

四葉傘型 HP シェル構造の

力学的性状と層構造システムへの適用に関する研究

建築構造学分野

宮脇 和紀

Abstract

最近ではコンピューターの発展とともに自由な曲面を用いた建物が注目されるようになり、幾何学的な曲面を用いた建築はあまり注目されなくなっている。しかしそのような建築はシェルの曲面の美しさや構造的合理性、施工性が損なわれており、全体として建物が考えられていないと感じられる。もう一度シェルが持つ美しさや構造的合理性、施工性を見直すべきである。そこで本論ではキャンデラが多用した四葉傘型 HP シェル構造に注目し、実際に設計、施工、実験、解析を通してその力学的合理性、施工性を検討していった。さらにそこから四葉傘型 HP シェル構造を用いた新しい構造システムを考案し、その合理性や可能性を弾塑性解析及び地震応答解析を行い、検討していく。

1. 序

フェリックス・キャンデラ⁽¹⁾は、HP シェルを様々な形に切り取り、そしてそれらを組み合わせることによって、数多くの魅力的な作品を作り出してきた。さらにそれらは構造的合理性だけでなく、意匠性、施工性の面でも優れており、安価で量産性が優れているので、猛スピードで発展するメキシコの産業界に適した方法であった。しかしコンピューターが発達し、数多くの自由曲面を用いた建物が製作され注目されるようになり、HP シェルのような自然な曲面を用いた建築はあまり注目されなくなっている。しかし自由曲面はシェルの曲面の美しさや構造的合理性、施工性が損なわれており、全体として建物が考えられていない。もう一度 HP シェルが持つ美しさや構造的合理性、施工性を見直すべきである。

そこで本論では、まず実際に四葉傘型 HP シェルを製作・実験を行い施工性と構造特性を検証し、解析結果との比較を行った。次に1ユニットの四葉傘型 HP シェルでのパラメータ解析を行い、力学的特性を検証した。そして次に平面上に4ユニット並べ、偏分布荷重に対しての力学的特性を検証した。最後に多層に積み重ね、地震荷重に対しての検証を行った。

2. 実験による四葉傘型 HP シェルの力学的性状の検証

2.1 実験概要

本章では施工の面での利便性と構造特性を検証するために図1,2に示す許容応力度設計を行った4葉傘型 HP シェルを施工及び載荷実験を行った。載荷方法は1個20kgの砂袋を最大25個まで載荷する。図3は砂袋を載せる位置と順番を示す。またコンクリート埋め

