

## 補剛圧縮板実験の調査と強度簡易算定法の評価

A SURVEY OF TESTS AND APPRAISAL OF SIMPLER APPROACH  
ON STIFFENED PLATES UNDER COMPRESSION

三上市 蔵\*・堂垣 正博\*\*・米 沢 博\*

By Ichizou MIKAMI, Masahiro DOGAKI and Hiroshi YONEZAWA

## 1. ま え が き

1969～71年の長大箱桁橋事故を契機に、補剛板の終極強度に関する実験的研究がきわめて精力的に実施されてきた。まず、それらを整理・分類する。

一方、著者は先に<sup>1)</sup>直交異方性板の弾性分岐座屈理論に基づく簡易な圧縮強度算定法を試みた。ここではその方法を縦補剛材間の板パネルの局部座屈と後座屈の影響が加味できるように整備するとともに、上記の実験結果を用いて評価する。

## 2. 補剛板終極強度実験の現況

ここで取り上げた試験体の総数は419で、その内訳は縦補剛板に対する実験が339、直交補剛板に対する実験が80である。これら試験体を報告された年代別に整理すると、Fig. 1が得られる。ほとんどの実験が1972年以降に実施されており、直交補剛板の実験は少ないが着

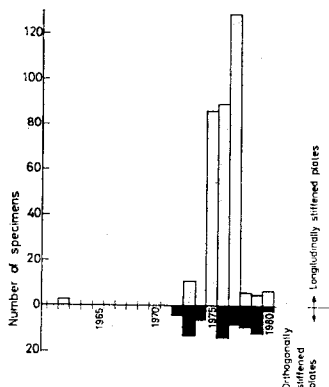


Fig. 1 Survey of stiffened plate tests.

\* 正会員 工博 関西大学教授 工学部土木工学科

\*\* 正会員 工博 関西大学専任講師 工学部土木工学科

々と行われている。これらの実験を試験体形状、載荷方法などにより整理・分類すると Table 1～5 のようになる。

## a) 側辺支持の補剛板パネル実験 (Table 1)

Table 1 Tests for Stiffened Panels with Supported Longitudinal Edges.

Reference	Number of specimens	Long. stiff.		Trans. stiff.	
		Number	Section	Number	Section
2	6	3	F		
2	15	4	F		
2	6	5	F		
3	1	0			
3	3	1	U		
3	3	2	U		
4	3	1	F		
5	15	3	F		
6	3	2	F		
6	2	2	F	1	F
6	3	2	F	2	F
7	9	4	F	2	F
8	9	2	F		
8	9	2	F		
8	3	2	F		
9	2	3	F	2	L
9	2	4	F	2	L
9	3	3	B	2	L
9	3	4	B	2	L
9	2	5	B	2	L
10	1	12	L	4	T
10	1	6	V	4	T
11	4	5	B		
11	4	3	B		
11	1	5	B	2	B
12	3	4	T	4	T
12	2	4	T	3	T
12	4	9	T	3	T
12	2	9+2*	T	4	T
12	1	8+1*	T	4	T

Section : F=flat plate; B=bulb plate; L=angle; T=T-section;  
U=U-section; V=V-section; S=supported.

\* Longitudinal girders.

この実験では補剛板パネルの側辺を支持し、端辺に軸方向圧縮力を作用させる。試験体総数は 124 (縦補剛板実験 83, 直交補剛板実験 41) である。

**b) 側辺無支持の補剛板パネル実験 (Table 2)**

側辺を支持せず、端辺に軸方向圧縮力を作用させた補剛板パネルの実験で日本では行われていない。この実験

**Table 2** Tests for Stiffened Panels with Unsupported Longitudinal Edges.

Reference	Number of specimens	Long. stiff.		Trans. stiff.	
		Number	Section	Number	Section
13	36	4	F		
14	3	2	F		
14	5	2	T		
15	24	4	F		
15	3	4	B		
15	6	4	L		
16	9	5	F		
16	2	1	F		
16	50	5	T		
16	4	5	T		
17	1	1	U	2	S
17	9	1	U		
17	5	2	U		
17	2	2	T	2	S
17	2	2	L	1	S
17	2	2	L		
17	5	2	B		
17	4	4	B		
17	2	2	B	2	S
17	1	2	F	2	S
18	6	4	B	1	S
19	3	3	U	1	S

