

論文

[2024] 鉄筋コンクリート偏平ドームの破壊実験

正会員○高山 誠 (金沢工業大学工学部)

正会員 半谷 裕彦 (東京大学生産技術研究所)

1. はじめに

偏平ドームの実験的研究としては、これまでに硬質塩化ビニールや金属を材料としてかなりの実験が行われているが、鉄筋コンクリートドームについては実験の困難さなどもあって、極限られた研究しか行われていない。また、1979年、IASS (国際シェル・立体構造学会) より鉄筋コンクリートシェルに関する設計指針^{1) 2)}が発表されており、これを国際指針として確立するための確証実験と実験データの蓄積が要請されている。一方、鉄筋コンクリート偏平ドームの破壊機構に影響をおよぼす要因としては、ライズ・スパン比、荷重モード、境界条件、初期不整、材料の塑性化、クリープなど、様々なものが考えられる。

そこで本研究では、上記要因の中から、最も基礎的なもの一つとしてライズ・スパン比と荷重モードを選び、それらが鉄筋コンクリート偏平ドームの破壊機構におよぼす影響を実験的に調べた。また、上記IASSの指針と実験結果の比較、検討も併せて行った。

2. 実験方法

表-1 に示すように3種類のライズ・スパン比と3種類の荷重モードについて実験を行った。試験体の諸元を表-2 に、形状、寸法を図-1 に示す。スパン ($L=100$ cm)、シェル厚 ($t=0.8$ cm) は一定とし、ライズ (h) のみを変化させている。なお、製作した

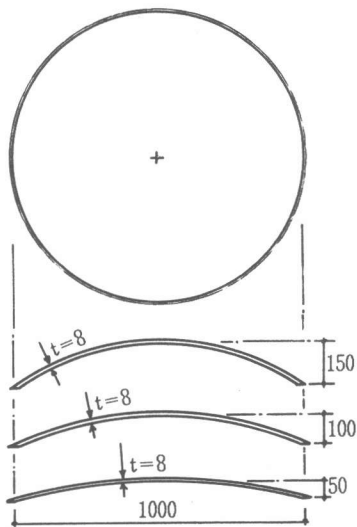


図-1 試験体形状・寸法

表-1 試験体名称

ライズ・スパン比	荷重モード		
	全面荷重	中央荷重	片側荷重
0.05	SW-5	SC-5	——
0.10	SW-10	SC-10	——
0.15	SW-15	SC-15	SH-15

表-2 試験体諸元

試験体	スパン L cm	ライズ h cm	曲率半径 R cm	半開角 θ rad	シェル厚 t cm	ヤング率 $E_c \times 10^5$ kgf/cm ²	ポアソン 比 ν	圧縮強度 F_c kgf/cm ²	鉄筋比 P_t %
SW-5	100	5	252.5	0.199	0.83	2.30	0.19	292	0.89
SW-10	100	10	130.0	0.395	0.85	2.29	0.20	300	0.87
SW-15	100	15	90.8	0.583	0.77	1.67	0.19	228	0.88
SC-5	100	5	252.5	0.199	0.88	2.17	0.17	321	0.89
SC-10	100	10	130.0	0.395	0.86	2.14	0.19	311	0.87
SC-15	100	15	90.8	0.583	0.85	2.27	0.19	279	0.86
SH-15	100	15	90.8	0.583	0.84	2.28	0.27	244	0.88

試験体の形状を実測した結果、初期不整量は $\pm 1.9 \sim 2.7$ mmで、ライズが大きい程不整量が多い傾向が見られた。また、配筋図を図-2に示す。コンクリートは骨材の最大粒径 1.2 mm のマイクロコンクリートとし、鉄筋は $\phi 1.2$ の普通鉄線 ($E = 2.18 \times 10^6$ kgf/cm², $\sigma_y = 3700$ kgf/cm²:ここで、ヤング率の測定については、重りにより段階的に加力し、ストレングスによりひずみを測定して求めた)を用い、放射状及びフープ状にシングル配筋とした。鉄筋端部は、何れも折り曲げ角度 180° のフックを付け定着し、フープ筋については継手長さ24mm以上の重ね継手とし、継手及び鉄筋交点は半田付けした。各荷重モードにおける載荷部分を図-3に斜線で示した。載荷方法は図-4に示すように、32分割(全面荷重の場合)トーナメント方式で、試験体を通するロッドにより下から引張っている(図-4参照)。

