

箱形断面柱の相関座屈実験*

永藤 壽宮**・小林 清***

Interaction Buckling Experiment of Box Columns

Toshimiya NAGATO

Box sections present very interesting properties in the field of compressed elements. The purpose of this experiments is to supply experimental date of interaction buckling (overall and local buckling). Test columns are classified into 4 types according to those columns' length.

Support conditions are pin-ended type by using new developed bowl-shoe.

1. ま え が き

近年、構造解析において、電子計算機の発達に伴い、橋梁本体及び、各部材の力学的合理化断面が、多く用いられ、薄肉軽量化が進められている。しかしながら1969年11月におきた第4 Danube 橋の落橋事故から始まり次々の事故に会い、その中で圧縮板の耐荷力特性について指摘された。近年において耐荷力における大きなファクターである初期不整等を考慮した局部座屈問題や、全体座屈問題については、多く研究がなされたが、特に局部と全体座屈の相関性については、余り取り扱われておらず、最近では、名古屋大学と大阪市立大学で、その分野について進められているだけである。わが国の道路橋示方書も、その相関性について若干の改正が、なされたが、理論的根拠は、明白ではない。従って本研究は、相関座屈の耐荷力に対しての影響を3つのタイプつまり(1)局部座屈が、先行し、全体座屈を生じるもの(2)局部座屈と全体座屈の同時発生(3)全体座屈が先行し、局部座屈を誘発させるもの3種に分類しそれぞれ供試体を作製し、圧縮耐荷力実験を行い、極限強度と連成強度について考察した結果を報告し、理論適用の材料とする。また実験の際の両端ピン支承という条件に対し著者が開発した2軸方向回転可能な経済的な球面支承を使用した。

2. 供試体の選定

鋼種は、SS41とし箱形断面についての局部座屈強度は、小松等による圧縮板の耐荷力曲線、全体座屈は、E. C. C. S. の複数柱強度曲線を用いて、両座屈強度が、等しくなるという点及び、耐圧試験機の能力100t、ヘッドクリアランス1.5mの制約条件を満たす様に、

* 平成元年3月 土木学会中部支部において発表

** 土木工学科 講師

*** 文部技官

原稿受付 平成元年9月30日

基本供試体Bの断面構成及び長さを決定した。更に基本供試体と同一断面で長さ、基本供試体の1.1倍の供試体A及び0.9倍の供試体C、及び短柱供試体Sを作製した。支持条件は、上述の通り、両端ピン支承で、弱軸、強軸とも回転可能な球面ピン支承を設計荷重100tとして設計及び作製した。箱形断面諸元を図1に示す。上部、下部支承を写真1に示す。

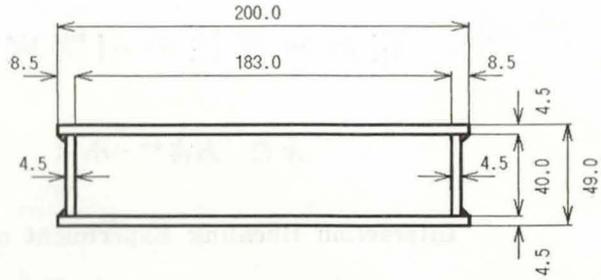
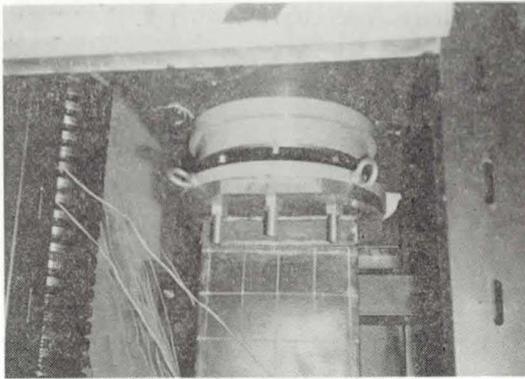
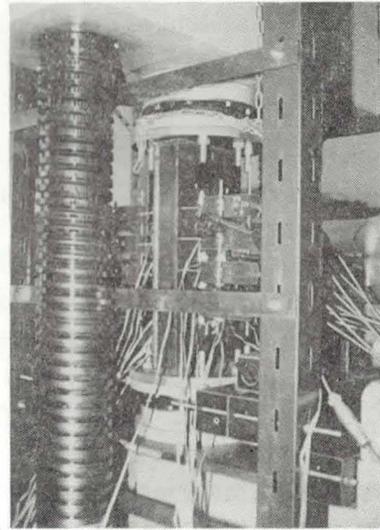


