 \nabla^2 W_e = p - p + \frac{n I_u}{n I_s + I_c} p \quad (15)$$

式(15)は次の2本の偏微分方程式になる。

$$\nabla^4 W_u = \frac{p}{D_u} \quad (16)$$

$$\nabla^4 W_e - w^2 \nabla^2 W_e = -\frac{p}{D_e} \quad (17)$$

$$\text{ただし、} D_e = D_u \frac{n I_s + I_c}{A_c S_c S} \quad (18)$$

式(17)は曲げと面内荷重 $D_e \cdot w^2$ を受ける平板に対する基礎偏微分方程式と同形である。

以上より、不完全合成板の変形は、完全合成板の変形 W_u (式(1)) と式(14)で示されるような平板の変形 W_e との代数和で計算される。応力も完全合成板の応力と W_e の変形に見合う応力分布との代数和である。

従って、不完全合成板のたわみ、単位幅あたりの曲げモーメント、単位幅あたりの軸力、単位幅あたりのジベルに作用する水平せん断力を求めると次のようになる。

$$W_u = W_u + W_e = W_u \cdot (1 + \gamma) \quad (19)$$

$$M_{uuex} = M_{uux} + M_{uex} = M_{uux} + \frac{D_u}{D_e} M_{eex} = M_{uux} \cdot (1 + \gamma) \quad (20b)$$

$$M_{uuey} = M_{uuy} + M_{uey} = M_{uuy} + \frac{D_u}{D_e} M_{eey} = M_{uuy} \cdot (1 + \gamma) \quad (20b)$$

$$N_{uux} = \frac{A_c S_c}{n I_u} (M_{uux} - M_{eex}) = \frac{A_c S_c}{n I_u} M_{uux} \cdot (1 - \beta) \quad (21a)$$

$$N_{uuy} = \frac{A_c S_c}{n I_u} (M_{uuy} - M_{eey}) = \frac{A_c S_c}{n I_u} M_{uuy} \cdot (1 - \beta) \quad (21b)$$

$$T_{uux} = \frac{A_c S_c}{n I_u} (Q_{uux} - Q_{eex}) = \frac{A_c S_c}{n I_u} Q_{uux} \cdot (1 - \beta) \quad (22a)$$

$$T_{uu_{ey}} = \frac{A_c S_c}{n I_u} (Q_{uu_{yy}} - Q_{ee_{yy}}) = \frac{A_c S_c}{n I_u} Q_{uu_{yy}} \cdot (1 - \beta) \quad (22b)$$

$$\text{ここで、} M_{ee_{xx}} = -D_e \left(\frac{\partial^2 W_e}{\partial x^2} + \nu \frac{\partial^2 W_e}{\partial y^2} \right), \quad M_{ee_{yy}} = -D_e \left(\frac{\partial^2 W_e}{\partial y^2} + \nu \frac{\partial^2 W_e}{\partial x^2} \right) \quad (23a)$$

$$Q_{uu_{xx}} = -D_u \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 W_u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_u}{\partial y^2} \right), \quad Q_{uu_{yy}} = -D_u \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 W_u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W_u}{\partial x^2} \right) \quad (24a)$$

$$Q_{ee_{xx}} = -D_e \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial^2 W_e}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 W_e}{\partial y^2} \right), \quad Q_{ee_{yy}} = -D_e \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial^2 W_e}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 W_e}{\partial x^2} \right) \quad (25a)$$

である。上式における β, γ は次のような意味を持っている。 β は完全合成板の軸力(N_{uu_x}, N_{uu_y})およびジベルに作用する水平せん断力(T_{uu_x}, T_{uu_y})に対する減少率を表しており、 γ は完全合成板のたわみ(W_u)および曲げモーメント(M_{uu_x}, M_{uu_y})に対する増加率を表している。

β と γ および α との関係は次式のようになり、非常に重要なパラメータである。

$$\beta = \frac{D_e}{D_u} \gamma, \quad \gamma = \frac{W_e}{W_u} = \frac{D_u}{D_e} \beta, \quad \alpha = 1 - \beta \quad (26)$$