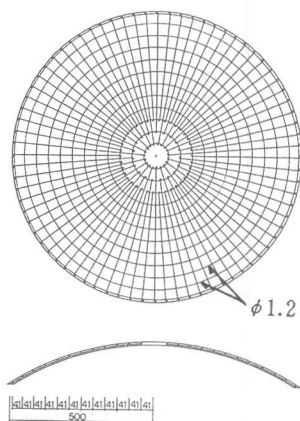


図-2 配筋図

測定は、ダイヤルゲージ型変位計により25点の鉛直変位を、また、3方向ストレングスにより、14点で試験体両面の歪を測定する他、目視によりひびわれの観察を行った。

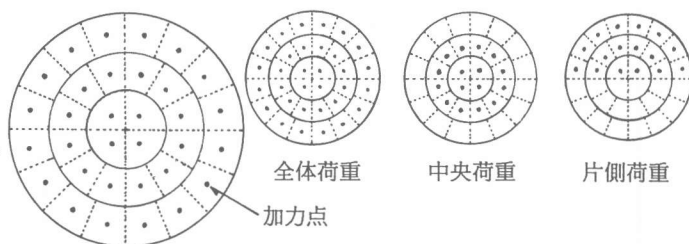


図-3 加力点および荷重モード

3. 実験結果および考察

(1) 荷重-変位関係

図-5~7に、各試験体の荷重-変位曲線を示した。縦軸は単位面積当りの荷重 (q) をコンクリート強度 (F_c) で除して無次元化したものであり、横軸はドーム頂点のたわみを表す。図-5は全体荷重の場合について、また、図-6は中央荷重の場合について、各々ライズ-スパン比の影響を観たものである。いずれも、ライズ-スパン比が小さくなるにつれて剛性が低下する傾向にあるが、両図とも 0.05 (SW-5, SC-5) の場合、極端に剛性、耐力が低くなっており、特に SC-5 では曲線の途中(変位量 3 mm 程度)からの非線形化が認められる。SC-5 ではかなり早い段階から大きな曲げが発生していることから、曲げによる塑性化の影響と考えられる。また、全体荷重の場合 (SW-10, SW-15) にも破壊直前での非線形化が認められるが、この段階では荷重値もかなり高いことから、軸圧縮や二次的曲げによるものと考えられる。

図-7はライズ-スパン比 0.15 の場合について、各荷重モードの結果を示したものであるが、中央荷重 (SC-

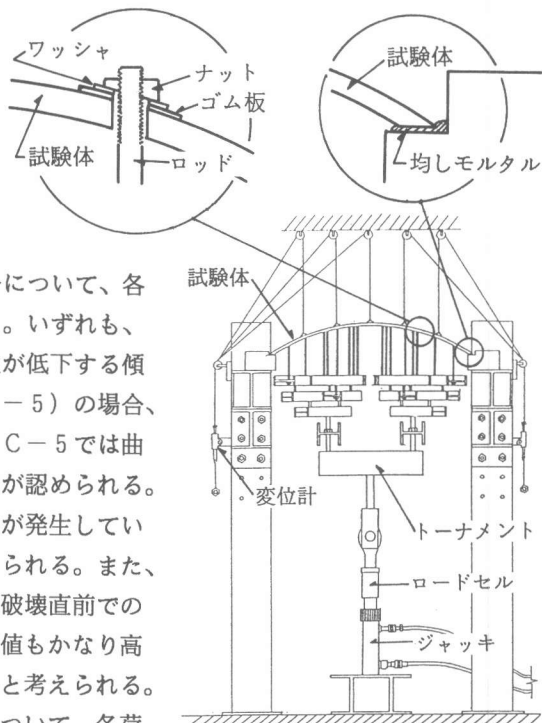


図-4 試験装置

15) の剛性が他に比べて低くなっている。これは、中央荷重の場合、周辺の無載荷部分が外側へ押し出されるように変形することによって、シェルが載荷部と無載荷部の境界でローラー支持されたような状態となるため、変形が大きくなったものと考えられる。また、この図では各試験体とも頂点の変位を採っているが、片側荷重 (SH-15) の場合は頂点の変位が最大ではないため、見掛け上剛性が高く表れている。