図1 断面諸元

実験用供試体（短柱）を球面ピン支承に取付け、変位計等を設置した圧縮耐荷力試験状況を写真2に示す。



1 ピン支承



2 実験状況

3. 材料実験

引張試験片は、圧縮実験用供試体と同一鋼材から切り出したJIS 5号片を用いた。その結果は、表1に示す通りである。それぞれの値は、4本ずつ試験を行った平均値である。

表1 材料試験結果

| σ_{yu} | σ_{yl} | σ_t | E | ν | δ |
|---------------|---------------|------------|------|-------|----------|
| 2467 | 2342 | 3357 | 2.17 | 0.273 | 31.4 |

4. 残留応力度測定

残留応力度は、試験用短柱供試体で、切断法により、測定した。それぞれ熔接後に、鋼球を打ち込み、切断した後、鋼球の距離をコンタクトゲージ（1/1000mm）で測定し、算出したものである。切断後の供試体を写真4に、また、その結果を図2に示す。

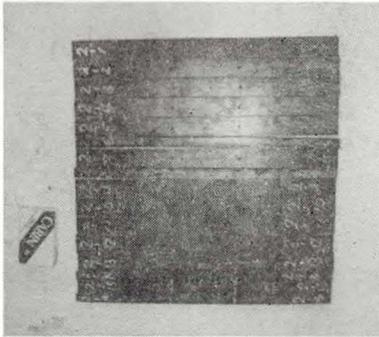


写真3 残留応力度供試体

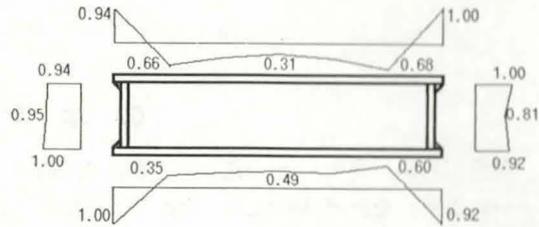


図2 残留応力度分布図

5. 初期たわみ測定

初期たわみ測定は、測定用ジグを開発し、柱の初期たわみ（弱軸，強軸方向）及び、板の初期たわみをそれぞれ変位計（1/100mm）を用いて測定された。その結果を表2に示す。また供試体Aの柱の初期たわみを図3に、板の初期たわみを図4に1例として示す。

表2 供試体の初期たわみ

| Span (mm) | W_{pmax} (板A面) | W_{pmax} (板B面) | W_{cmax} (弱軸方向) |
|--------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| S (400mm) | 1.3 (1/140) | 1.4 (1/131) | |
| A (1260mm) | 2.5 (1/73) | 1.3 (1/141) | 1.3 (1/970) |
| B (1400mm) | 2.7 (1/68) | 1.4 (1/131) | 1.4 (1/1000) |
| C (1540mm) | 4.8 (1/39) | 8.3 (1/22) | 4.9 (1/286) |

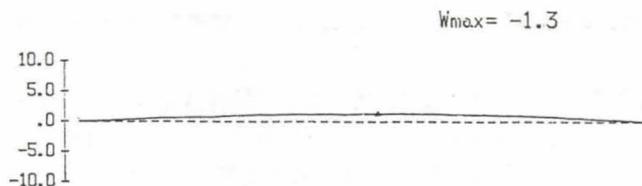


図3 柱初期たわみ分布図 (供試体A)

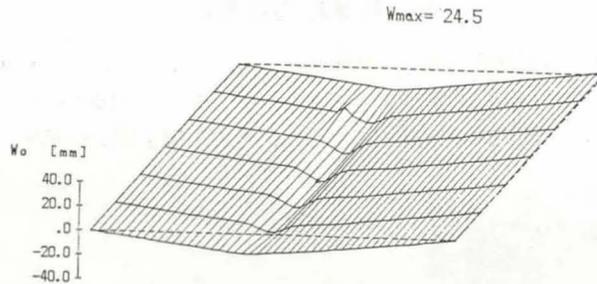


図4 板初期たわみ分布図(供試体A)

6. 本実験

荷重偏心が、発生しない様、推定極限強度の1/3程度の荷重レベルにおいて、調整用ゲージにより、それぞれの値が、それらの平均値の5%以内に収まるように、スペーサーで調整した。局部座屈が、発生する箇所を変位計で、ある程度予測し、その部分に変位計等を集中させ局部座屈性状を観察した。