込み式歪みゲージを用いて、図4に示す場所及び方向のひずみの測定を行った。

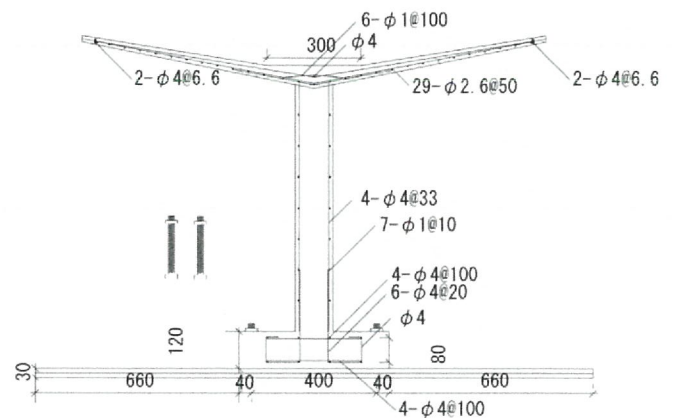


図1 a-a' 断面図

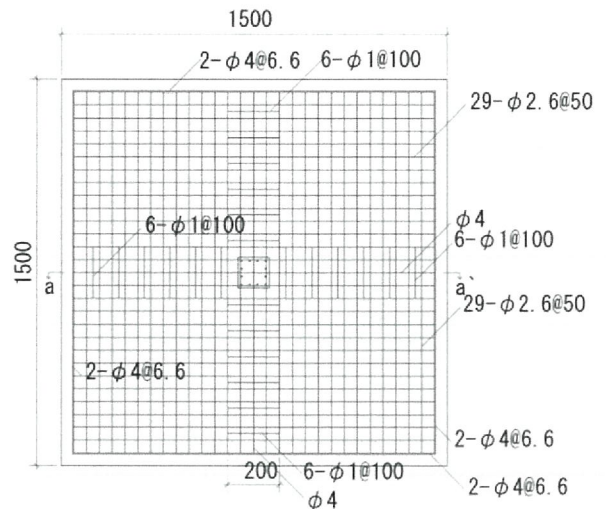


図2 シェル配筋図

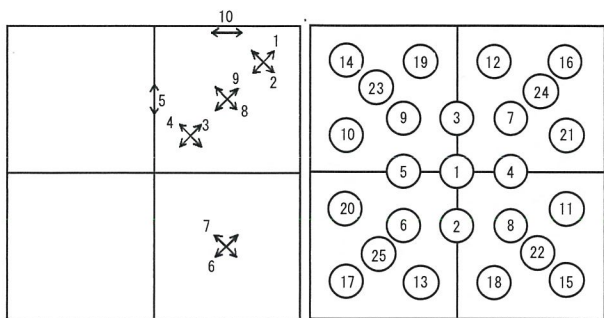


図3 歪みゲージの場所と方向 図4 砂袋載荷位置

表1 材料緒元

材料	コンクリート	鉄筋
ヤング係数(N/mm ²)	9243	205000
ポアソン比	0.2	0.3
比重	2.4	7.85
圧縮強度(N/mm ²)	15.9	750.5
引張強度(N/mm ²)	5.5	

2.2 試験体製作

図に従って試験体の製作を行った。製作を簡単にするために基礎とシェル部分の配筋はワイヤーメッシュを用いた。またシェル部分は厚さが20mmしかないのでコンクリートには塑骨材を入れず、モルタルで打つことにした。

2.3 解析モデル

解析モデルは実験で製作した試験体と同様に1辺の長さが750(mm)、ライズが150(mm)、厚さは20(mm)のHPシェルを4枚組み合わせた四葉傘型HPシェルである。配筋も実験と同様とする。鉛直荷重だけを考慮しているので柱と基礎部分は省略する。コンクリート部分はソリッド要素でモデル化し、鉄筋はビーム要素でモデル化する。また材料特性は実験値を用いる。支持条件は柱とシェルの中心を完全固定とする。図5にコンクリートのソリッド要素、図6に鉄筋のビーム要素

を示す。

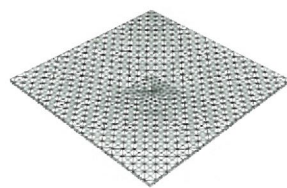


図5 コンクリートモデル

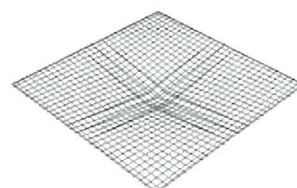


図6 鉄筋モデル

2.4 実験結果及び解析結果

まず施工性については学生である自分たちでも十分に施工することが可能であった。特に曲面の部分でも直線材の木板を水に浸しねじれば容易に作る事ができた。

実験結果と解析結果を比較すると、実験結果と解析結果の差異が大きいところが見られる。その原因として考えられるのは、まず施工性が考えられる。シェルは裏面では型枠によってきれいに曲面を作ることができるが、表面は手作業で曲面を作り出さなければならず、やはり誤差が大きくなってしまふ部分が生じてしまう。もうひとつとして考えられるのは、砂袋で載荷したからだと考えられる。やはり砂袋ではきれいに分布荷重をかけることが難しく、局所的な荷重が生じてしまう可能性がある。そのため解析でも実験結果を再現することが難しいと考えられる。しかし圧縮方向と引張方向共に計測したひずみゲージの値は解析結果とほぼ同じような結果となっており、HPシェルの力学的特性を検証することができた。また解析結果ではアーチ方向の圧縮ひずみは柱に近いほど大きくなる傾向があるが、実験結果でも図7をみるとその特性を確認することができる。カテナリー方向では中央付近の引張ひずみが大きくなっているが、実験結果も同じ結果が確認できる。

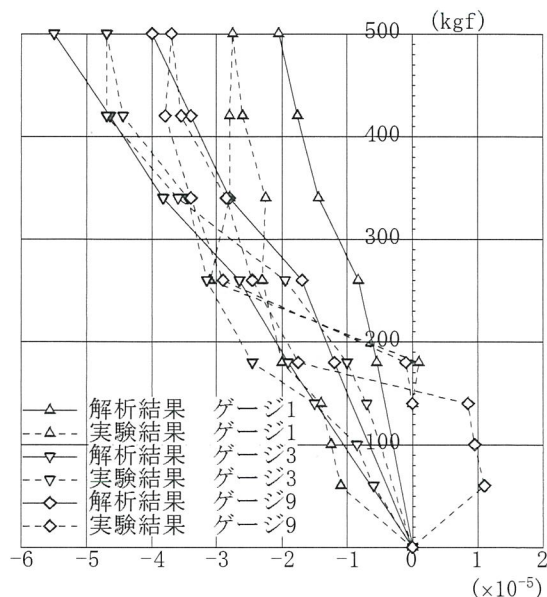
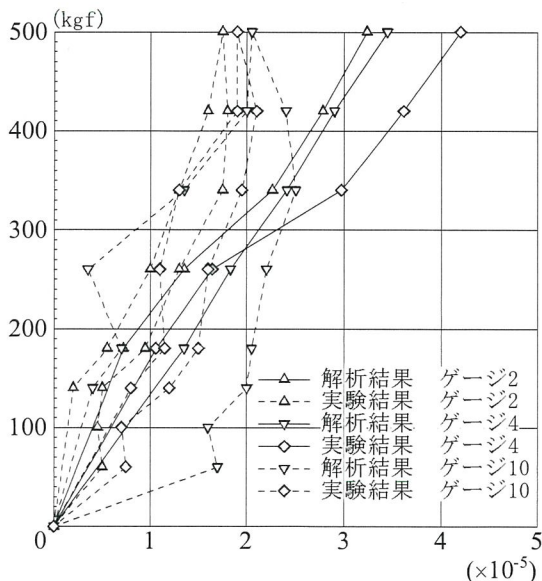


