

道路橋鋼板・コンクリート合成床版のスタッドに働くせん断力の解析と実験***

THEORETICAL ANALYSIS AND EXPERIMENT FOR SHEARING FORCE ON STUDS

IN A STEEL PLATE AND CONCRETE COMPOSITE SLAB FOR BRIDGE DECK

堀川都志雄* 園田恵一郎**

by Toshio HORIKAWA and Keiichiro SONODA

A collocation method based on a thick plate theory is used to analyze shearing force on studs in a steel plate and concrete composite slab (so-called Robinson's slab) under a wheel load.

It is confirmed that the results obtained by the method coincide with the experimental results for model slabs. The maximum shearing forces on studs obtained for a model bridge slab by the present method, the method of effective width based on a fully composite theory and the formula by ECCS respectively are compared with each other, considering the effects of spacing of studs and stiffness in the load-slip relation of studs.

1 ま え が き

道路橋鉄筋コンクリート床版(以下、RC床版と略称する)の製作および施工の省力化あるいは耐荷力の増大のために、鋼板とコンクリートからなる合成床版やPC床版を型枠とする合成床版等がRC床版の代替として開発され、すでに2, 3の実施例が報告されている^{1), 2)}。RC床版に比べて大きな鋼断面を有する合成床版の曲げ耐力は大きく、その破壊性状は鋼板とコンクリートとの付着せん断破壊が支配的であるといわれている。合成床版では鋼板とコンクリートとを一体化させるためにずれ止めが設けられているが、ずれ止めに関する計算方法や設計基準は未だ確立されていない。著者らはこのようなずれ止めの設計に際して、薄板理論におけるせん断力に着目したせん断有効幅を提案し、鋼板とコンクリートがスタッドのみで合成されるいわゆる Robinson 型の合成床版のスタッドに働くせん断力の算定法を示した³⁾。しかしながら、このせん断有効幅は鋼板とコンクリートが板全域に渡ってずれがない完全合成の状態すなわちずれ止めの剛性が高くかつ十分に配置されている場合を対象としているために、スタッド間隔が広いあるいはスタッドの変形を考慮する場合には、スタッドのせん断力は過大に見積られることになる。一般に、Robinson 型床版の合成作用はある間隔で配置されたスタッドによって発揮されるが、スタッドの溶植部の面積が小さいために、鋼板とコンクリートとのせん断力の伝達は局所的な挙動を伴うことになる。そこで、合成作用の解明には3次元理論による解析が必要である。しかし、有限要素法による3次元解析で、このような合成床版の荷重点近傍の変形や応力および鋼板とコンクリートとの付着せん断応力を精度よく求めることは、膨大な計算労力と費用を費やさねばならない。

* 工博 大阪工業大学講師 土木工学科 (〒535 大阪市旭区大宮5-16-1)

** 工博 大阪市立大学教授 工学部土木工学科 (〒558 大阪市住吉区杉本3-3-138)

*** 本論文は合成構造の活用に関するシンポジウム講演論文集, 土木学会, 1986年9月に発表した内容をまとめたものである。

本研究では、輪荷重のような局所荷重の下での Robinson 型の合成床版の挙動とスタッドに働くせん断力を調べるために、厚板理論（3次元理論）による級数解⁴⁾を用いて、離散的に配置されるスタッド位置で鋼板とコンクリートを連続させるいわゆる選点法による解析を行った。一方、スタッド間隔を変化させた実験床版（長辺2^m、短辺1^m、版厚11^{cm}、鋼板厚9^{mm}）を作製し、実験結果と解析結果の比較から本解析法の妥当性を検討した。また、実橋のモデル床版を対象に解析を行い、完全合成理論によるせん断有効幅³⁾や ECCS の提案式⁵⁾から得られるスタッドに働くせん断力の値の妥当性についても検討した。

2 選点法による解析方法

本方法は任意の微小領域内で物理量が分布する場合、この物理量が領域内で一様であると仮定しかつ領域内の中央に代表点を設け、連続する物理量を離散点での物理量で代表させる方法である。

板Ⅰと板Ⅱが点 $i(x_i, y_i)$ ($i=1, s$)で接合し、他の点 $j(x_j, y_j)$ ($j=1, s$)で x, y, z 方向の伝達力 X_j, Y_j, Z_j ($j=1, s$)が双方の板に作用する場合を考えてみる（図-1）。