**Table 3** Tests for Square Columns.

Reference	Number of specimens	Long. stiff.		Trans. stiff.	
		Number	Section	Number	Section
20	16	1	F		
20	2	1	F		
20	2	1	T		
20	4	2	F		
20	1	2	F		
21	2	0			
21	2	1	F		
21	30	2	F		
21	5	2	F		
21	2	3	F		
22	4	2	T		
23	1	5	F		
23	1	4	F		
23	1	5	F	1	F
23	1	4	F	1	F
24	1	3	F		
24	2	3	U		
24	1	3	F	1	F
24	4	2	F		
24	1	2	F	12	F
25	1	1	F		
25	2	2	F		

は圧縮補剛板を補剛材と有効幅をもつ板からなる柱モデルに置換して終極強度を算定する近似法の検討のために行われる。試験体総数は 184 (縦補剛板実験 167, 直交補剛板実験 17) である。ただし、直交補剛板の試験体はいずれも剛な横補剛材を有している。

**c) 箱形柱実験 (Table 3)**

この実験は 4 枚の補剛板パネルを箱形断面柱に組み立てて行われる。試験体総数は 84 (縦補剛板実験 80, 直交補剛板実験 4) である。

**d) 箱桁実験 (Table 4)**

この実験は箱桁のフランジ部を試験対象パネルとし、箱桁に曲げを作用させて行われる。試験体総数は 27 (縦補剛板実験 9, 直交補剛板実験 18) である。

以上の 419 試験体のうち、389 が開断面の、30 が閉断面の縦補剛材に対する実験である。これらの圧縮実験のほかに種々の載荷状態に対する実験が Table 5 に示すようにわずかではあるが実施されている。

**3. 簡易強度算定法の評価**

文献 1) の強度算定法に基づく座屈応力  $\sigma_{cr}$  には、板パネルおよび補剛材の局部座屈は考慮されていないので、ここでは板パネルの局部座屈の影響を加味する。

板パネルの局部座屈と補剛材の座屈との相関座屈として扱うのが厳密であるが、現在までの研究<sup>(34)~(37)</sup>は簡単な柱モデルを用いた強度理論が中心で、しかも縦補剛パネルに限定されている。別の方法として、板パネルの有効幅を考えて剛度を縮小する方法がある。この方法は柱モデルによる強度理論<sup>(38)~(43)</sup>で多用されており、DAST 指針 012<sup>(44)</sup>に適用されている。補剛材の座屈応力に対応する有効幅を用いる<sup>(43), (45)</sup>のが厳密であるが、繰返し計算を必要とするため板パネルの終極状態に対する値が用いられることが多い。第 3 の方法<sup>(46)</sup>は局部座屈に基づく有効断面の縮小率を乗ずる低減法である。

ここでは簡便な第 3 の方法を採用し、板パネルの降伏

**Table 4** Tests for Box Girders.

Reference	Number of specimens	Long. stiff.		Trans. stiff.	
		Number	Section	Number	Section
26	1	0			
26	3	1	F		
26	3	2	F		
27	5	5	F	4	T
28	3	3	F		
29	4	7	L	2	S
29	2	7	L	2	L
30	2	3	F	1	F
30	2	2	F	1	F
31	3	2	V	1	F

**Table 5** Tests for Stiffened Panels subjected to Various Loading.

Classification of tests	Ref.	Kind of stiffening	Number of specimens	Loading condition
Square column	32	Longitudinally	8	Compression & bending in plane
	24	Longitudinally	1	Compression & bending in plane
Stiffened panel with supported longitudinal edges	10	Orthogonally	4	In-plane compressive & lateral loads
	33	Orthogonally	3	In-plane & wheel loads
Stiffened panel with unsupported longitudinal edges	11	Longitudinally	2	In-plane compressive & lateral loads
	11	Longitudinally	3	Lateral load