図7 実験結果及び解析結果(積載荷重—ひずみ関係)

3.1 ユニットの力学的特性の評価

一つのユニットを取り出し、ライズと斜梁の断面をパラメータとして、それぞれの強度および構造特性を把握することを目的とする。

3.1 解析モデル⁽²⁾

本章で取り扱う解析モデルは1辺の長さが6000(mm)、ライズがc(mm)、厚さは30(mm)のHP シェルを4枚組み合わせた四葉傘型 HP シェルである。また $b_0=300$, $d_0=60$ とする。シェル部分と縁梁は面要素でモデル化する。斜梁は $b_1/b_2=1$ 、かつ $d_1/d_2=1$ のモデルは面要素でモデル化し、それ以外のモデルはソリッド要素でモデル化する。図8に解析モデルの形状と寸法、表2に解析条件と標準タイプを示す。解析にあたっては幾何非線形を考慮した弾塑性解析を行った。また積層要素⁽³⁾を用いており、要素の応力状態及び降伏の判定は個々の積層要素で行っている。図10にコンクリートの応力-ひずみ関係、鉄筋の応力-ひずみ関係⁽⁴⁾を示す。本解析においては鉄筋とコンクリートの付着すべりは考慮していない。境界条件は図11に示すように2種類とした。また荷重条件はシェル部分に対して等分布荷重をかけた。材料定数は、コンクリートのヤング係数22668(N/mm²)、鉄筋のヤング係数を205000(N/mm²)、単軸降伏応力を295(N/mm²)とした。

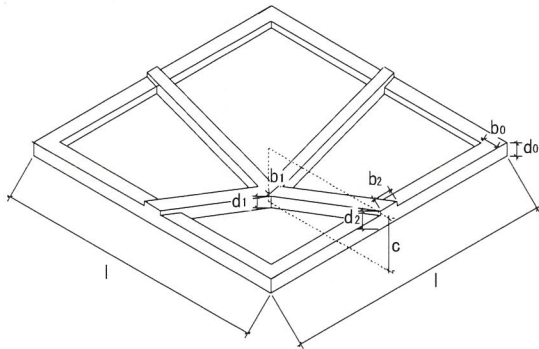


図8 解析モデルの形状と寸法

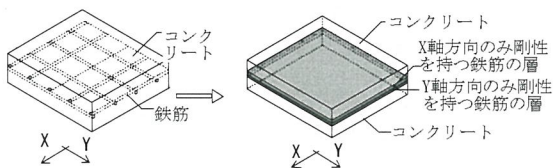


図9 RC要素のモデル化

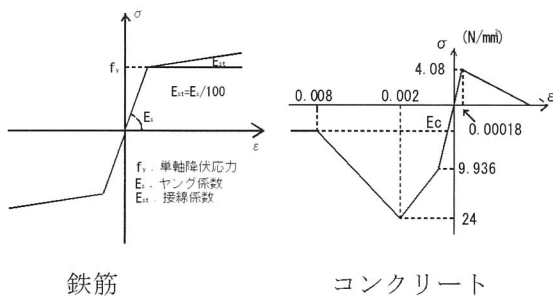


図10 応力-ひずみ関係

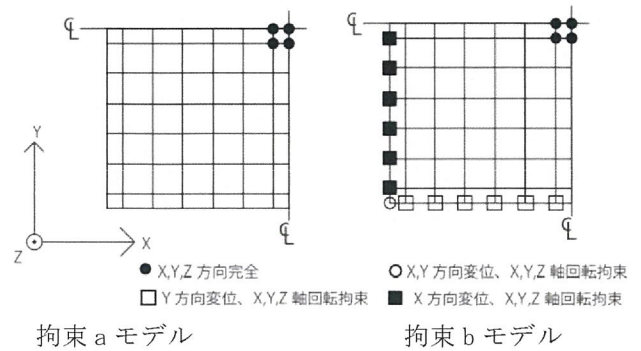


図11 境界条件

表2 解析条件と標準タイプ(灰色部分)