点 i での板Ⅰの下面の変位 u_i^I は

$$2\mu_I u_i^I = Pd_x^I + \sum_j (X_j a_{jx}^I + Y_j b_{jx}^I + Z_j c_{jx}^I) \quad (1)$$

また、同一点での板Ⅱの上面の変位 u_i^{II} は

$$2\mu_{II} u_i^{II} = \sum_j (X_j a_{jx}^{II} + Y_j b_{jx}^{II} + Z_j c_{jx}^{II}) \quad (2)$$

ここに、 $a_x^I \sim c_x^{II}$ ：板ⅠおよびⅡの力 X_j, Y_j, Z_j による変位の影響係数、

d_x^I ：板Ⅰの単位荷重による変位の影響係数、

μ_I, μ_{II} ：板ⅠおよびⅡのせん断弾性係数

板ⅠとⅡが点 i で接合する場合、例えば x 方向の変位の連続条件はずれ量 Δu を考慮すると

$$u_i^I = u_i^{II} + \Delta u_i \quad (3)$$

例えば、ずれ量とせん断力の関係について、J.G. Ollgaard ら⁶⁾は Push-out 試験の結果から、次の関係式を提案している。

$$X/X_u = 3.15\Delta u / (1 + 3.15\Delta u) \quad (4)$$

ここに、 Δu ：ずれ量、 X ：スタッドに働くせん断力、 X_u ：スタッドの静的せん断強度

また、 y 方向の変位についても同様の関係式が得られる。

板ⅠとⅡが s 個の接合点で連続しているとすれば、接合点に働く伝達力に関する式が得られる。

$$FQ = P + \Delta U \quad (5)$$

ここに、 F ：板ⅠおよびⅡの柔性マトリックス、 Q ：接合点に働く伝達力ベクトル

P ：荷重による変位ベクトル、 ΔU ：ずれ量を表す変位ベクトル

3 厚板理論による基本解

3次元弾性論の Galerkin vector と Boussinesq の関数は、物体力を無視すると次式で示される。

$$\Delta \Delta W = 0, \quad \Delta \theta = 0 \quad (6)$$

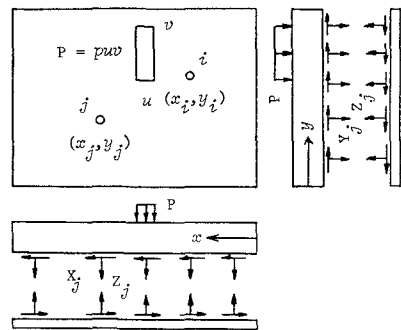


図-1 選点法の概要

ここで、 $\Delta = \partial^2/\partial x^2 + \partial^2/\partial y^2 + \partial^2/\partial z^2$

x, y, z 方向の変位 u, v, w と関数 W, θ との関係式は

$$\begin{aligned} 2\mu u &= -\partial^2 W / \partial x \partial z + \partial \theta / \partial y \\ 2\mu v &= -\partial^2 W / \partial y \partial z - \partial \theta / \partial x \\ 2\mu w &= 2(1-\nu)\Delta W - \partial^2 W / \partial z^2 \end{aligned} \quad (7)$$

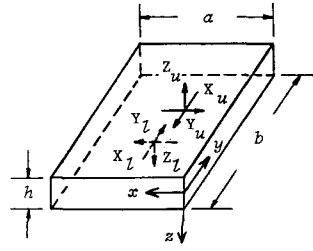


図-2 板の形状

ここに、 $\mu = E/2(1+\nu)$: せん断弾性係数、 ν : ポアソン比
式(6)を全周単純支持された板(図-2)に適用すれば、

$$\begin{aligned} W &= \sum_m \sum_n \{ C_1 \text{sh} \gamma z + C_2 \text{ch} \gamma z + \gamma z (C_3 \text{sh} \gamma z + C_4 \text{ch} \gamma z) \} \sin \alpha x \sin \beta y \\ \theta &= \sum_m \sum_n (C_5 \text{sh} \gamma z + C_6 \text{ch} \gamma z) \cos \alpha x \cos \beta y \end{aligned} \quad (8)$$