(2) 変形モード

図-8 に各試験体の変位等高線およびある断面における変形モードを示した。

全体荷重の場合、球殻の応力状態は基本的にシェル全面において両方向圧縮の軸力となる。このため、シェル面は全体的に一樣にたわむのではなく、細かく波打つような変形モードが現れる。図からも分かるように、この傾向はライズースパン比が大きいとより明瞭に現れる。

一方、中央荷重の場合、無載荷部分は上部からの応力により外へ押し出されるため、この部分はほとんど変形せず、逆に僅かではあるが浮き上がりを生じる。載荷部分は全体荷重の場合とほぼ同様の変形となり、上述の波打つような変形モードも生ずるが、ライズの小さい SC-5 ではこの波はあまり明確ではない。また、変形領域が狭いので、浮き上がりを生じている無載荷部分との境界付近ではかなり急な変位勾配となっている。

片側荷重の場合、図からも明らかなように載荷側がたわむにつれて、無載荷側はそれに押し出される形でかなり大きく浮き上がり、その浮き上がり量は載荷側のたわみ量と同程度であった。

(3) 曲げモーメント分布

図-9 に曲げモーメント分布の典型を示した。図より、中央荷重 (SC-5) の場合、載荷部分と無載荷部分の境界付近で、

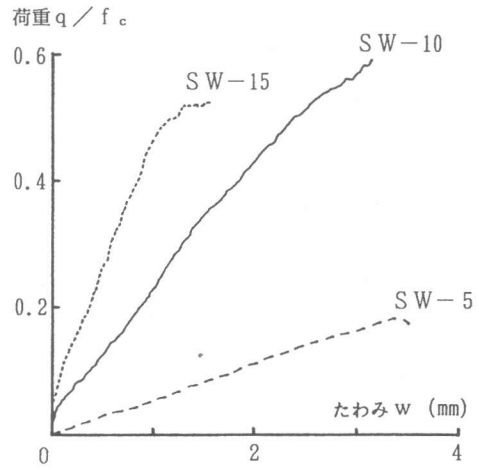


図-5 荷重-変位曲線 (全体荷重)

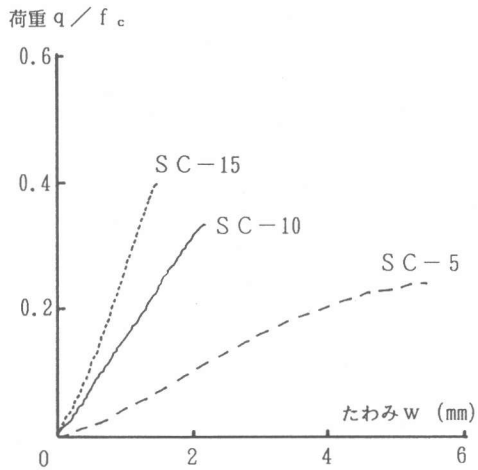


図-6 荷重-変位曲線 (中央荷重)

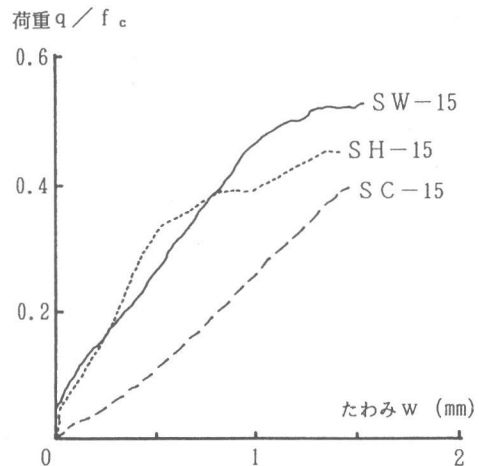


図-7 荷重-変位曲線 (ライズースパン比: 0.15)

かなり大きな下側引張の曲げモーメントを生じており、またその外側の無載荷部分では上側引張の大きな曲げモーメントを生じていることが分かる。これに対して、全体荷重の場合は、比較的曲げモーメントは小さいが、ライズが小さく（SW-15）なると大きい曲げモーメントを生じることが分かる。

(4) ひびわれおよび破壊モード

図-10に各試験体のひびわれと破壊の状況を示した。全体荷重の場合は、いずれもシェル面の一部分が局部的に陥没する形で破壊したが、ライズースパン比が大きい程その破壊は急激で、陥没部分は完全に抜け落ちてしまった。