(1) 殻ライズ; c (mm)	(2) 斜梁寸法; b1 (mm)	(3) 斜梁寸法; d1 (mm)	(4) 斜梁; b1/b2 および d1/d2
600	180	30	1
900	360	180	3
1200	540	360	9
1800	720	540	15
2400	900	720	
		900	

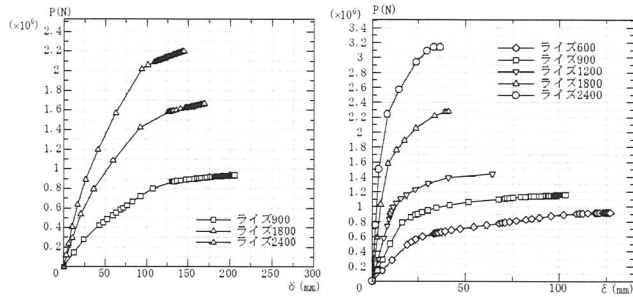
3.2 解析結果

まずライズの変化については、拘束にかかわらずライズが上がるにつれ剛性、耐力共に大きくなり、最大耐力時の変位(変形能力)は小さくなった。また拘束について比較すると耐力は約1.5倍拘束bの方が大きくなっているが、変形能力は2~5倍拘束aの方が大きくなっている。斜梁については幅をパラメータとしたモデルはせいをパラメータとしたモデルに比べるとそれほど耐力に変化は見られなかった。拘束bにおいてはせい、幅共にほぼ同じような結果が見られる。これは周辺を拘束することによって斜梁にそれほど応力が生じなくなり、シェル部分が先に降伏することによって斜梁の断面に関係なく耐力がほぼ同じになったと考えられる。またせいが30mmの拘束bモデルだけは耐力も変形能力も小さくなっている。これはシェル部分より先に斜梁部分が降伏していることが考えられる。これらは拘束bモデルの崩壊メカニズムを見ると明らかであり、シェル部分のひび割れが生じた後、シェルの中心付近が圧縮降伏し、その後鉄筋が引張降伏している。せいが30mmモデルはまず斜梁が降伏しその後柱付近のコンクリートが圧縮降伏している。

次に斜梁の縁の断面をパラメータとしたモデルを見ると断面を変化させたモデルは拘束にかかわらず耐力が変化していない。つまり鉛直荷重に関しては斜梁の縁の断面は耐力に対して関係ないと考えられる。

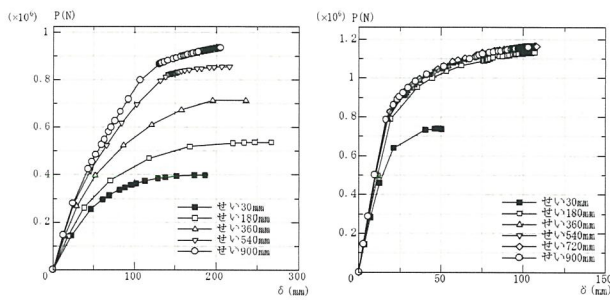
最後に構造物重量に対する最大耐力の比と床の厚さ(シェル部分+斜梁)の関係を見ると床の厚さが小さく、かつ構造物重量に対する最大耐力の比が大きいモデルは拘束aでは斜梁の縁のせいと幅が60mmのモデルで拘束bではせい30mmのモデルであった。しかしせい30mm

の拘束 b モデルは変形能力が少し小さく、それに比べると斜梁の縁のせいと幅が 60mm のモデルは拘束 a、b 共に構造物重量に対する最大耐力の比床の厚さが小さく、かつ構造物重量に対する最大耐力の比が大きいのでこのモデルが理想的な形状と考えることができる。