従って、たわみは勿論のこと、曲げモーメント、軸力、せん断力等の計算に β, γ を用いるので収束が速く、より精度良く求めることができる。また、この β, γ は不完全合成板の構造特性を求める場合の無次元化に有効である。なお、 $\beta = \gamma = 0$ の場合は完全合成板であり、 $\beta = 1, \gamma = D_u/D_e$ の場合は重ね板であり、その中間が不完全合成板である。また、種々の荷重条件、境界条件に対する完全合成板のたわみ(W_u)、曲げモーメント(M_{uu_x}, M_{uu_y})、せん断力(Q_{uu_x}, Q_{uu_y})などは文献³⁾に記載されているのでそれを利用すればよく、 β と γ を求めるだけで不完全合成板の計算は可能である。パソコンで十分計算できる。

3. 近似解析理論⁶⁾との関係について

コンクリート厚 h に比べて、鋼板厚 t が十分小さいとすれば、

即ち、 $A_u \rightarrow A_c/n, S \rightarrow 0.5 \cdot h, S_c \rightarrow 0, S_s \rightarrow S \rightarrow 0.5 \cdot h, I_s \rightarrow 0$ とし、

$$C = \frac{E'_s A_s}{E_c A_c} = \frac{E'_s t}{E_c h}, \quad \text{とおけば} \quad D_u \div \frac{E'_c h^3}{12} (1 + 3C), \quad (27)$$

$$\frac{n I_u}{n I_s + I_c} \div 1 + 3C, \quad w^2 \div (1 + 3C) \cdot (1 + C) \frac{K}{E'_s t} \div (1 + 4C) \frac{K}{E'_s t} \quad (28)$$

となり、式(13)に代入すれば、

$$\frac{E'_c h^3}{12 (1 + C)} \left[\frac{E'_s t}{K} \nabla^6 W_{u0} - (1 + 4C) \nabla^4 W_{u0} \right] = -p + \frac{E'_s t}{K (1 + C)} \nabla^2 p \quad (29)$$

となり、近似解析理論⁶⁾になる。

4. 不完全合成桁との関係について

式(16),(17)において、 $\nabla^4 W_u \rightarrow W_u^{(4)} = d^4 W_u / d x^4, \nabla^4 W_e \rightarrow W_e^{(4)} = d^4 W_e / d x^4, \nabla^2 W_e \rightarrow d^2 W_e / d x^2$ とすれば、即ち、 y に関する項を零とすれば不完全合成桁の場合の常微分方程式となる^{2), 4)}。前述の β, γ も同様に定義することができる。

5. 数値計算例

本報告は図-1に示すような厚さ $t = 0.6\text{cm}$ の鋼板に、厚さ $h = 13\text{cm}$ のコンクリートを頭つきスタッドジベルで合成した完全合成板および不完全合成板として、長方形板に対するナヴィエ (Navier) の2重フーリエ級数を用いて解析した。断面諸元の算定にあたり、(イ)全断面(合成断面の全断面を有効と考えた場合)、(ロ)有効断面(合成断面の引張部分を無視した場合)の二ケースを考えた。ヤング係数比 $n = 7$ とし、 $a = 50\text{cm}, b = 50\text{cm}$ 、単位長さあたりのジベルのばね定数 $K = 1000\text{kg/cm}^2$ (かなり小さい値を仮定した)、 $p = 10\text{kg/cm}^2$ の等分布満載荷重、項数は5項とした。表-1は合成板の中央点のたわみ、単位幅あたりの曲げモーメント(x 方向)、単位幅あたりの軸

力(x方向)の値を示したものである。表-1よりわかることは完全合成板および不完全合成板(全断面および有効断面とも)曲げモーメントと軸力との間に次式が成立している。

$$(n I_s + I_c) / (n I_u) \cdot M_0 + S \cdot N_0 = M_{uux} \quad (30)$$

このことは釣合っていることを示している。また、不完全合成板は完全合成板に比べて、全断面および有効断面ともたわみと曲げモーメントが増加し、軸力が減少していることがわかる。これらの減少率や増加率は次のようにしてたわみの比 (W_0/W_u) より求めることができる。一例として、表-1の不完全合成板の全断面の場合の値は、式(26)より β と γ を求めて、

表-1 等分布満載荷重による中央点の値

		W_0 (cm)	M_0^* (kgcm)	N_0^* (kg)
完全合成板	全断面	0.002334	1199	78.4
	有効断面	0.002636	1199	120.1
不完全合成板	全断面	0.003836	1959	16.4
	有効断面	0.005980	2662	51.5