応力  $\sigma_{yp}$  と縦補剛材の降伏応力  $\sigma_{ys}$  とが異なる場合を想定して、座屈応力を次のように修正する。

$$\bar{\sigma}_{cr} = \left[ \frac{b_e}{b} \frac{\sigma_{yp}}{\sigma_{y^*}} + \delta_x \frac{\sigma_{ys}}{\sigma_{y^*}} \right] \sigma_{cr} / (1 + \delta_x) \dots (1)$$

ただし、 $\delta_x = A_x / bt$ ,  $b$  は板パネル幅,  $t$  は板パネル厚,  $b_e$  は板パネルの有効幅 (以下に述べる),  $A_x$  は縦補剛材 1 本の断面積,  $\sigma_{y^*} = (\sigma_{yp} + \delta_x \sigma_{ys}) / (1 + \delta_x)$ ,  $\sigma_{cr}$  は  $\sigma_{y^*}$  を用いて計算する。

1932 年に von Kármán が板の後座屈挙動の解析に有効幅の概念を導入して以来、多数の有効幅公式が提唱されている<sup>47)</sup>。柱モデルによる強度理論では、文献 38) が Faulkner 公式、文献 39) が Moxham 式<sup>48)</sup>を用い、文献 40)~42) が初期たわみを有する板の、文献 43) が初期たわみおよび残留応力を有する板の弾塑性有限変位解析によって有効幅を決定している。直交異方性板の弾性有限変位解析に基づく強度理論では、文献 38), 46) が Faulkner 公式、文献 45) が Winter 公式を用いている。

ここで、世界中で多数実施されている板の圧縮強度実験の結果を検討しよう。溶接残留応力を含む鋼板に対するおもな結果についてその終極強度と降伏応力との比  $\sigma_{ult} / \sigma_y$  と等価幅厚比  $\beta = (b/t) \sqrt{\sigma_y / E}$  との関係を図示すると、Fig. 2 のようになる。実験データ 105 個は、正方形箱断面柱の実験 (74)<sup>49)~51)</sup> と板パネルの実験

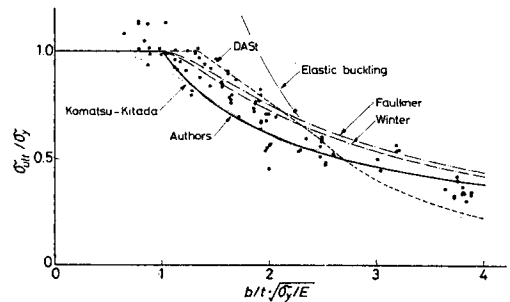
(31)<sup>52)~54)</sup> の結果である。理論として DAST 指針 012<sup>38)</sup> の規定、小松・北田<sup>43)</sup> の式、Winter 公式、Faulkner 公式、BS 449 (1959) の公式<sup>47)</sup> と類似の式

$$b_e / b = 1 / \beta^{0.7} \dots (2)$$

を示した。式 (2) の曲線より低い実験値が若干見受けられるが、弾塑性有限変位解析結

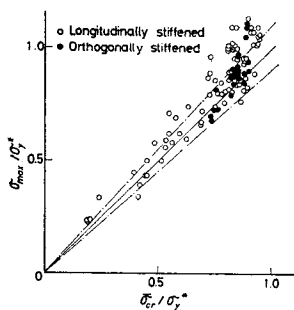
果<sup>43)</sup>ともよく一致しており、この曲線を採用することにする。

**Table 1, 3** および **4** に示す縦補剛板実験 172 および直交補剛板実験 51<sup>注)</sup> に対して式 (1) の妥当性を検討する。実験から得られた崩壊応力  $\sigma_{max}$  と理論座屈応力  $\bar{\sigma}_{cr}$  の比較を行うと、側辺支持補剛板パネル実験、箱形柱実験および箱桁実験に対してそれぞれ Fig. 3~5 の結果を得る。図中、白丸が縦補剛板実験の、黒丸が直交補剛板実験の結果を示し、理論値と実験値が一致する場合の直線を実線で、 $\pm 10\%$  の誤差を表わす直線を一点鎖線で示した。かなり良好な精度で理論値の得られることがわかる。

