

リブ付軽量床板の載荷および振動実験

三 谷 勝 之
磯 畑 脩
高 橋 和 男

§ 1. はじめに

より経済的な構造物を設計するために構造物の軽量化ということは、技術の発達とともに当然進められていく1つの方向である。

床構造に関してもより軽いもの、よりスパンの大きいものが作られる傾向にある。

しかしながらそれに付随してたわみの検討、振動の検討などの面倒な問題が起きてくる。すなわち、在来の床構造では強度設計のみで十分であったものが、大スパンかつ軽量となってくるとたわみおよび振動障害¹⁾が設計を決める重要な要素となる。

われわれの行なった軽量床の実験に関連して、そのたわみ計算および振動計算についての検討結果を以下に示すことにする。

ここに挙げるリブ付軽量床板もやはり軽構造、大スパンを目的とした床構造であるが、床板としての剛性を高めるために鋼リブ (OPEN WEB STEEL JOIST—以下単に JOIST と呼ぶ) を一方向に多く架け、その上に軽量床材を打設あるいは敷設するところに特徴があり欧米、特に米国において

- (1) 構造部材の軽量化
- (2) 工期の短縮
- (3) 施工性の簡便

が可能で、かつ優れた剛性その他多くの利点を備えているため広く使用されている。

このたび、当研究所では八幡エコンスチール株式会社からの共同実験の依頼により、リブに JOIST を用いた軽量 (キーストンプレートに軽量コンクリートを打設) 実大床板を作成し剛性を調べるための載荷実験を行なった。また、振動に関してもその性質を調べるため振動実験も併せて行なった。

そして、その実験結果の解析に当って実大床板を直交異方性板と置いて考えた計算結果がほぼ適合できること

が判った。

ここにリブ付軽量床板の実大実験の報告とともに直交異方性板としての計算方法とその結果を併せて載せ、その静的および動的力学特性を明らかにするものである。

§ 2. 実大床板実験

実大床板は、リブとして米国アルムコ社 20J-7 JOIST(10mスパン)を用いて八幡製鉄建材開発部相模原研究開発室敷地内に作成し、実験は昭和42年12月7、8日(載荷実験、振動実験第1回)、12月20日(振動実験第2回)の2回にわたって行なった。

2.1 JOIST 概要

20J-7 JOIST の概略、諸元を図-1、表-1に示す。

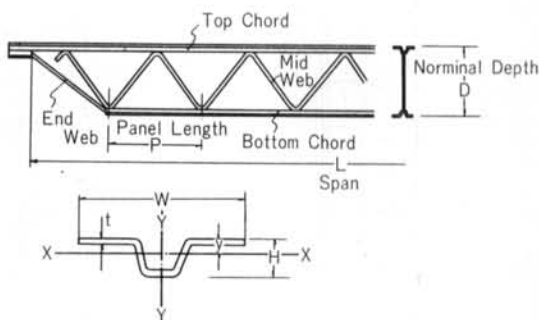


図-1 JOIST 概略

Chord 材	Wcm	Hcm	t cm	Area cm ²	Web 材	mmφ
Top Chord	12.33	3.10	0.556	8.19	End Web	20.68
Bottom Chord	11.11	2.54	0.478	6.12	Mid Web	19.84

Normal Depth D50.8cm Joist Moment Inertia 8,450cm⁴
Panel Length P61.0cm Span L 944cm

表-1 JOIST 諸元

2.2 床板概要

設置した床板の概略を 図-2~図-4 に表わす。床板は9m,760×9m,760の正方形板で JOIST は60cm間隔に合計15本架けられている。床構法はH形鋼に JOIST を架け、その上にキーストプレート(長尺角山型#28)を敷き(写真-1参照),軽量コンクリート(LC120)を打設したものである。その他、JOIST 相互間の振れ止めの鉄筋溶接,軽量コンクリートの亀裂防止のワイヤメッシュ使用などの考慮が払われている。