ここで、 $\alpha = m\pi/a, \beta = n\pi/b, \gamma^2 = \alpha^2 + \beta^2, m, n$: フーリエ級数の項数、 $\text{sh} \gamma z = \sinh \gamma z, \text{ch} \gamma z = \cosh \gamma z, C_1 \sim C_6$: 板の上・下面の境界条件より決定される積分定数
式(8)を(7)に代入すれば変位が得られる。例えば、変位 w は次のようになる。

$$\begin{aligned} 2\mu w &= -\sum_m \sum_n [C_1 \text{sh} \gamma z + C_2 \text{ch} \gamma z + C_3 \{ \gamma z \text{sh} \gamma z - 2(1-2\nu) \text{ch} \gamma z \} \\ &\quad + C_4 \{ \gamma z \text{ch} \gamma z - 2(1-2\nu) \text{sh} \gamma z \}] \gamma^2 \sin \alpha x \sin \beta y \end{aligned} \quad (9)$$

他の変位 u, v も同様にして得られ、さらにフックの法則より応力が求められる。

板の上・下面に図-2の荷重が作用している場合、上・下面での境界条件は

$$\begin{aligned} z = -h/2 \quad ; \quad \sigma_z &= Z_u, \quad \tau_{xz} = X_u, \quad \tau_{yz} = Y_u \\ z = h/2 \quad ; \quad \sigma_z &= Z_l, \quad \tau_{xz} = X_l, \quad \tau_{yz} = Y_l \end{aligned} \quad (10)$$

式(10)に応力 σ_z, τ_{xz} および τ_{yz} の式を代入すれば、式(8)の積分定数が得られる。さらに、これらの積分定数と式(9)より、変位 w の影響係数が求められる。他の変位 u, v の影響係数も同様にして得られる。

4 解析結果と実験結果の比較

厚さ 9 mm の鋼板に $\phi 13 \times 80$ の頭付きスタッドを溶植し、鋼板とコンクリートとの自然付着による影響を除去するために、鋼板の上面に薄いビニールシートを敷き詰めた後、コンクリートを打設して Robinson 型の実験床版(長辺 2 m、短辺 1 m、全版厚 11.9 cm)を作製した、用いたスタッド間隔は短辺方向を 150 mm で一定とし、長辺方向を 75, 100, 150 mm の 3 種類とした(表-1)。

面積 $50 \text{ cm}^2 \times 20 \text{ cm}^2$ のゴムパッドを介して集中荷重を一樣に分布させる載荷状態は、図-3に示す2つの載荷形式である。a) は支持辺に最も近いスタッドの前列と荷重端部とを一致させており、せん断力が卓越する状態であり、b) は荷重中心が床版の中央にある場合で曲げによる影響が支配的になる。

スタッドの溶植部で鋼板にスリット(長さ 5 cm、幅 2 mm)を設け、スリット間にひずみゲージを貼付することによって鋼板の面内力を算定する。スタッドに働くせん断力は力のつりあい条件より鋼板の面内力から求めた。また、床版の端部に設置された Π ゲージの値から、鋼板とコンクリートとのずれ量を計測した。

表-1 各供試体のスタッド
間隔 (mm)

供試体	短辺方向	長辺方向
A	150	75
B	150	100
C	150	150

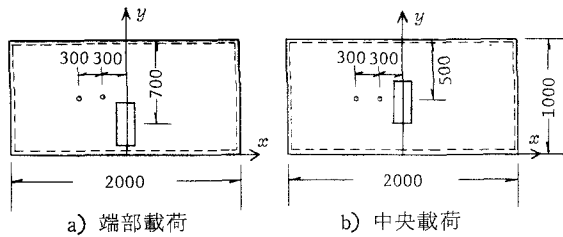
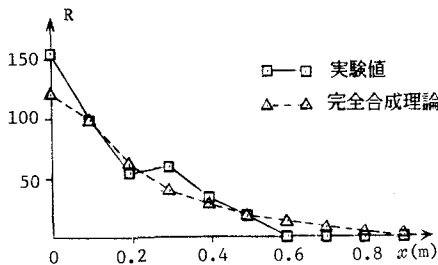