一方、中央荷重の場合は、載荷部分と無載荷部分の境界で大きな曲げを受けているため、この境界部分が折れ曲がる形で破壊している。この破壊モードはライズースパン比が大きい程明瞭に表れ、更に周辺の無載荷部分では、半径方向に細かくひびわれが入った。

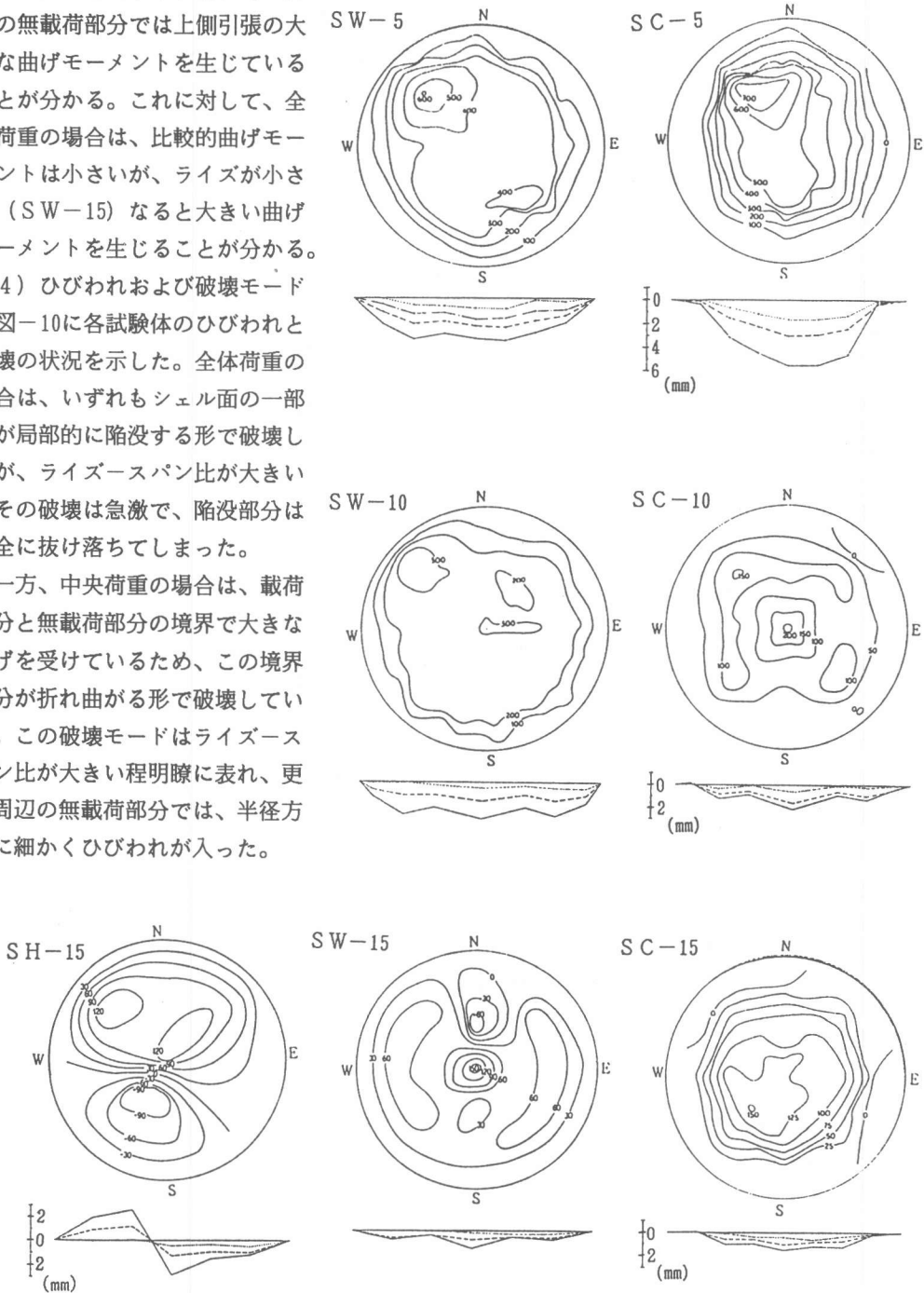


図-8 変位等高線および変形モード

また、片側荷重の場合は、載荷部分の頂点付近で局部的に陥没し、同時に無載荷側に半径方向のひびわれが多数発生した。

(5) 座屈荷重

表-3に、実験結果の初期ひびわれ発生荷重と座屈荷重を示した。ここで、座屈荷重 (q_{ex}) は耐力 (P) を各々の載荷部分のシェル表面積で除した値としており、 F_c により補正した値も併せて示した。古典座屈荷重 (q_{cl}) はよく知られた球殻の理論座屈値で、下式で表される。

$$q_{cl} = \frac{2 E_c}{\sqrt{3(1-\nu^2)}} \left(\frac{t}{R} \right)^2 \quad (\text{各記号については、表-2参照})$$