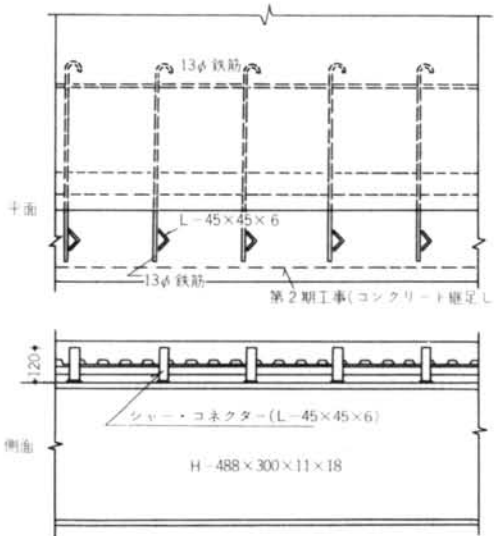


図-4 B部詳細

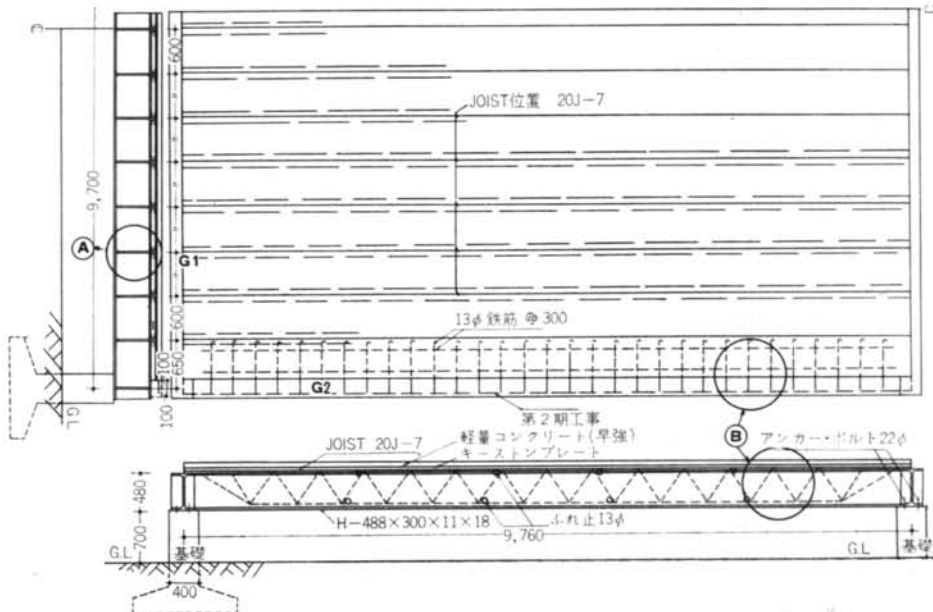


図-2 床板概略図

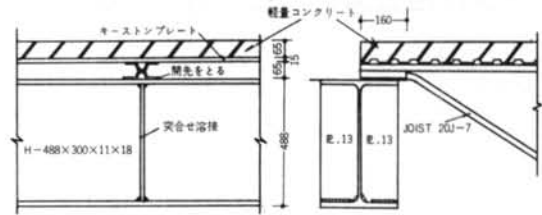


図-3 A部詳細



写真-1 JOIST 架構後キーストプレート敷設状況

2.3 実験方法

2.3.1 載荷実験

床板上に設置した水そうに加水して載荷を行ない、床板下のTCL型変位計およびダイヤルケージ型変位計にてたわみを読みとった。その測定概略を 図-5 に示し、

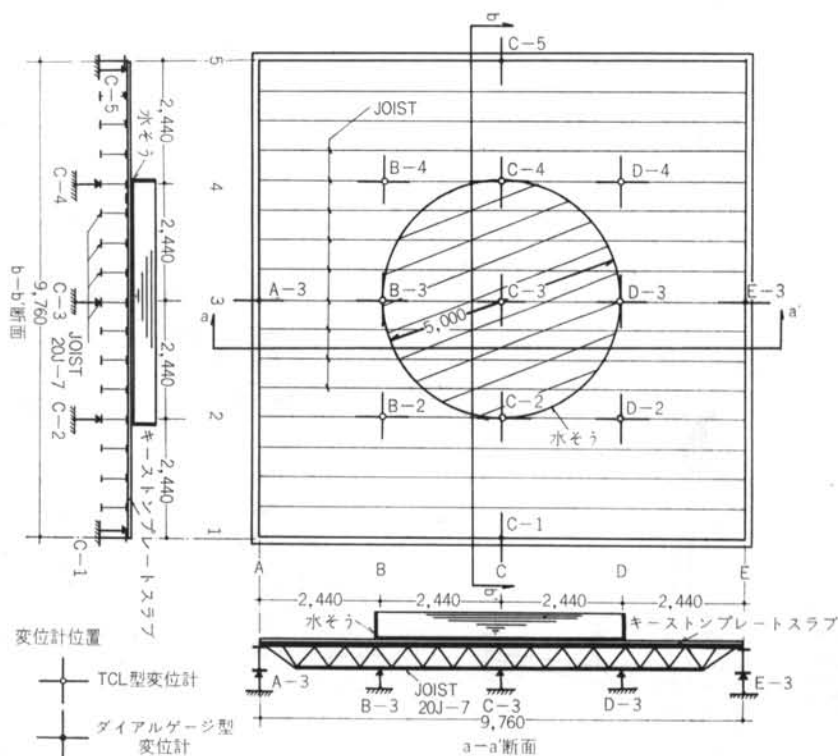


図-5 測定概略図

実験状況を写真-2に表わす。

なお、加水による荷重速度は大体10cm/hourで初めの1日で荷重、1晩おいて次の1日で除荷した。

2.3.2 振動実験

(第1回)無荷重の床板について固有振動数および減衰定数を衝撃試験にて求め、また床板上を人間が歩行する時、床板そばの道路を自動車通過するときなどの振動性状も併せて調べた。

(第2回)第1回の床板固有振動数実測値と計算値の一致しない原因を調べるため行なったもので、床板直角2

方向の振動モードの測定が主体である。なお、この測定は床板自由辺にシャーコネクターおよび鉄筋を利用してコンクリートを詰め周辺の固定度をわずかでも高めた状態で行ない、その効果も調べた。図-2、図-4において第2期工事とあるのはこれに該当する。

振動実験には小型起振機、振動計(明石製作所AVL1型、AVL-3型)、ペン書きオッシロ(渡辺測器型WTR201-C型、WTR203-C型)を使用した。

2.4 実験結果

2.4.1 荷重実験結果

図-6は中央(C-3)とJOIST支台H型鋼(A-3、E-3)のたわみを表わしたものであるが床板中央のたわみに対して30%(絶対たわみとの比較では50%近くになる)を占めており、床板支持大梁の変形としてはかなり大きい。

図-7は直角2方向のたわみ性状を表わしたものであり、明らかにその性状はお互いに趣きを異にしている。すなわち、JOIST方向(A-3~E-3)のたわみ図は放物線状に、そしてJOISTと直角方向(C-1~C-5)のたわみ図はほぼ折線状に見られる。