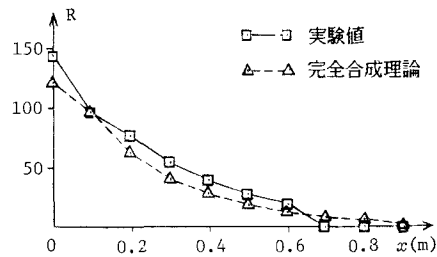
図-3 荷重形式とたわみ測定位置

1) 長辺方向に沿う反力の分布

端部荷重時での供試体 A, B の長辺方向の支持辺に沿う反力の分布を図-4 に示す。 実線は実測結果で、破線は鋼板とコンクリートが完全合成される場合の 3 次元解析の結果を表している。



a) 供試体 A



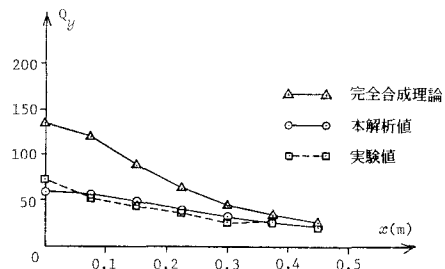
b) 供試体 B

図-4 反力の分布 (kgf / tf)

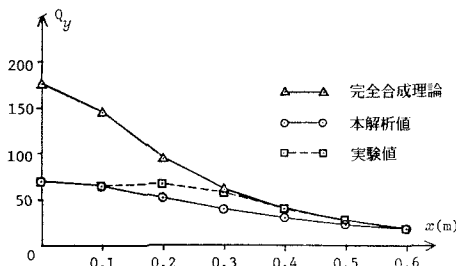
2) スタッドに働くせん断力 Q_y

端部荷重時の荷重面端部のスタッドに作用するせん断力の長辺方向の分布を図-5 に示す。

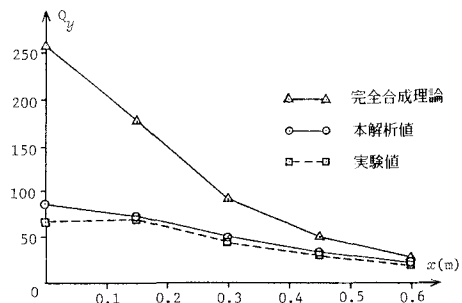
図中、破線は実測値で、実線はずれがない場合の本解析法の値および完全合成時の理論値 (文献4) の方法から求められるせん断応力にスタッド間隔の積を乗じて得た) である。 いずれの供試体においても本解析法の値は実験値によく一致しているが、完全合成の理論値はスタッド間隔が広い程実験値との差は顕著になる。



a) 供試体 A



b) 供試体 B



c) 供試体 C

図-5 スタッドに働くせん断力 (kgf / tf)

3)床版の曲げ剛性

床版中央点でのたわみに着目し、床版の合成率を次式により定義する。

α = (δ₀ - δ_m) / (δ₀ - δ₁) ——— (11)

ここに、δ_m：実験での測定値，δ₁：完全合成の理論値，δ₀：非合成（重ね板）の理論値

表－2 たわみの測定値（mm / tf）

a) 端部載荷				b) 中央載荷			
供試体名	測 点 (mm)			供試体名	測 点 (mm)		
	0	300	600		0	300	600
完全合成板*	0.021	0.015	0.008	完全合成板*	0.026	0.019	0.010
A	0.021	0.017	0.011	A	0.025	0.025	0.009
B	0.028	0.021	0.013	B	0.029	0.029	0.016
C	0.028	0.022	0.021	C	0.034	0.032	0.024
非合成板*	0.053	0.039	0.020	非合成板*	0.067	0.049	0.025