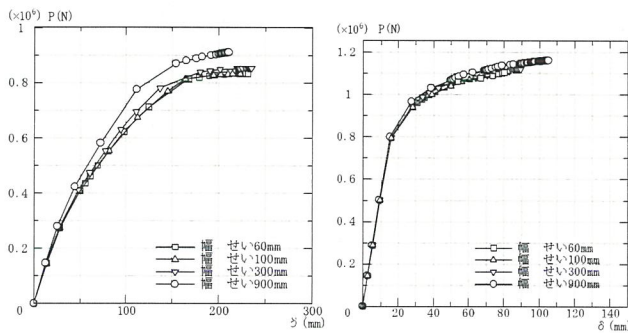
ライズ 拘束 a

ライズ 拘束 b



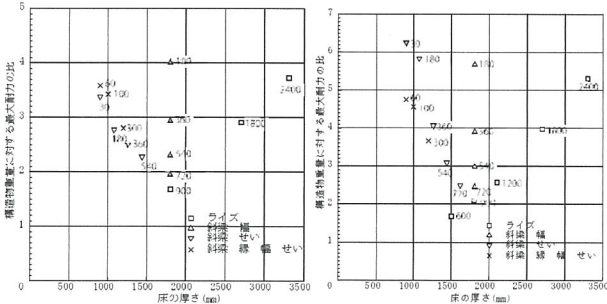
斜梁のせい 拘束 a

斜梁のせい 拘束 b



斜梁の縁のせい 拘束 a

斜梁の縁のせい 拘束 b



床の厚さと最大耐力の関係

図 12 解析結果

4 単層 4 ユニット HP シェルと平板の比較

平面上に複数個並べた四葉傘型 HP シェルの力学的特性を把握するため、4 個並べた四葉傘型 HP シェルとラーメン構造を、幾何学的非線形性を考慮した弾塑性解析を行い、比較検討する。

4.1 解析モデル

解析モデルは、前章で取り扱ったシェルを平面上に 4 枚並べたモデルと厚さ 180(mm) のスラブを持つ 900(mm)×900(mm) の梁モデルである。

4.2 荷重条件

解析モデルに作用させる荷重は等分布荷重と 3 種類の偏分布荷重とし、図 13 のようにかける。

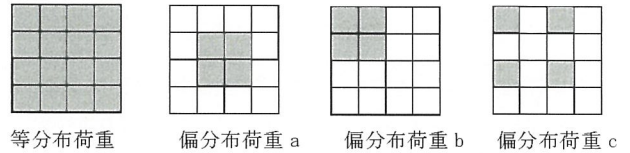


図 13 荷重条件 (灰色部分に荷重をかける)

4.3 解析結果

まず HP シェルの等分布荷重と偏分布荷重について見てみると、偏分布荷重 b の初期剛性が一番大きいことが分かる。しかし 1×10^6 (N) を越える辺りでは急に変形が大きくなり、変形能力もそれほど大きくなかった。ほかの偏分布荷重も等分布荷重に比べると初期剛性、最大耐力共に小さい結果となった。

平板と HP シェルを比べると、同じ質量においてはほぼすべてのモデルで HP シェルの方が構造的に優れていることが分かる。しかし荷重変位関係で見ると、平板モデルはなだらかに耐力が上がらなくなるが HP シェルは降伏しだすと急に耐力が上がらなくなり、その点では平板モデルの方が優れていると考えられる。さらに偏分布荷重に対しても HP シェルは影響を受けやすい結果となった。

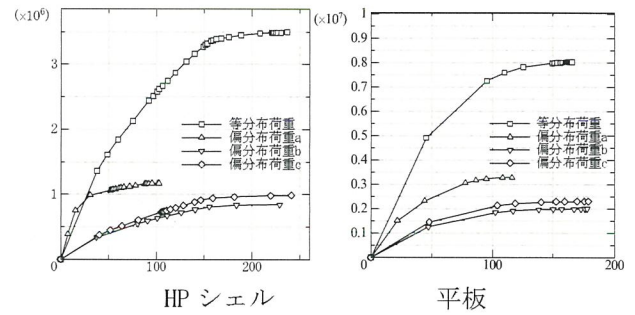


図 14 荷重—変位関係

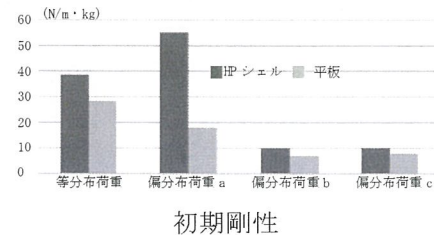
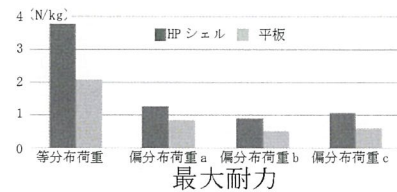


図 15 HP シェルと平板の比較 (構造物重量比)

5 多層傘型四葉 HP シェルの力学的特性の評価

まず四葉傘型 HP シェル構造に対して塑性ヒンジフレームへモデル化を行う。許容応力度設計を行った多層四葉傘型 HP シェルモデルの弾塑性解析を行うことによって弾塑性ばねの係数を算出する。次にモデル化の適合性を確認し、最後に時刻歴地震応答解析を行い、その動的挙動を把握し、様々なモデルへと展開していく。