写真-2 JOIST 実大スラブ全景一満水の水そう

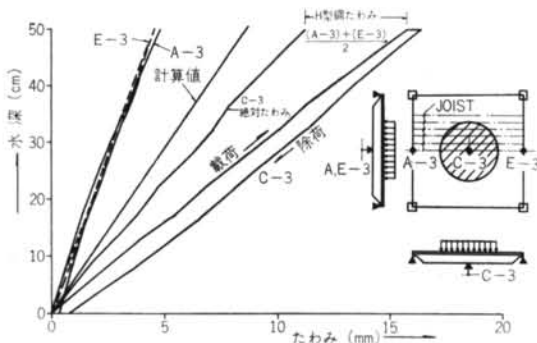


図-6 荷重-たわみ曲線

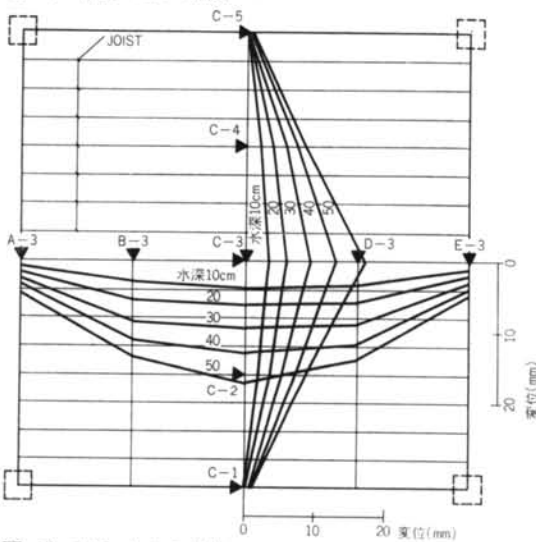


図-7 荷重-たわみ曲線

2.4.2 振動実験結果

(第1回)表-2は無載荷時の床板の各振動を測定したもので、その程度は一般に広く用いられている F. J. Meister の人体感覚曲線によると、常時微動は問題ないにしても車輛通過時、人間歩行時の振動が有感域に入った。この原因としては床板固有振動数が低く(図-8参照)かつ床板が軽いことその他に仕上材のないなどが挙げられよう。

リブ付軽量床板の固有振動数; fn は

$$fn = \frac{\pi}{2L^2} \cdot \sqrt{\frac{Elm \cdot g}{w}} \quad \dots\dots(1)$$

Elm ; JOIST 合成梁の曲げ剛性×JOIST 数

w ; 単位重量

から算出するのが適当と考えられている。²⁾ 上式によって計算した値は JOIST 合成梁 (JOIST 1本とキーストンプレート・コンクリートとの合成梁) の固有振動数と一致するはずである。しかしながら別途に行なった JOIST 合成梁の実験結果では 9.0c.p.s. であり、これに比べると床板の 5.6c.p.s. は不当に低過ぎる。この原因については第2回の床板振動モード測定によって明らかになったので詳細はそこに述べる。

なお、無載荷時の床板減衰常数は 0.008 で、一般の床板の 0.02~0.12 に比べはるかに小さいが、単一支持板であることおよび仕上材その他積載物による減衰要素のないことが主な原因である。

(第2回)図-9は床板の衝撃実験記録で、記録から算出される固有振動数、減衰常数共その値は第1回のそれ

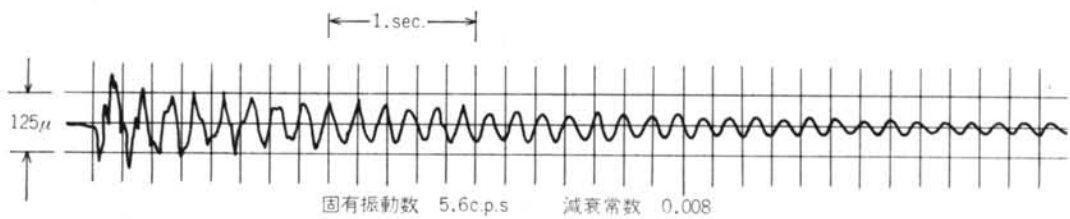


図-8 衝撃実験記録 (第1回)

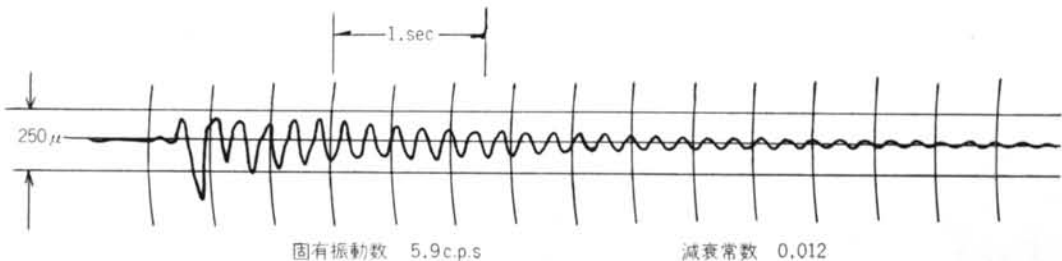


図-9 衝撃実験記録 (第2回)