* 単位幅あたり

完全合成板の場合の値を用いれば、求めることができる。この場合、 $\beta=0.8031$ 、 $\gamma=0.6435$ となり、 $W_u=0.002334\text{cm}$ 、 $M_{uux}=1199\text{kgcm/cm}$ であるから、これらの値を式(19)~(21)に代入すれば、 $W_{u0}=0.003836\text{cm}$ 、 $M_{uux}=1970\text{kgcm/cm}$ 、 $N_{uux}=15.34\text{kg/cm}$ となる。表-1の値は曲げモーメントおよび軸力を直接求めたものであり(項数は5項)、わずかではあるが精度が悪いことがわかる。後述の図-3を用いれば、 $wa=2.175$ 、辺比 $b/a=1.0$ であるから、 $\beta \approx 0.80$ が求まる。また、 $a=b=100\text{cm}$ とした場合、断面諸元を同じにしても、 wa が大きくなるから β と γ が小さくなることがわかる。次に、参考までに文献³⁾の p.337 より W_u 、 M_{uux} を求めてみれば、 $W_u=0.00406 \cdot p \cdot a^4 / D_u=0.002332\text{cm}$ 、 $M_{uux}=0.0479 \cdot p \cdot a^2=1197.5\text{kgcm/cm}$ 、 $N_{uux}=A_c S_c / (n I_u) \cdot M_{uux}=78.3\text{kg/cm}$ となる。これらの値を式(19)~(21)に代入すれば、 $W_{u0}=0.003833\text{cm}$ 、 $M_{uux}=1968\text{kgcm/cm}$ 、 $N_{uux}=15.4\text{kg/cm}$ となり、上記の値とほぼ一致することがわかる。

6. 不完全合成板(および桁)の構造特性

図-1のような合成板を考える。

本解析では、鋼板厚 t 、コンクリート厚 h 、を与えれば、断面諸元が求まり、 a 、 b を与えれば解析可能である。しかしながら、これらの値が任意で不完全合成板の構造特性求めるには次のような無次元化が必要である。式(11)で与えられる w と辺長 a との積 wa (無次元量) と前述の β (無次元量) との関係の求めればよい。ここでは中央点での関係のみを取り扱う。

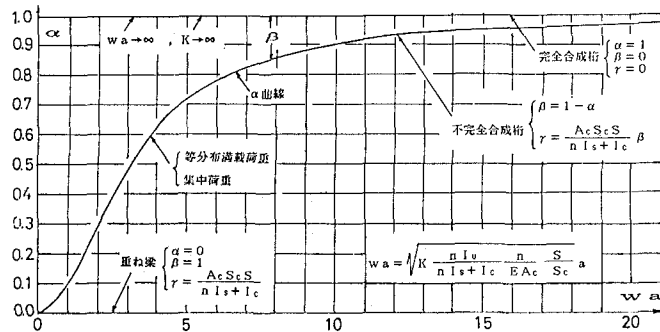


図-2 不完全合成桁の α 曲線

荷重は等分布満載荷重(項数は11項)と集中荷重(項数は41項)の二種類とした。断面諸元の算定には全断面と有効断面の二ケースを考えた。辺比は $b/a=1.0 \sim 3.0$ とした。

1) 不完全合成桁の α 曲線

板の辺長 b を単位長さとするれば、スパン a の桁になる。桁の場合の解析はフーリエ級数を用いず、普通の桁理論と吊橋の撓度理論の解を用いた。図-2は縦軸に $\alpha (=1-\beta)$ をとり、横軸に wa をとり、 wa に対する α 曲線を求めたものである。図-2よりわかることは、二種類の荷重状態、また、二種類の断面に関係なく、 α 曲線はほとんど一致している。

2) 不完全合成板の α 曲線

図-3は等分布満載荷重の場合の α 曲線であり、図-4は集中荷重の場合の α 曲線である。両図より等分布満載荷重の場合の α が大きいことがわかる。また、全断面と有効断面の場合の α はほとんど同じであり、辺比(b/a)が大きくなれば、 α が大きくなることもわかる。次に、図-2, 3, 4における α 曲線の使い方を述べる。まず、式(11)の w を求め、辺長 a を乗じ、 α を求め、 $\beta = 1 - \alpha$ なる β を求める。この β に D_u/D_v を乗じ γ を求める。 wa から一義的に β は決まるが、 γ は一義的には決まらない。計算から β と γ を求める時は最初に γ を次に β を求める。この β と γ を式(19)~(22)に代入すれば、たわみ、曲げモーメント、軸力、ジベルに作用する水平せん断力が簡単に求まる。