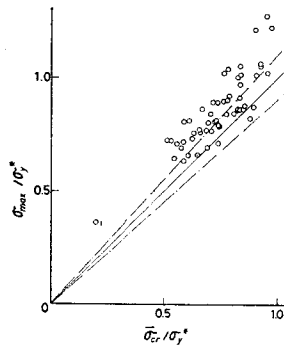


**Fig. 2** Welded plate strength-test data and theories.

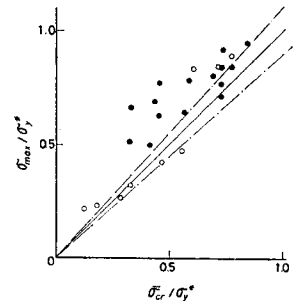
注) **Table 1** の Smith<sup>42)</sup> の実験は船のデッキを意図しているので除いた。



**Fig. 3** Comparison between theoretical buckling stresses and test results for stiffened panels with supported sides.



**Fig. 4** Comparison between theoretical buckling stresses and test results for box columns.



**Fig. 5** Comparison between theoretical buckling stresses and test results for box girders.

## 参 考 文 献

- 1) 三上・堂垣・米沢, 土木学会論文報告集, No. 298, pp. 17~30, 1980.
- 2) Fukumoto, Y., T. Usami and K. Yamaguchi, Proc. IABSE, P-8, pp. 1~15, 1977.
- 3) Yamada, Y., E. Watanabe and R. Ito, Proc. JSCE, No. 278, pp. 133~147, 1978.
- 4) 小松・吉川・牛尾, 土木学会論文報告集, No. 218, pp. 31~38, 1973.
- 5) 小松・牛尾・北田, 土木学会論文報告集, No. 255, pp. 47~61, 1976.
- 6) 小松ほか, 土木学会論文報告集, No. 288, pp. 13~28, 1979.
- 7) 前田・日笠, 土木学会関西支部年次講演会, 1978.
- 8) 阿部・阪本・寺田, 構造物設計資料, No. 48, pp. 14~17, 1976.
- 9) Dorman, A.P. and J.B. Dwight, Steel Box Girder Bridges, ICE, pp. 63~75, 1973.
- 10) Chan, K.S., C.L. Law and P.W. Smith, Preliminary Report of 2nd International Colloquium on Stability of Steel Structures, Liège, pp. 289~294, April, 1977.
- 11) Murray, N.W., Structural Engineer, Vol. 51, No. 8, pp. 285~301, 1973.
- 12) Smith, C.S., Trans. of Royal Institution of Naval Architects, Vol. 117, pp. 325~347, 1975.
- 13) Horne, M.R. and R. Narayanan, Proc. ICE, Part 2, Vol. 61, pp. 253~280, 1976.
- 14) Horne, M.R. and R. Narayanan, Structural Engineer, Vol. 54, No. 11, pp. 437~443, 1976.
- 15) Horne, M.R., P. Montague and R. Narayanan, Proc. ICE, Part 2, Vol. 63, pp. 1~20, 1977.
- 16) Faulkner, D., Steel Plated Structures, ed. by P.J. Dowling et al., Crosby Lockwood Staples, pp. 581~617, 1977.
- 17) Barbré, R., H. Schmidt, E.h.H. Grassel und J. Kruppe : Traglastversuche an Ausschnitten gedrückter Gurte mehrerer Hohlkastenbrücken, Institut für Stahlbau, T.U. Braunschweig, 1976.
- 18) Andrá, W., E. Beyer and L. Wintergerst, Bauingenieur, Jg. 49, H. 10, S. 373~382, 1974.
- 19) Eppel, et al., Stahlbau, Jg. 46, H. 11, S. 341~353, 1977.
- 20) 長谷川・長浜・西野, 土木学会論文報告集, No. 236, pp. 1~14, 1975.
- 21) 金子・井上・雨宮, 土木学会年次講演会, 1976.