	振動数 c.p.s	最大振幅 μ	最大加速度 gal
常時微動	5.6	2.4*	0.3*
車輻通過	10.0	11.0	4.4
人間歩行	5.4	187.5	21.8

*平均振幅, 平均加速度

表-2 振動測定結果(第1回)

を上回っている(固有振動数は5%, 減衰常数は50%増加)。したがって床板自由辺にコンクリートを詰め, 床板の周辺固定度を高めた効果が現われている。

さて, 起振機による振動モードの測定であるが, まず今回の JOIST 床板において考えられる直交異方性板の振動モードを3次まで図示する(図-10)。1次モードは先に述べた単純支持梁の(1)式で表わされるもので, JOIST 合成梁の固有振動数と一致し床板では一番低い振動数となる。以下2次, 3次と振動数はモードに応じて順次高くなっていく。

図-11に示した今回の振動モード測定結果では, 共振振動数 6.0c.p.s. のモードは明らかに図-10に示された2次モードであって本来は JOIST 合成梁の固有振動数 9.0c.p.s. より高いはずである。しかし, 結果は逆に低くなって, この原因として単純支持となるべき JOIST 端部(すなわち支台の型鋼で図-1ではA-3)が床板

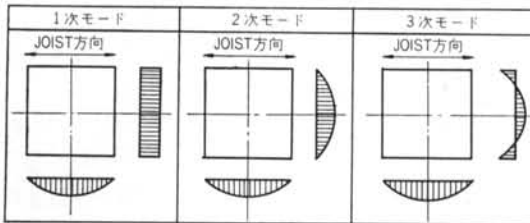


図-10 直交異方性板振動モード

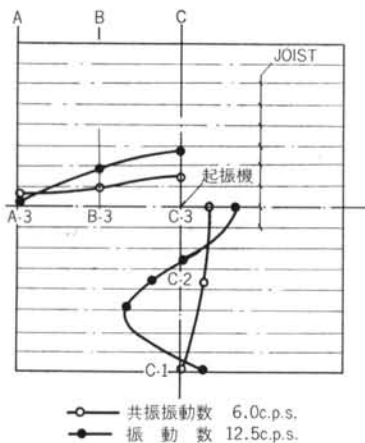


図-11 振動モード測定結果(第2回)

と一体になってたわみ振動している事実が挙げられる。これは現われた振動が床板とH型鋼との連成振動であることを意味し, そのため固有振動数が低くなったと推察される。このことは, 2質点の振動系と置いて解いた計算結果から確かめられた。

§ 3. たわみ, 振動計算および考察

リブに JOIST を用いた実大床板の実験では, 今まで述べたように, たわみに関しては直角2方向でその性状が違い, 振動に関しては(1)式がうまく適合しなかった。

ここでは, リブ付軽量床板のたわみ, 振動計算に対して, これを直交異方性板と置いて解析した結果が実験結果と良く適合したため, その方法および結果を述べる。

3.1 たわみ計算および考察

図-12のように板をSなる網目にて分割した時, k点に関する板の方程式は定差方程式を用いて(2)式で表わされる。

$$Dy\{(W_m + W_n) + 2(W_{l+1} + W_{l-1} + W_{l+1} + W_{l-1}) - 8(W_l + W_k) - 4(W_{+1} + W_{k-1}) + 14W_k\} + Dx\{(W_{k+2} + W_{k-2}) - 4(W_{k+1} + W_{k-1}) + 6W_k\} = Pk \cdot S^4 \quad \dots\dots\dots(2)$$

Dy; y方向の曲げ剛性(コンクリート) = $Eh^3/12$

Dx; x方向の曲げ剛性(JOIST 合成梁)