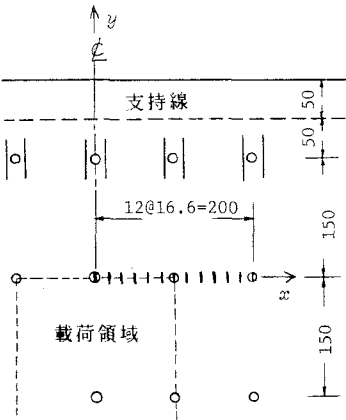
＊）厚板理論による計算値

表－3によれば、スタッド間隔が75mmの床版はいずれの載荷形式に対しても完全合成に近い状態にあるが、スタッド間隔が広くなるにつれて合成率の低下がみられる。

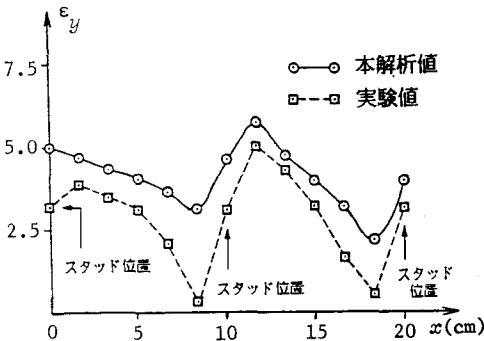
4)スタッド近傍での鋼板のひずみ

スタッド近傍における合成床版の挙動を調べるために、鋼板の下面のスタッド線上にひずみゲージを貼付した（図－6）。短辺方向のひずみの測定結果を図－7に示す。

本解析による値は実測値より大きいが、ひずみの分布形状は定性的によく一致している。また、スタッド近傍でひずみの値はかなり変化していることが伺われ、この原因はスタッド位置での局所曲げとスタッド間でのシャーラグ（shear lag）による影響のためであろうと思われる。



図－6 スタッド間のゲージ位置



図－7 スタッド近傍での鋼板下面のひずみ（10⁻⁶ / tf）

5) スタッドのせん断力とずれ量の関係

IIゲージによるずれ量とスタッドに働くせん断力との関係を図-8に示す。

図-8によれば、供試体A, Bとも初期のずれ係数はほぼ $50 \times 10^4 \text{ kgf/cm}$ 程度であるが, J.G. Ollgaard⁶⁾ の Push-out 試験の結果から得られたずれ係数(式(4))における係数 $X/\Delta u$ は, 本実験よりも小さくなっている。すなわち, Push-out 試験のスタッドよりも合成床版の場合の方がずれ抵抗は大きいと推測される。

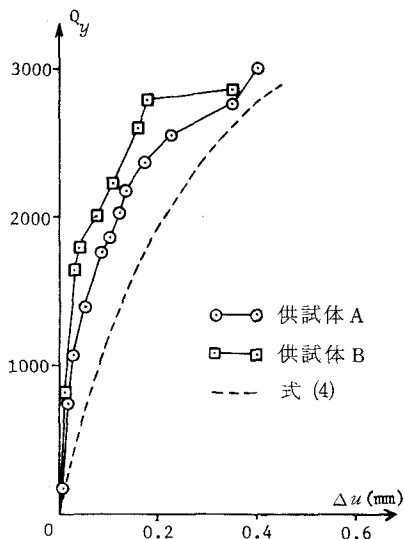


図-8 スタッドのせん断力と
ずれ量の関係

5 実橋モデル床版でのスタッドに働くせん断力の評価

主桁上で単純支持とする1:3の一方向版に後輪荷重(面積 $50 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$)が作用する実橋床版のモデル¹⁾(支間長 2 m , 橋軸方向長さ 6 m , コンクリート厚さ 15 cm , 鋼板厚 6 mm)を例に, 2つの載荷状態の下でのスタッドに働くせん断力を算定する(図-9)。