表-3に IASS 指針値とあるのは、前述の IASS 指針¹⁾の考え方に基づいて求めた座屈荷重で、古典座屈値を基に、初期不整やクリープなどの影響を考慮した低減率を乗じて求める。

荷重モードにかかわらず、座屈荷重 (q_{ex} or q_{ex}/F_c) はライズが大きい程高くなる傾向にあるが、SW-15の値はSW-10より低くなっている。SW-15のコンクリート強度が低いことも理由の一つであるが、初期不整の影響もかなり大きいものと考えられる。

実験値 (q_{ex}) と理論値 (q_{cl} , q_{IASS}) を比較すると、ライズが大きい程実験値は理論値に対して低く出ている。特に IASS 指針値 (q_{IASS}) の場合は、様々な要因 (初期不整、材料の塑性化など [但し、ライズに関するものは含まれていない]) を考慮して低減した値であるにもかかわらず、 q_{ex}/q_{IASS} はライズが大きい程小さくなっている。この原因として以下のことが考えられる。

即ち、ライズスパン比が大きい場合、その応力状態は膜応力状態に近く、曲げの割合は小さい。そこで、不整等によって二次的曲げが発生すると、その影響はライズスパン比が小さい場合に比べて大きいものとなる。また、本実験の場合、加力が32分割トーナメント方式であるため、水圧等を加えた場合と異なり、加力点近傍で二次的曲げが発生することも影響していると思われる。

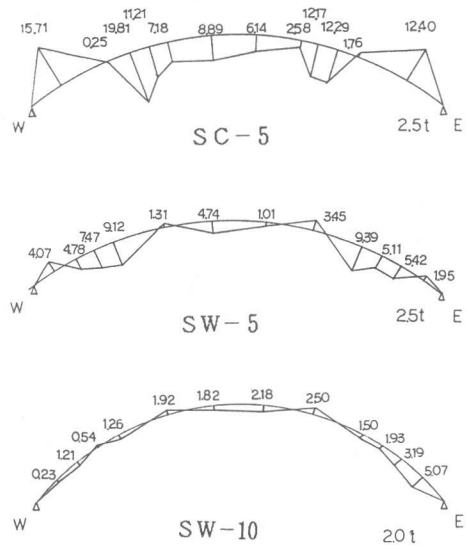


図-9 曲げモーメント図

表-3 実験結果および座屈荷重理論値一覧

試験体	クラック発生荷重 tf	耐力 P tf	座屈荷重 q_{ex} t/m ²	$q_{ex}/F_c \times 10^{-2}$	古典座屈荷重 q_{cl} t/m ²	q_{ex}/q_{cl}	IASS指針値 q_{IASS} t/m ²	q_{ex}/q_{IASS}
SW-5	3.60	4.26	5.37	0.184	29.2	0.184	3.64	1.475
SW-10	14.0	14.5	17.8	0.593	115.4	0.154	11.4	1.561
SW-15	6.50	10.3	12.0	0.526	141.2	0.085	12.7	0.945
SC-5	0.32	3.06	7.73	0.241	30.9	0.250	3.75	2.061
SC-10	0.74	4.19	10.4	0.334	110.1	0.094	10.8	0.963
SC-15	2.00	4.60	11.2	0.401	234.0	0.048	21.1	0.531
SH-15	3.70	4.75	11.1	0.455	234.0	0.047	19.6	0.566