Pk; k点における荷重

S; $a/12 = b/12 = 81.7\text{cm}$

a; x方向スパン = 976cm

b; y方向スパン = 976cm

この1次式を各点について作成し, 連立方程式として

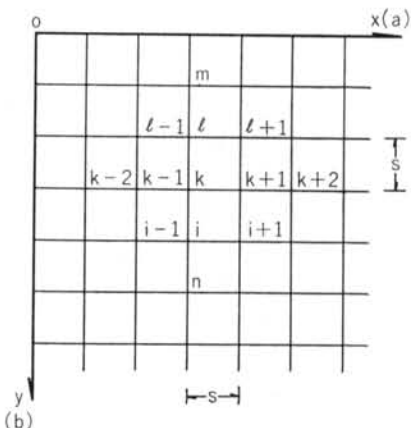


図-12

各点のたわみを解くものである。

ここで、 y 方向の曲げ剛性; Dy におけるコンクリート厚 h はキーストンプレーートの凹凸およびキーストンプレーートの等価厚を考慮した値で7.87cmとなる。また、 x 方向の曲げ剛性 Dx は前に述べたように、別途に行なった JOIST 合成梁の実験から逆算せられた値を利用した。 Dy と Dx との比は54:1である。

さて、このリブ付床板のたわみ計算では比較検討を行うため、床板の境界は

- ・ 2対辺支持 2対辺自由 (実験はこれに該当する)
- ・ 周辺支持

の2とおりを考え、荷重についても

- i 水そう荷重 (実験荷重)
- ii 等分布荷重
- iii 中央集中荷重

の3つを考えた。

したがって境界条件は

2対辺支持, 2対辺自由では

$$x = 0, a \text{ では } w = 0, Mx = 0,$$

$$y = 0, b \text{ では } My = 0, \frac{\partial w}{\partial y} = 0$$

周辺支持では

$$x = 0, a \text{ では } w = 0, Mx = 0,$$

$$y = 0, b \text{ では } w = 0, My = 0$$

を満足する。

計算結果は荷重別にまとめ中央2方向のたわみを図で表わした。

図-13は水そう荷重によるたわみで、実験結果は、 x, y 2方向共その性状は計算値とよく一致している。なお図中の実験値は支台 (H型鋼) のたわみを取り除いて表わしている。同じく床板中央の絶対たわみと計算値との比較を図-6に示したが、その違いは計算上の誤差より

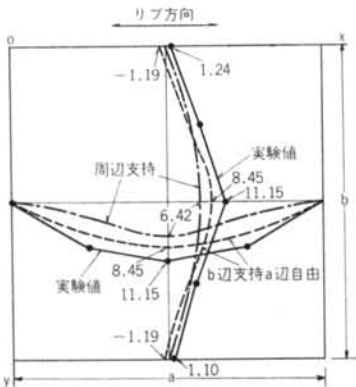


図-13 たわみ計算結果 (水そう荷重; 水深50cm—単位; mm)

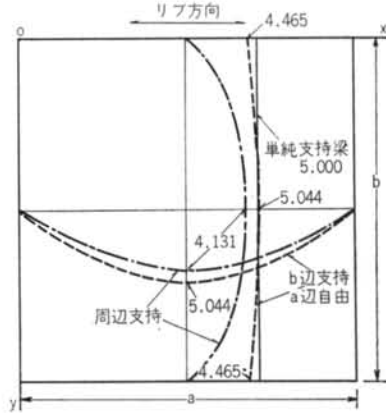


図-14 たわみ計算結果 (等分布荷重—単位; $P_0 \cdot S^2/Dy$)

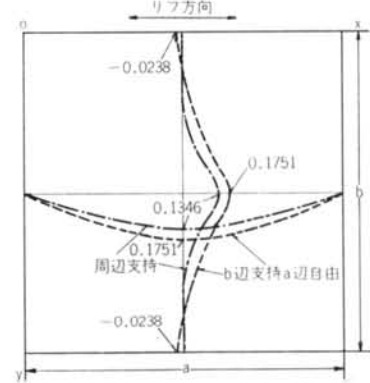


図-15 たわみ計算結果 (中央集中荷重—単位; $P \cdot S^2/Dy$)

も床板コンクリートの設計厚と実際の厚さとの相違による影響が大きい。

その他計算結果では自由辺; a を支持することで中央のたわみを25%減らせることが判った。

図-14は等分布荷重におけるたわみで、単純支持計算値は定差方程式を用いずに単純支持梁と置いて

$$w = 5q \cdot a^4 / 384Dy \quad \dots\dots(3)$$

で算出した値である。この値は定差方程式のたわみと一致することは当然で、図では中央部付近では良く一致した。自由辺に近づくにつれ定差方程式で解いたものは単純支持梁のそれに比べ10%程度小さくなる。