5.1 弾塑性解析による非線形ばねの算定⁽⁵⁾

5.1.1 解析モデル

解析モデルは、1 辺の長さが 12000 (mm)、ライズが 900 (mm)、斜梁は、柱側の幅を 900 (mm)、縁側の幅を 60 (mm)、縁梁は幅を 300 (mm)、せいを 60 (mm) とする 4 葉傘型 HP シェルを 4 枚組み合わせたものとし、斜梁の柱側のせいと縁側のせいをそれぞれ 3 層モデルは 1000 (mm) と 160 (mm)、5 層モデルは 1300 (mm) と 460 (mm) とする。それぞれのモデルを図 13、14 に示す。

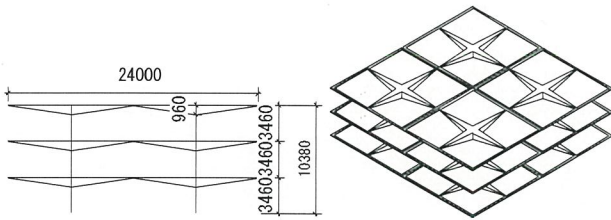


図 13 3 層モデル

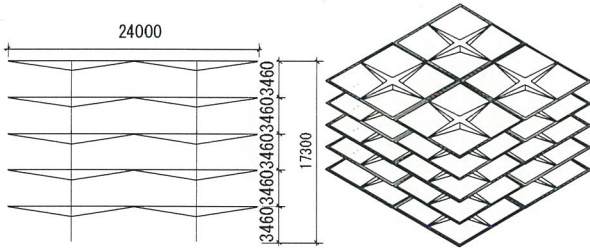


図 14 5 層モデル

5.1.2 解析手法

幾何学的非線形性を考慮した弾塑性解析を行う。荷重は水平荷重のみを考慮し、水平荷重は A_i 分布による地震荷重とする。また境界条件は柱脚部を完全固定とする。モデルの変形および降伏する部材より図 16 及び式 (1) ~ (3) のようにばねの算出を行う。

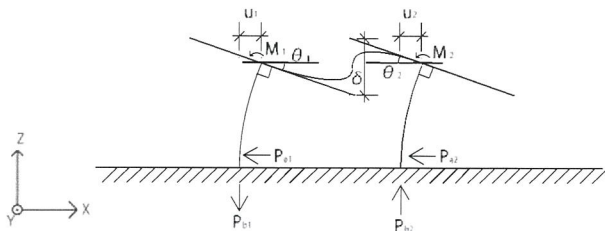


図 16 Z 軸方向の面外変形ばねの算定

$$(P_{a1}-P_{a2})/2=k_a(u_1-u_2) \quad \dots \dots \dots \text{式(1)}$$

$$(P_{b1}-P_{b2})/2 =k_b \delta \quad \dots \dots \dots \text{式(2)}$$

$$(M_1-M_2/2) = k_c(\theta_1-\theta_2) \quad \dots \dots \dots \text{式(3)}$$

5.1.3 非線形ばねの算定

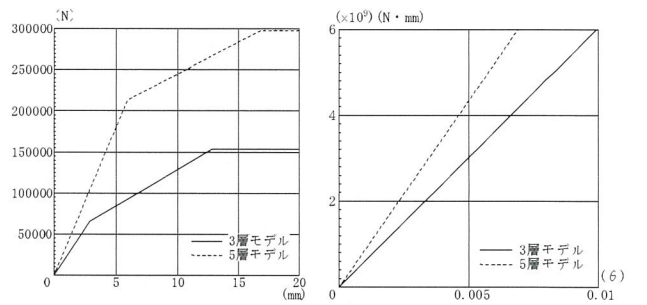
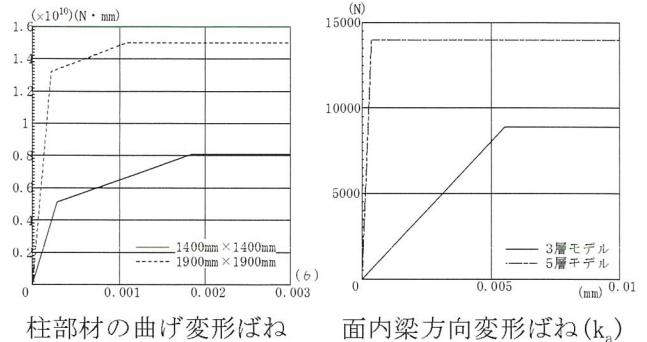


図 17 非線形ばねの荷重—変形関係

5.2 塑性ヒンジフレームの弾塑性解析

5.2.1 解析モデル

シェルモデルと塑性ヒンジフレームモデルの比較し、塑性ヒンジフレームモデルの精度を検討していく。シェル部分は剛体と非線形ばねでモデル化を行った。図 18、19 のように解析モデルは X 軸 Y 軸共に 1 スパンのフレーム構造とする。1 スパンの大きさは 12000 (mm) とし、一層の高さは 3460 (mm) とする。