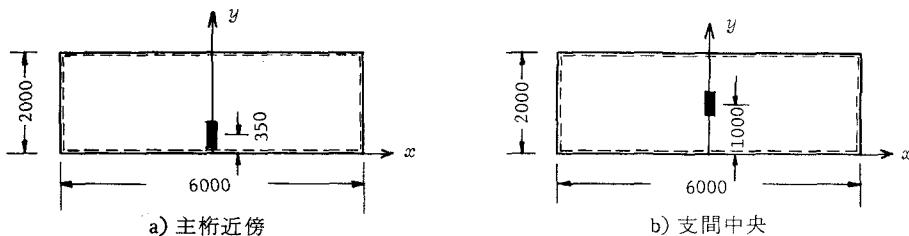


図-9 実橋床版のモデル

x, y 方向のスタッド間隔を λ_x, λ_y とし, λ_x の変化によるせん断力を図-10に示す。

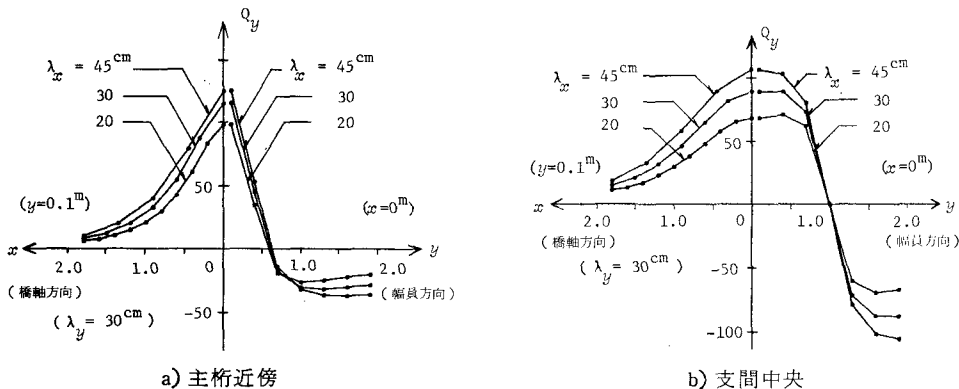


図-10 スタッド間隔によるせん断力の比較 ($\lambda_y = 30 \text{ cm}$; kgf/tf)

ずれ係数K（せん断力とずれ量の関係が線形であると仮定したときの係数：kgf/cm）を考慮する場合のスタッドに働くせん断力の比較を図-11,12に示す。図-11は輪荷重が主桁近傍にある場合で、図-12は支間中央にある場合の結果を表している。

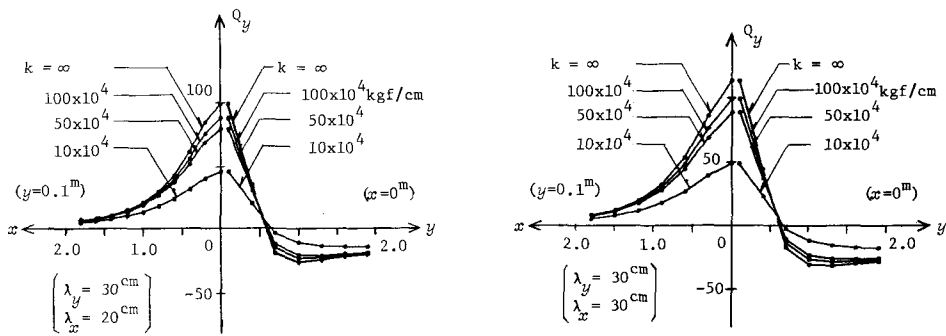


図-11 ずれ係数によるせん断力の比較（主桁近傍；kgf/tf）

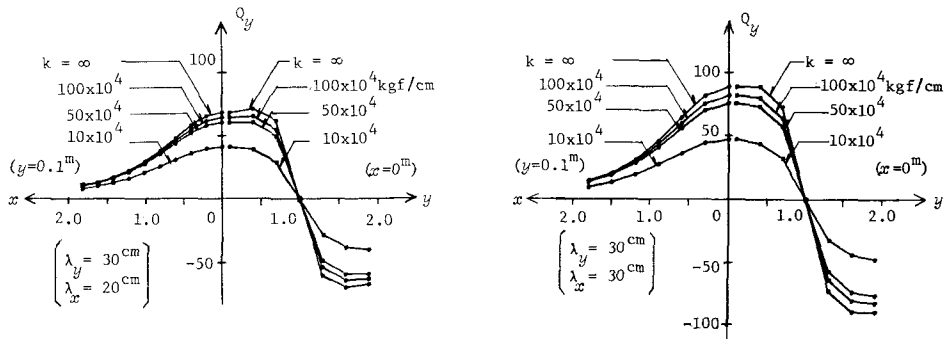


図-12 ずれ係数によるせん断力の比較（支間中央；kgf/tf）

ずれ係数Kの低下に伴って、スタッドのせん断力の最大値は次第に減少し、例えば、ずれ係数が $50 \times 10^4 \sim 10 \times 10^4 \text{ kgf/cm}$ であれば、ずれがない場合（ $K = \infty$ ）に比べて最大値は約80～46％に逓減する。