7. 実験結果及び考察

供試体Aは局部座屈と全体座屈の連成座屈を生じて崩壊し、供試体B、供試体Cは全体座屈優先の局部座屈崩壊すなわち全体座屈による全体変形により局部座屈を誘発して崩壊に至った。短柱供試体は、局部座屈を生じて崩壊した。それぞれの破壊後の供試体を写真4、5に示す。



写真4 座屈後供試体

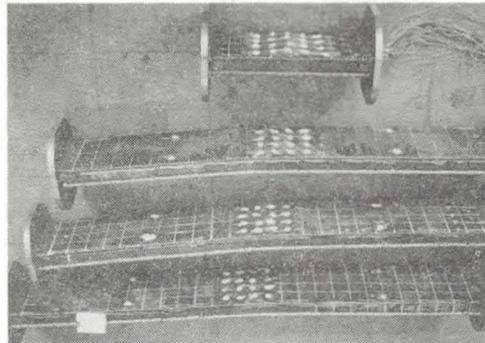


写真5 座屈後供試体

本紙では、局部座屈と全体座屈の連成座屈を生じた供試体Aについて考察していく。第4節の残留応力の図2を見ると各断面内にそれぞれ残留応力の平均を取るとほぼ降伏応力に対して0.4~0.5位生じている事がわかる。また第5節の初期たわみの図3、4で明らかなように供試体作製時の溶接順序により板及び柱にそれぞれ正弦波がオーダー的には少ないが生じて

いる事がわかる。(供試体Cについては柱の初期たわみが非常に大きいので耐荷力をかなり低下する事がわかる) 残留応力にして初期たわみにしても内側にゲージを貼るために溝形で最初成形し、ひずみゲージを貼った後、蓋を熔接した結果として生じたものである。

まず荷重—ひずみ曲線について報告していく。

図5は、蓋側のそのゲージが貼ってある部分が凹部に徐々に曲げを生じ $P/Py=0.75$ に至って大きな曲げ変形、すなわち局部座屈を生じたと観察される。図6は図5の点の近傍にある為 $P/Py=0.75$ 以降図5の点の曲げ変形に引きずられ同様に变形したものと観察される。

図7、8は蓋側のそれらのゲージが貼ってある部分の溝側にある点の荷重—ひずみ曲線であるが $P/Py=0.75$ 付近で除荷現象を表、裏のゲージとも共に起こしている事から、その部分は、 $P/Py=0.75$ 付近で全体変形によって凸部の部分となったからであると予想される。その傾向は、溝側全体のゲージの荷重—ひずみ曲線に共通した除荷現象である。

すなわち図5の点が $P/Py=0.75$ 付近で局部座屈を生じると同時に溝側全体が $P/Py=0.75$ 以降、引張になっていることから、全体変形を起こす全体座屈を生じさせている事が推察される。したがって局部座屈と全体座屈の連成座屈現象が生じていると思われる。

一方、図9は荷重—板変位曲線であるが、図5の点すなわち局部座屈を起こした場所に設置されていた変位計で測定された。この図からも $P/Py=0.75$ 付近で大きな板の変位の増

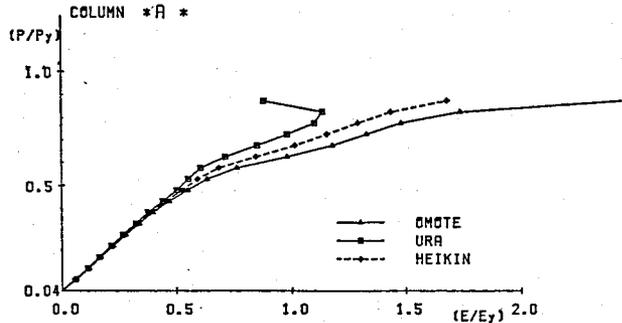


図5 荷重—ひずみ曲線 (供試体A蓋側)

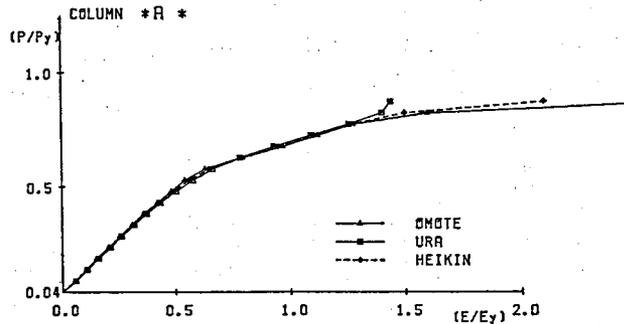


図6 荷重—ひずみ曲線 (供試体A蓋側)