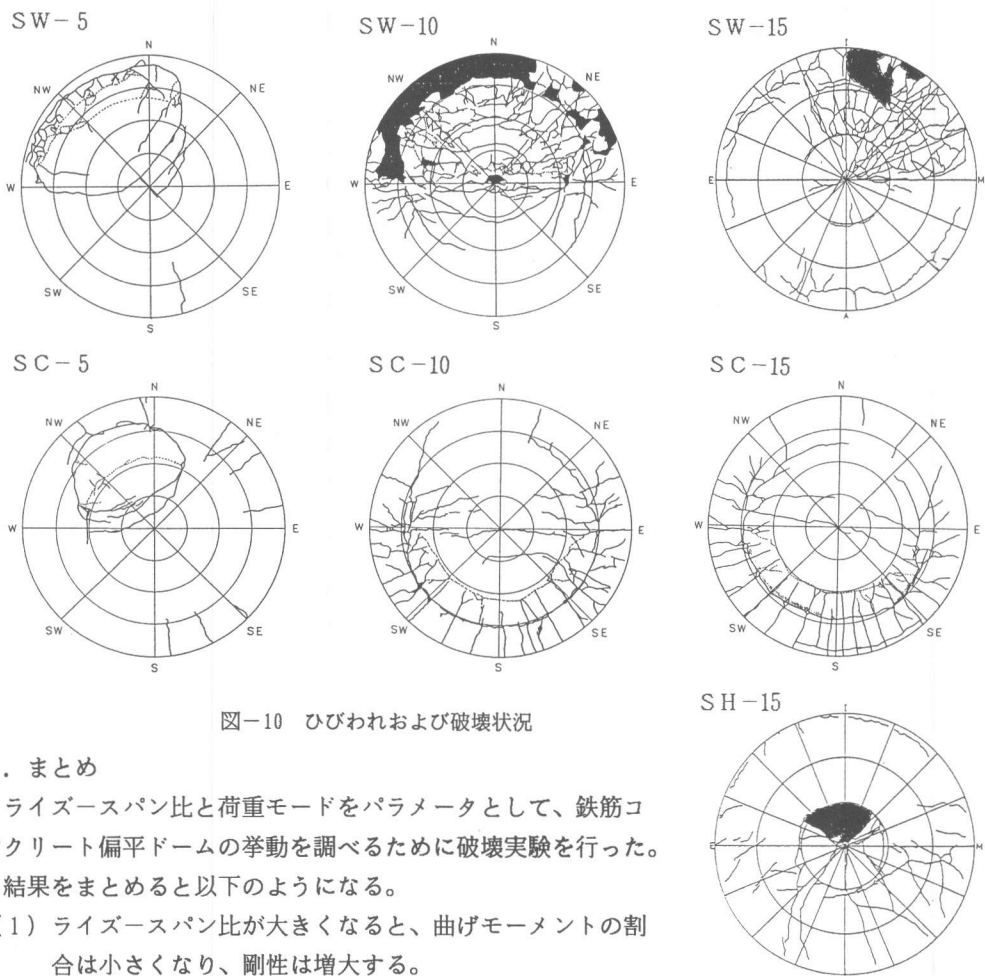


図-10 ひびわれおよび破壊状況

4. まとめ

ライズースパン比と荷重モードをパラメータとして、鉄筋コンクリート偏平ドームの挙動を調べるために破壊実験を行った。結果をまとめると以下ようになる。

- (1) ライズースパン比が大きくなると、曲げモーメントの割合は小さくなり、剛性は増大する。
- (2) 中央荷重や片側荷重のように、載荷が局部的になると大きな曲げが発生し、全体荷重の場合に比べて剛性、耐力が低下する。変形モードや破壊モードもこの荷重モードに支配されて、全体荷重の場合とはかなり異なるモードとなる。
- (3) ライズースパン比が大きくなると、座屈荷重は増大するが初期不整や局部的攪乱の影響を受け易く、初期不整等による低減の割合はライズースパン比が大きいか程大きくなる。

尚、本実験の一部は荷重モードの影響および単層ラチスドームの解析との比較を中心に建築学会等^{3) 4)}に発表したものである。

〔参考文献〕

- 1) Recommendations for Reinforced Concrete Shell and Folded Plates. IASS, Madrid, 1979.
- 2) 半谷、高山、真下：IASS鉄筋コンクリートシェル座屈指針、カラム, No101, 1986. pp. 75-81.
- 3) Y. HANGAI, M. TAKAYAMA, S. OHYA: Comparison of Buckling Behaviors of Reticulated Single-Layer Domes and Reinforced Concrete Domes, Proc. of the IASS-MSU Int. Symp., Istanbul, 1988. pp. 453-462.
- 4) 高山、半谷：鉄筋コンクリートドームの破壊性状に与える荷重モードの影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、1988. pp. 1321-1322.