7. あとがき

本研究で得られた結論は次の通りである。

1. 不完全合成板の解析理論を誘導し、不完全合成桁の場合を包含していることを示した。
2. 不完全合成板の近似解析理論⁶⁾との関係を明確にすることができた。
3. 完全合成板(あるいは桁)と不完全合成板(あるいは桁)と重ね板(あるいは梁)との関係を示すため、無次元化して、たわみの比(W_0/W_u)のみを用いる β なる減少率と γ なる増加率を導入した。従って、収束が速く、精度良く解を求めることができる。 $\beta = \gamma = 0$ の場合は完全合成板(あるいは桁)であり、 $\beta = 1$ 、即ち、 $\gamma = D_u/D_v$ の場合は重ね板(あるいは梁)であり、その中間が不完全合成板(あるいは桁)である。
4. 完全合成板(あるいは桁)の解析に構造力学公式集³⁾を用い、上述の β と γ を用いれば、コンピュータなしで単純支持の場合の不完全合成板(あるいは桁)の解析が可能である。
5. 平板(あるいは桁)について構造力学公式集³⁾に記載されている種々の荷重条件、境界条件に対し、全く同様にして β と γ のみを求めれば、不完全合成板(あるいは桁)としての解析が可能である。なお、計算はPC-9801VM2を用い、MS-FORTRANで行った。

(参考文献) 1) A. ハウラネック/0. シュタインハルト: 鋼橋の理論と計算(橋 善雄、小松定夫共訳)、山海堂、1965。 2) 島田静雄、熊沢周明: 合成桁の理論と設計、山海堂、1973。 3) 構造力学公式集、土木学会編、1986。 4) 佐藤浩一、渡辺昇: 差分方程式の剛性マトリックス解析法について、土木学会北海道支部論文報告集、第44号、pp.87-92、1988。 5) 渡辺昇、井上稔康: CS橋の開発的研究—鉛直突起板の設計について、鋼パネル板のリブの設計について—、土木学会北海道支部論文報告集、第43号、pp.31-36, pp.37-42、1987。 6) J. L. CLARKE, C. T. MORLEY: Steel-concrete composite plates with flexible shear connectors, Proc. Instn Civ. Engrs, Vol. 53, Part 2, pp. 557-568, Dec., 1972。 7) 横田敏幸、佐藤浩一、渡辺昇、井上稔康: CS橋の頭つきスタッドジベルの解析と実験、土木学会北海道支部論文報告集、第44号、pp.65-68、1988。

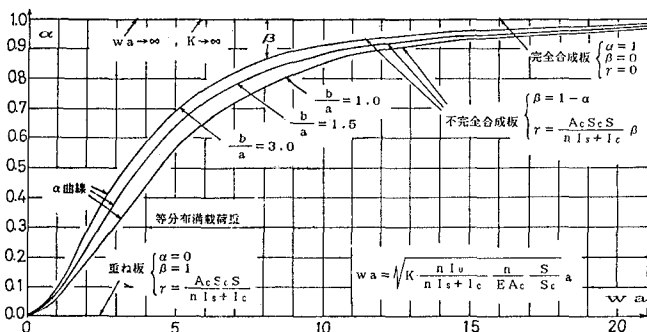


図-3 不完全合成板の α 曲線(等分布満載荷重の場合)

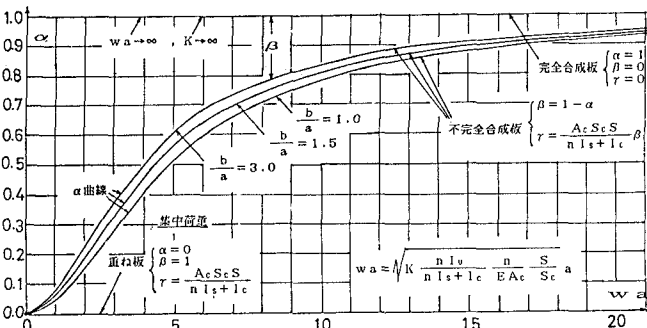


図-4 不完全合成板の α 曲線(集中荷重の場合)