つぎに、a)完全合成理論に基づくせん断有効幅³⁾とb)ECCSの提案式⁵⁾によるスタッド1本当りのせん断力と本解析法から得られる結果とを検討する。a)およびb)の両提案式でのスタッドのせん断力は、はりの慣用公式を用いて求められる。

$$Q_y = \frac{SG}{Ib} \times \lambda_x \lambda_y \quad \text{--- (12)}$$

ここで、b：a)およびb)の有効幅，
S：着目点のせん断力，
 λ_x, λ_y ：x，y方向のスタッド間隔，
G，I：ひびわれない断面の断面1次および2次モーメント

支間長2^mの合成床版でのa)およびb)から得られる有効幅の比較を表-4に示す。

スタッド間隔 $\lambda_x = 20 \text{ cm}$ ， $\lambda_y = 30 \text{ cm}$ の場合のスタッドに働くせん断力の最大値を表-5に、また $\lambda_x = 30 \text{ cm}$ ， $\lambda_y = 30 \text{ cm}$ の場合についての比較を表-6に示す。

表-4 有効幅の比較（cm）

荷重位置	ECCS	文献3)*
主桁近傍	79	65
支間中央	100	65

*) 平均有効幅

表-5 スタッドに働くせん断力の最大値 ($\lambda_x=20^{cm}$, $\lambda_y=30^{cm}$; kgf/tf)

荷重位置	ECCS	文献3)	本 解 析			
			k=∞	k=100×10 ⁴ kg f / cm	k=50×10 ⁴ kg f / cm	k=10×10 ⁴ kg f / cm
主桁近傍	368	445	96.9	85.9	77.8	44.4
支間中央	176	270	70.2	64.5	59.7	40.6

表-6 スタッドに働くせん断力の最大値 ($\lambda_x=30^{cm}$, $\lambda_y=30^{cm}$; kgf/tf)

荷重位置	ECCS 文献 3)	本 解 析			
		$k=\infty$	$k=100 \times 10^4 \text{ kg f/cm}$	$k=50 \times 10^4 \text{ kg f/cm}$	$k=10 \times 10^4 \text{ kg f/cm}$
主桁近傍	551 667	114.0	99.8	89.0	48.8
支間中央	264 404	88.7	81.6	75.5	47.3

6 結 論

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) Robinson 型の合成床版のスタッドに働く最大せん断力に対して、選点法による本解析値は実験値によく一致していた。
- 2) たわみ（剛性）から見てほとんど完全合成と思われる密なスタッド間隔の場合でも、スタッドに働く最大せん断力は完全合成理論による値よりも小さい。
- 3) 完全合成理論によるスタッドの最大せん断力はスタッド間隔の積に比例して大きくなるが、選点法による本解析の結果ではスタッド間隔の影響は鈍感である。
- 4) スタッドのせん断力による変形、すなわち鋼板とコンクリートとのずれはスタッドの最大せん断力を軽減させるが、スタッドのずれ係数Kが 50×10^4 kgf/cm 以上になれば、その影響は鈍感になる。
- 5) 完全合成理論に基づくせん断有効幅³⁾やECCSの提案式⁵⁾を用いて、スタッドに働くせん断力を計算すれば実際に働くせん断力よりも過大な値を与える。

参 考 文 献

- 1) 新津啓治, 浅島弘光, 大貫一生, 落合正利: 鋼製型枠合成床版を用いた合成桁の設計・施工, 橋梁と基礎, 昭和55年11月, pp.42-49.
- 2) 今井宏典, 園田恵一郎, 水元義久, 正田正一: P C埋設型枠を用いた道路橋床版の特性, 土木学会論文集, No. 356/I-3, 1985年4月, pp.565-573.
- 3) 園田恵一郎, 堀川都志雄, 広瀬清泰: 道路橋鋼板・コンクリート合成床版のずれ止めの設計に関するせん断有効幅, 土木学会論文報告集, No. 338, 1983年, pp.1-9.
- 4) 園田恵一郎, 堀川都志雄: 道路橋床版の輪荷重直下の応力の算定について, 土木学会論文報告集, No. 273, 1978年, pp.15-22.
- 5) European Convention for Construction Steelwork, Composite Structure, The Constructure Press, London, 1981, p.146.
- 6) J.G. Ollgaard, R.G. Slutter and J.W. Fisher, Shear strength of the stud connectors in lightweight and normal-weight concrete, AISC Eng. Jour., No.5, 1971, Apr., pp.55-64.
(1986年10年17日受付)