- 22) 金子・金井・雨宮, 土木学会年次講演会, 1977.
- 23) 金井・佐伯, 土木学会年次講演会, 1979.
- 24) 金井, 土木学会年次講演会, 1980.
- 25) 伊藤・田島, 鉄道技術研究報告, No. 313, pp. 1~33, 1962.
- 26) Yamada, Y. and E. Watanabe, Proc. JSCE, No. 252, pp. 127~142, 1976.
- 27) 小松・奈良・安松, 土木学会関西支部年次講演会, 1979.
- 28) 大村・吉浪, 広島大学工学部研究報告, Vol. 26, No. 1, pp. 25~30, 1977.
- 29) Maquoi, R. and Ch. Massonnet, Publ. IABSE, Vol. 36-1, pp. 159~187, 1976.
- 30) Dubas, P., Proc. of Colloquium on Design of Plate and Box Girders for Ultimate Strength, IABSE, pp. 367~379, 1972.
- 31) Dubas, P., op. cit. in 16), pp. 265~283.
- 32) 吉田・北川・宇野, 土木学会年次講演会, 1977.
- 33) Dean, J.A. and P.J. Dowling, op. cit. in 16), pp. 743~763.
- 34) Koiter, W.T. and M. Pignataro, Buckling Structures, ed. by B. Budiansky, Springer-Verlag, pp. 133~148, 1976.
- 35) Thompson, J.M.T., J.D. Tulk and A.C. Walker, ibid., pp. 149~159.
- 36) Tvergaard, V. and A. Needleman, ibid., pp. 160~171.
- 37) Croll, J.G.A., Proc. ASCE, Vol. 101, No. EM 5, pp. 575~591, 1975.
- 38) Djubek, J. and M. Skaloud, op. cit. in 10), pp. 249~256.
- 39) Dwight, J.B. and G.H. Little, Structural Engineer, Vol. 54, No. 12, pp. 501~509, 1976.
- 40) Murray, N.W., ibid., Vol. 53, No. 3, pp. 153~158, 1975.
- 41) Horne, M.R. and R. Narayanan, Proc. ICE, Part 2, Vol. 59, pp. 504~514, 1975.
- 42) Chatterjee, S. and P.J. Dowling, op. cit. in 16), pp. 196~228.
- 43) 小松・北田, 土木学会論文報告集, No. 270, pp. 1~14, 1978.
- 44) DASt Richtlinie 012, Beulsicherheitsnachweise für Platten, Deutscher Ausschuss für Stahlbau, 1978.
- 45) Steinhardt, O., G. Valtinat and H. Rubin, op. cit. in 16), pp. 229~247.
- 46) Massonnet, Ch. and R. Maquoi, op. cit. in 9), pp. 131~143.
- 47) Faulkner, D., Jour. of Ship Research, Vol. 19, No. 1, pp. 1~17, 1975.
- 48) Dwight, J.B. and K.E. Moxham, Structural Engineer, Vol. 47, No. 2, pp. 49~66, 1969.
- 49) Ueda, Y. and L. Tall, Publ. IABSE, Vol. 27, pp. 211~254, 1967.
- 50) 奥村・西野・長谷川, 土木学会論文報告集, No. 205, pp. 19~30, 1972.
- 51) 金井・大塚, 土木技術資料, Vol. 19, No. 10, pp. 498~503, 1977.
- 52) Dwight, J.B. and A.T. Ractliffe, Thin Walled Steel Structures, ed. by K.C. Rokey et al., Crosby Lockwood & Son, pp. 3~34, 1969.
- 53) 上田ほか, 日本造船学会論文集, No. 137, pp. 210~221, 1975.
- 54) 前田・日笠, 土木学会関西支部年次講演会, 1976.

(1982.6.28・受付)