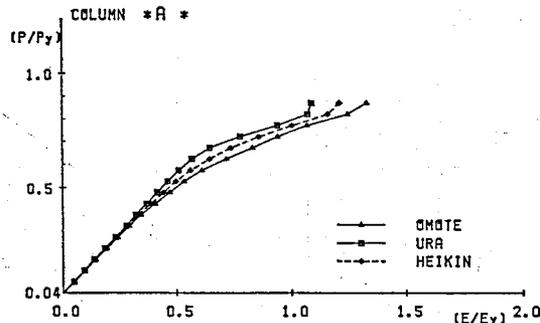


図7 荷重—ひずみ曲線 (供試体A溝側)

大を示していることから、局部座屈発生を照査しているものと考えられる。

次に図10は、荷重一柱たわみ曲線であるが荷重による柱のたわみを変位計を使用して測定されたものである。

前と同様に終局段階の一手前すなわち $P/Py=0.75$ で3次モードの全体座屈を生じている事が観察される。

供試体Bは、同様に観察して全体座屈優先の局部座屈崩壊（全体変形が生じてから局部変形が生じている）であった。

供試体Cは、前にも述べたように初期たわみ量が大きくその影響で柱としての耐荷力を大きく減少させていたので全体座屈優先の崩壊した。

今回の連成座屈実験についての理論的解法の報告は次の機会にするが、筆者等は、残留応力を考慮した有限帯板法を使用して理論的解法を目指した。ヘンキーの有限変位論を用いエルミット多項式を使用して導かれたもので一般固有値問題としてハウス・ホルダーOL法をコレスキー分解で修正して用いたものである。

その理論を使用して導かれた座屈値は、理論値とはほぼ一致しているが、初期たわみの項を考慮できないという欠点を持っているので現在新たにそれを考慮した形で開発中である。

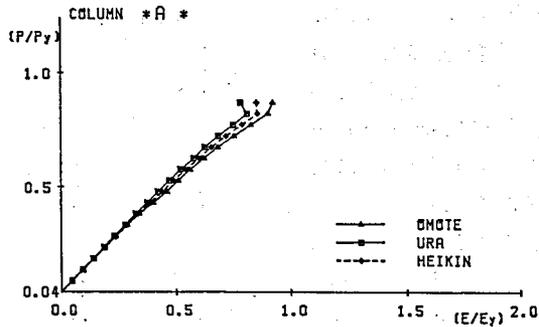


図8 荷重一ひずみ曲線（供試体A溝側）

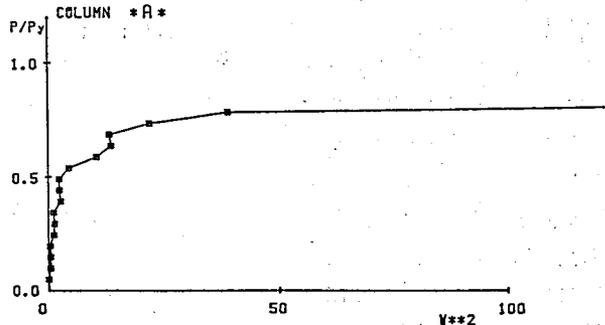


図9 荷重一板変位曲線（供試体A蓋側）

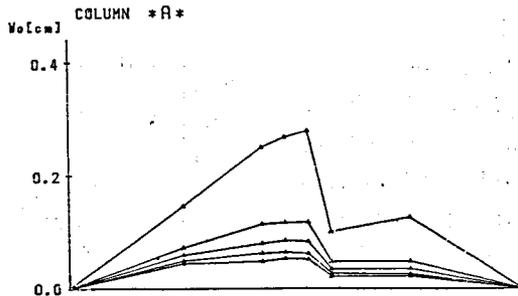


図10 荷重一柱たわみ曲線

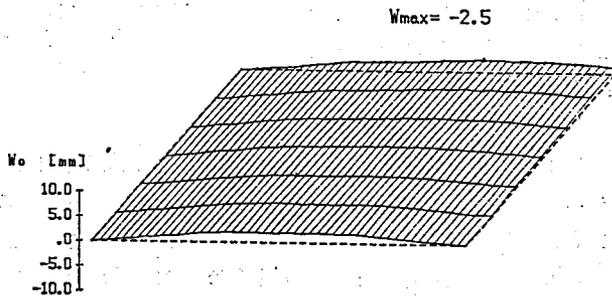


図11 残留たわみ図（供試体A）

図11に残留たわみ図を示すが、正弦の全体座屈波形を全体的に示し中央部に局部座屈波形性状を示していることがわかる。

表3に供試体A～C及び短柱供試体の座屈の最終強度比較とそれぞれの座屈性状の比較を示す。供試体A～C及びSの長手方向の長さは、表2に準じる。

表3 座屈強度比較表

| TYPE | S | A | B | C |
|------|------|------|------|------|
| 座屈荷重 | 55.5 | 45.0 | 52.5 | 35.1 |
| 状態 | 局部 | 連成 | 全体 | 全体 |