その他計算結果では水そう荷重同様自由辺; a を支持することによって中央たわみが20%近く減った。

図-15は中央集中荷重におけるたわみで、やはり自由辺; a を支持することでたわみが小さくなっている。(25%)。その他計算結果では水そう荷重同様自由辺を持つ板では、自由辺にはね上がりのたわみが生じた。

3.2 振動計算および考察

床板とその支台 (H型鋼—曲げ材) を1つの連成振動

系と考えた時の Rayleigh-Ritz の方法による自由振動の解を次に示す。

振動のたわみ関数 w_0 を(4)式のように置く。

$$w_0(x, y, t) = w(x, y) \sin pt$$

$$w(x, y) = \sum_m \sum_n \left\{ A_m \sin \frac{m\pi x}{a} + B_n \sin \frac{n\pi y}{b} + C_{mn} \sin \frac{m\pi x}{a} \sin \frac{n\pi y}{b} \right\} \dots\dots\dots (4)$$

ここに

A_m, B_n, C_{mn} ; 未定係数, $m, n = 1, 2, 3, \dots, p$; 角振動数

(4)式は床板および支台に関する境界条件として

$$x = 0, a \text{ では } \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} = 0, y = 0, b \text{ では } \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} = 0$$

$$(x, y) = (0, 0), (a, 0), (0, b), (a, b) \text{ では } w_0 = 0$$

を満足する。

一方、床板を直交異方性板と置いた時の振動系のひずみエネルギー U_s と運動エネルギー T_s は、 $Dx = D + D_0$ と置くとき、

$$U_s \doteq \frac{1}{2} D \int_0^a \int_0^b \left\{ (Dw)^2 + 2(1-\nu) \left[\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 - \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \cdot \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right] \right\} dx \cdot dy + \frac{1}{2} D_0 \int_0^a \int_0^b \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x y} \right)^2 dx \cdot dy \quad (5)$$

$$T_s = \frac{1}{2} \rho^2 \rho h \int_0^a \int_0^b (\dot{w})^2 dx \cdot dy \quad \dots\dots\dots (6)$$

支台のひずみエネルギー U_B と運動エネルギー T_B は、 K_B を曲げ剛性、 A_B を断面積、 ρ_B を密度と置くと、

$$U_B = \frac{1}{2} K_B \int_0^b \left(\frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right)_{x=0}^2 dx \times 2 \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$T_B = \frac{1}{2} \rho_B A_B b^2 \int_0^b (\dot{w})_{x=0}^2 dx \times 2 \quad \dots\dots\dots (8)$$

で表わされる。

$m = n = 1$ として、振動系の全エネルギー $U_s + U_B - T_s - T_B$ を A_1, B_1, C_{11} で偏微分して固有方程式を作ると(9)式のようになる。

$$(U - w^2 T) \begin{Bmatrix} A_1 \\ B_1 \\ C_{11} \end{Bmatrix} = 0 \quad \dots\dots\dots (9)$$

ここに

$$U = \begin{pmatrix} 4 \frac{Dx}{D} & \nu \frac{32}{\pi^2 \lambda} & \frac{8}{\pi} \left(\frac{Dx}{D} + \frac{\nu}{\lambda^2} \right) \\ * & 4 \left(1 + \frac{2K_B}{aD} \right) & \frac{8}{\pi} \left(\frac{1}{\lambda^2} + \frac{\nu}{\lambda^2} \right) \\ * & * & 2 \left(\frac{Dx}{D} + \frac{1}{\lambda^2} \right) \end{pmatrix}, \quad T = \begin{pmatrix} 4 & \frac{32}{\pi^2} & \frac{8}{\pi} \\ * & 4 \left(\frac{2A_B}{ah} + 1 \right) & \frac{8}{\pi} \\ * & * & 2 \end{pmatrix}, \quad w = p \frac{a^2}{\pi^2} \sqrt{\frac{\rho h}{D}}$$