5.2.2 解析手法

数値解析に使用する柱部材は図 20 に示すように柱脚および柱頭に弾塑性ばねを有する剛体要素でモデル化を行う。荷重条件と境界条件は前項と同様とする。

図 21 にシェルモデルと塑性ヒンジフレームの比較を示す。

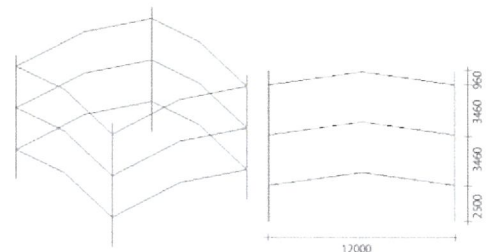


図 18 3 層モデル

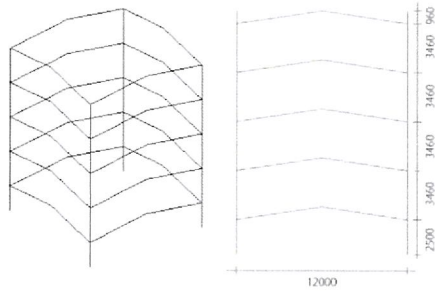


図 19 5層モデル

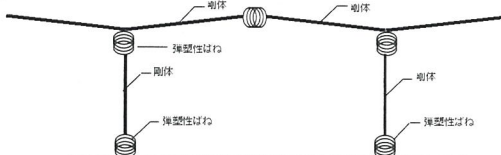


図 20 塑性ヒンジフレームのモデル化

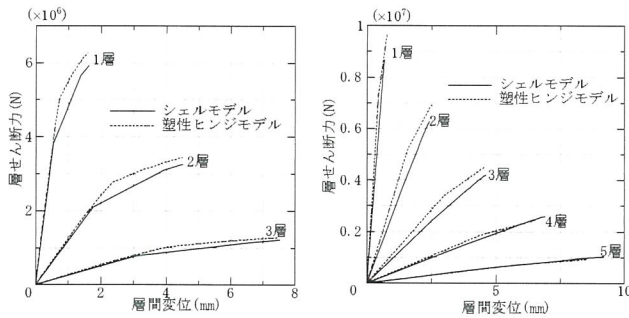


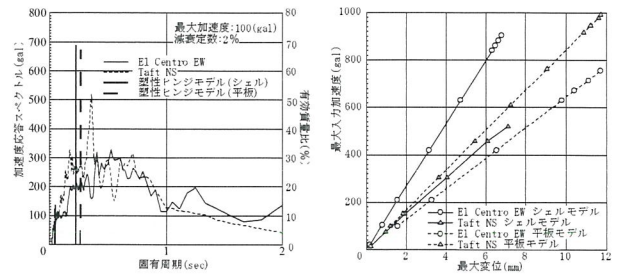
図 21 シェルモデルと塑性ヒンジフレームの比較

5.3 時刻歴地震応答解析

地震波は EL CENTRO 地震波の EW 成分と TAFT 地震波の NS 成分の 2 種類を採用する。入力する地震波にはこれらのデータの 15 秒間を用い、地震波の最大入力加速度を 100gal に設定し、時刻歴応答解析を行う。比較のため 4 章で用いた平板モデルを 5 層に積層したラーメンモデルに対して塑性ヒンジフレームにモデル化したものにも解析を行う。柱の断面は 2500 × 2500 とする。減衰には剛性比例型減衰⁽⁶⁾を用い、減衰定数は 3% とする。解析結果を図 23、24 に示す。

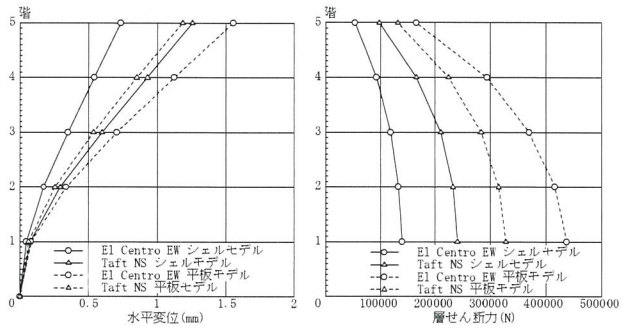
5.4 解析結果

HP シェルの弾塑性解析より横荷重がかかるとシェルとシェルの接合部で塑性ヒンジが生じることが分かり、特に面外方向の鉛直変位が特に大きいことが分かった。また塑性ヒンジフレームへのモデル化においては、初期剛性はほぼ同じような値をとっているが、初期降伏が生じた後は誤差が大きくなっている。また層が多くなると誤差も大きくなっており、モデル化を慎重に行わなければならない。地震応答解析では、シェルモデルの方が最大変位は小さいが、弾性限での最大入力加速度は平板モデルの方が大きくなっている。