8. 過去のデーターとの比較

過去数年の相関座屈実験についてまとめると、図12～図14の断面諸元別に(A)～(C)として分類して、初期たわみ、残留応力及び柱の細長比と板の幅厚比でまとめ、連成座屈荷重と連成なしの座屈荷重の比較の表を表4に示す。

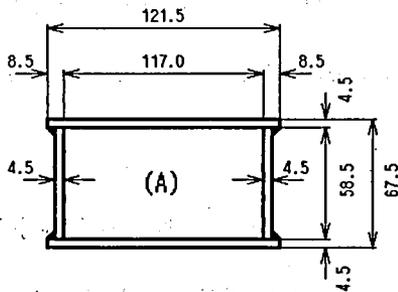


図12 供試体 (A)

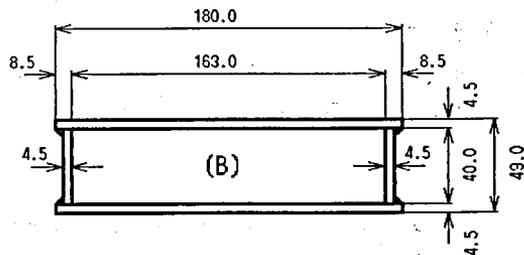


図13 供試体 (B)

図12～図14 過去数年間の実験断面諸元

全体座屈と局部座屈の連成座屈強度は、非連成座屈強度に対して一般的に座屈強度の低下をもたらしている。

またその低下の割合は、柱の細長比の増大と板の幅厚比の増大とともに大きくなっている事が観察される。

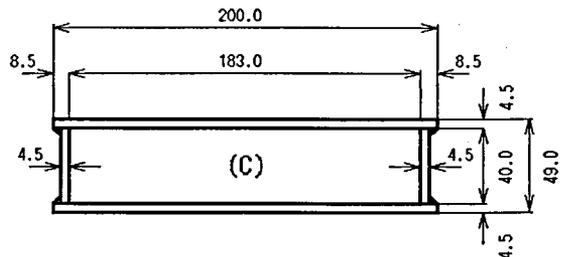


図14 供試体 (C)

表4 連成座屈強度比較表 (過去数年間)

| MODEL | 柱初期たわみ (δ/l) | 板初期たわみ (δ/b) | 残留応力 (σ_r/σ_y) | 柱細長比 (l/r) | 板幅厚比 (b/t) | 実験値 連成(無連成) |
|-------|--------------------------|--------------------------|---------------------------------|-------------------|-------------------|----------------|
| (A) | 1/1000 | 1/61 | 0.46 | 19.7 | 26.0 | 46.6 (48.9) |
| (B) | 1/950 | 1/70 | 0.40 | 38.5 | 36.2 | 42.5 (46.5) |
| (C) | 1/970 | 1/47 | 0.46 | 65.9 | 40.7 | 45.0 (53.8) |

9. 結 論

- (1) 全体座屈と局部座屈との連成座屈問題の理論適用データを提供した。
- (2) 裏側にゲージを貼る為に最初に溝形で供試体を作り、その後で蓋をするという方式を採った為に残留応力が比較的大きい。
- (3) 本研究室で開発した全方向回転可能ピン支承は、有効的に稼働した。
- (4) 局部座屈は、供試体の長手方向に幾つか発生するが、多くは中央部分に2~3波のフレンジ幅の波長をもって生じる。
- (5) 局部座屈優先のスパン長0.9倍の供試体は、局部座屈発生後直ちに全体座屈につながらず、5~11%の後局部座屈強度を有しており、またその傾向は幅厚比の大きい供試体ほど顕著に観察された。
- (6) 柱の細長比及び板の幅厚比が大きくなるほど、連成座屈の影響が大きくなり極限強度の低下をもたらす。

参 考 文 献

- (1) 小松定夫, 北田俊行: 初期不整を有する圧縮板の極限強度特性に関する研究, 土木学会論文報告集 第270号 昭和53年2月 P1~P14
- (2) 永藤壽宮, 小林 清: 箱形断面柱の相関座屈実験, 土木学会中部支部年次講演集 I-27 平成元年3月