(9)式による1次モードの数値計算結果を表-3に示す。

		$h = 7.0\text{cm}$	$h = 7.3\text{cm}$	$h = 7.87\text{cm}$
固有振動数 f_n		5.81c.p.s	5.71c.p.s	5.53c.p.s
固有	A_1	0.1536	0.1765	0.2009
	B_1	1.0000	1.0000	1.0000
ベクトル	C_1	0.7085	0.6970	0.6228

h はキーストンプレート・コンクリート厚のことで、実大床板では $h = 7.87\text{cm}$ が該当する。

図-16に実験結果との対照を示しておいたが、計算結果がほぼ適合できることが確かめられた。

表-3 1次固有振動数計算値

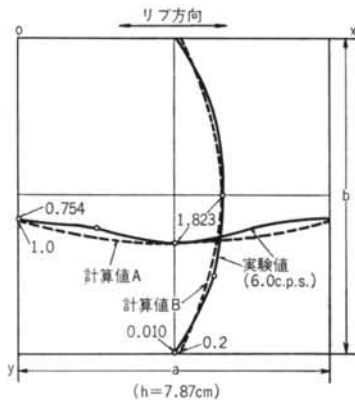


図-16 振動モード計算結果 ($h=7.87\text{cm}$)

§ 4. まとめ

以上の実験および計算結果からリブ付軽量床板の特徴、問題点をまとめてみた。

- 1) 水そう荷重による載荷実験結果は、直交異方性板と置いて定差方程式を用いた計算結果と定性的によく合った。たわみ値は実験、計算結果で違いがあるが、これは先に述べた様にコンクリート厚によって計算値が変わって来るためである。したがって、リブ付軽量床板のたわみ計算ではこれを直交異方性板と置いて差し支えないと考える。
- 2) 直交異方性板としての効果は、通常の構造計算で用いられる等分布荷重で考えると2対辺支持、2対辺自

由の場合は現われないが、自由辺を支持することで現われており中央のたわみを20%近く減らせる。

なお、この定差方程式を用いたたわみ計算では自由辺の境界に関して若干の誤差が認められた。

- 3) 振動実験では注目すべきことが判った。

すなわち、リブ付床板ではそれを受ける大梁（今回の実験ではH型钢）の剛性によって振動性状が変わってくることで、剛性が小さいと床板の振動数計算に関して大梁の影響を考慮せねばならないことである。

- 4) 今回の実大床板では大梁の剛性が小さいために、床板と大梁の連成振動が現われたが、大梁の剛性を充分大きくすれば(1)式で固有振動数を計算しても差支えないと考える。

§ 5. おわりに

このリブ付軽量実大床板は八幡エコンスチール株式会社技術開発室により作成され、その実験と解析にあたっては清水建設研究所が主体になって行なった。

その他、本報で時折出てくるJOIST合成梁の実験は、その剛性を調べる目的で当研究所塩浜分室にて行なったものである。

末筆ながら、八幡エコンスチール株式会社技術開発室 大宰二郎氏、坂恵一己氏、東紘宇氏、船木信義氏および関係者に謝意を表します。

<参考文献>

- 1) 高橋和男：“鉄筋コンクリート造スラブのスラブ厚制限と振動障害”日本建築学会大会学術講演梗概集(1968.10)
- 2) K. H. Lenzen：“Vibration of JOIST-Concrete Slab Floors.” Engineering Journal, (1966. 7)
- 3) 坪井善勝：“平面構造論”丸善
- 4) N. J. Huffingtn：“Bending Athwart a Parallel-Stiffened Plate” Transaction of the ASME. (1967. 6)
- 5) S. チモシェンコ：“Theory of Plates and Shells” Mcgraw-Hill Book Company
- 6) S. チモシェンコ：“工業振動学”東京図書
- 7) S. チモシェンコ：“材料力学(上)”コロナ図書
- 8) 八幡エコンスチール技術開発室：“Armco Steel JOIST 単材調査報告”(1968. 2)
- 9) 清水建設研究所：“OPEN WEB STEEL JOIST スラブの載荷および振動実験報告書”(1968.10)