加速度応答スペクトルと有効質量比

最大水平変位と最大入力加速度



最大変位

最大層せん断力

図 22 塑性ヒンジフレームと平板モデルの比較

6 結

- (1) 製作・実験を通して HP シェルの施工性の利点及び力学的合理性を検証することができた。
- (2) 拘束 a モデルでは斜梁の断面が耐力及び変形能力に大きく影響を与えるが、拘束 b ではある一定の断面があればあまり影響が表れない。また構造物重量に対する最大耐力の比と床の厚さの関係を見ると斜梁の縁の断面は小さい方が合理的である。
- (3) 平板と HP シェルを比べると、同じ質量においてはほぼすべてのモデルで HP シェルの方が構造的に優れていることが分かる。しかし偏分布荷重に対しては HP シェルの方が影響を受けやすい結果となった。
- (4) 横荷重がかかるとシェルとシェルの接合部で塑性ヒンジが生じることが分かり、特に面外方向の鉛直変位が特に大きいことが分かった。また塑性ヒンジフレームへのモデル化においては、初期剛性はほぼ同じような値をとっているが、初期降伏が生じた後は誤差が大きくなっており、また層が多くなっても誤差は小さくなっている。シェルモデルの方が最大変位は小さいが、弾性限での最大入力加速度は平板モデルの方が大きくなっている。

参考文献

- (1) 斎藤裕：Felix Candela, TOYO 出版, 1995年8月
- (2) 高山 誠, 縣 知弘：4枚合わせ HP Shell の力学的性状に関する研究：(その1) 解析的研究, 日本建築学会論文集, 2005年9月, pp. 813-814
- (3) 川井, 上田, 竹中, 渡辺, 樋口, 毛井：鉄筋コンクリート構造物の離散化極限解析(その1)、生産研究, 第38巻, 1986年, pp. 181
- (4) 阿部 浩一, 黒川 信也：基本的応力解析ソフト NASTRAN を用いたコンクリート系材料ソリッド要素の弾塑性解析適用についての一提案, 近畿大学九州工学部研究報告, 1999年3月, pp. 49-54
- (5) 日本建築学会：建築耐震設計における保有耐力と変形性能(1990), 日本建築学会, pp. 396-397, 1990年, 1月
- (6) 大崎順彦：建築振動理論, 彰国社, 1994, 4月

討 議

◆討議 [大内先生]

- (1)弾性限で実験を終わらせたのであれば実験する必要がないのではないか。
- (2)施工性についてはどうなのか。
- (3)20mmのシェルの厚さの施工品質をどのようにチェックしたのか。

◆回答：

- (1)施工性を確かめるためと傘型四葉HPシェルの構造特性を調べるために実験を行った。
- (2)素人でもそれほど苦勞せず曲面を作ることができた。
- (3)定規を型枠の上に設置し、定規ごとコンクリートで打ったのでそれほど誤差は出ていないと考えられる。

◆討議 [谷池先生]

- (1)4枚並べた時の接合部はどういう形なのか。
- (2)ばねで近似するという事は実際の施工ではどうなる。
- (3)実際に接合部のことはしていないのか。
- (4)水平力を受けた場合は接合部が難しいと思うがどうなのか。

◆回答：

- (1),(2)鉄筋を繋げてコンクリートも一緒に打つことによって、全体を一体とする。
- (2)剛接合としたモデルを塑性ヒンジモデルにモデル化を行ったので実際の施工でも一体として考えている。
- (3)解析では接合部は剛接合だけしか行っていない。
- (4)そのために剛接合にしたシェルモデルを塑性ヒンジモデルにモデル化を行って、さらに比較を行い、適合性を確かめた。

◆討議 [角掛先生]

- (1)コンクリートの引張強度と鉄筋の強度が高強度だが何か手を加えたのか。
- (2)鉄筋の規格は何なのか。

◆回答：

- (1)何も手を加えていないが、材料実験を行うとそのような結果が出てきたので、そのまま用いた。

- (2) JIS 規格 JISG4401 炭素工具鋼鋼材
鋼種 SK95 (改定前は SK4)

◆討議 [谷口 徹先生]

- (1)コンクリートの引張強度はどのように出したのか。

◆回答：

- (1)モルタルの曲げ試験より算出した。

◆討議 [松村先生]

- (1)形状が梁と梁の真ん中が薄くなっており、単純梁の等分布荷重による曲げモーメント分布では真ん中が弱点になるのではないか。

◆回答：

- (1)構造重量に対する最大耐力の比が小さいものと床の厚さが小さいものを最適形状とし、そのため床の厚さが小さくするためには梁と梁の真ん中を薄くした方が効率が良かったから。