対角材として PC 鋼棒部材を組み込んだ単層 2 方向格子ドームの 座屈性状に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON BUCKLING BEHAVIOR OF SINGLE LAYER TWO-WAY GRID DOME WITH PC BARS AS DIAGONALS

九嶋 壮一郎*, 藤本 益美**, 今井 克彦***

Soichiro KUSHIMA, Masumi FUJIMOTO and Katsuhiko IMAI

This paper treats the buckling experiment of single layer two-way grid dome with PC bars as diagonal members. PC bars are used to stiffen the in-plane rigidity of two way grid. The introducing initial axial force to PC bars, the central loading, and the asymmetrical loading are performed in order to investigate the effect of initial axial force of PC bars on the buckling behavior of single layer two-way grid domes. The specified value of initial axial force is introduced to PC bars. The rigidity and the buckling load of these domes are increased by the effect of the initial axial force of PC bars. Moreover, buckling behavior of experimental results is compared with the numerical results. The validity of the numerical method used in this study is shown.

Keywords: Single layer two-way grid, Diagonal member, PC bar, Initial axial force, Buckling experiment, Discrete treatment analysis

単層2方向格子, 対角材, PC鋼棒部材, 導入軸力, 座屈実験, 離散的取扱ひ法

1. 序

単層ラチスドームはスレンダーな外観を有し, 自重に対する剛性や耐力が高い軽量構造である。ラチスの網目は, 図1に示すように主に3方向格子, 2方向格子, 6角形格子に分類される。3方向網目を有する単層ラチスドームはこれまでに多くの実験的, 数値的研究が行われ¹⁾, 数多くのドームが建設されてきた。中でも円形平面の単層3方向ラチスドームについては, 弾塑性座屈性状を含む力学的特性が明らかにされ, 設計用の座屈荷重算定式も提案されている²⁾。

一方, 2方向格子の単層ラチスドームは優美で透明性が高いという特徴を有しているが, 3方向格子に比べて面内せん断剛性が低くなり, 全体座屈が起こりやすく座屈強度が低くなる^{3,4)}。これらの特徴のために, 単層2方向格子ドームの建築例は, 3方向格子に比べて数少ない状況にある。

上記に対して, 2方向格子の視覚的特長を保持しつつ, 構造的な欠点を補うために, テンション材としてケーブルを格子対角に配置し面内剛性を付与する構造形式が提案されている^{5,6)}。しかし, 設計上重要になる不安定モードの把握に関する実験的・数値解析的研究は十分には行われておらず, その普及の妨げとなっている。

テンション材として用いるケーブルには弛み防止等のために初期軸力が導入される⁷⁾。この場合, 各ケーブルをジャッキにより緊張するため, 目標とする導入軸力に対して高い精度と均一性を有している。一方, 施工の際に各々のケーブル軸力の管理を行いながら軸力導入する必要があるため, 多くの時間を要する場合がある。また, このテンション材への初期軸力が力学的特性に与える影響も不明な

点が多い⁸⁾。したがって, 単層2方向格子シェルにテンション材を配置した場合の力学的性状の把握, テンション材への軸力導入量が単層2方向格子シェルの力学性状に与える影響を明らかにすること及び施工性に配慮したテンション材の選択が重要となる。

図1 単層ラチスドームに用いられる網目とラチス構造の例

そこで, 本研究では, まずテンション材として2方向格子の対角に用いるPC鋼棒部材の初期軸力の導入実験を行い, PC鋼棒部材の軸力導入精度を検討する。次に, PC鋼棒部材の初期軸力を変数として, 単層2方向格子ドームの中央集中載荷及び非対称載荷実験を行

* 俣竹中工務店 工修

** 大阪市立大学 助教授・工博

*** 大阪大学 教授・工博

Takenaka Corporation, M. Eng.

Assoc. Prof., The Graduate School of Eng., Dept. of Urban, Osaka City Univ., Dr. Eng.

Prof., The Graduate School of Eng., Dept. of Global Architecture, Osaka Univ., Dr. Eng.

う。2方向格子ドームの荷重変形状、座屈荷重などの座屈性状を把握し、テンション材への導入軸力量の差異が力学的性状に与える影響を論じる。さらに離散的取扱い法による数値解析結果と実験結果との比較を行い、数値解析法の適用性の検討を行う。

2. 実験計画

2.1 試験体

試験体は正方形平面の切断球面形状であり、子午線アーチ半開角 30° 、半開角あたりの構面分割数2、曲率半径は4mである。ドーム外観と形状発生過程を図2に示す⁹⁾。

試験体網目模様は、PC鋼棒部材を格子対角に組み込んだ2方向格子である。PC鋼棒部材は2方向格子に面内剛性を付与するために用いられており、弛みの防止やドームの形状安定性を高めるために、初期軸力を導入する。初期軸力の導入は、PC鋼棒部材の締め付けにより自動的に行うことが可能である材長指定型の方法を採用する。

試験体は、計4体であり、導入する軸力が2.94kNの試験体名をT03、11.8kNの試験体名をT12とし、それぞれに中央集中載荷ならびに非対称載荷実験を行う。試験体平面図を図3に、試験体立面図を図4に、試験体各部名称を図5に示す。

図2 ドーム外観と形状生成過程

図3 試験体平面図

図4 試験体立面図

図5 試験体各部名称

試験体の格子部材には $\phi 34 \times 2.3$ (STK400)円形鋼管を、接合部には $\phi 90/82$ のKT-Iトラスシステムを用いる。対角材には $\phi 7.1$ PC鋼棒部材を用いており、部材端部は、特殊な接合部ソケットを用いている。接合ソケットは、引張力のみに抵抗する機構であり、材長調整が容易な機構となっている。鋼管部材を図6に、PC鋼棒部材を図7に示す。部材の断面諸量を表1に、機械的性質を表2に示す。接合部の機械的性質を表3に示す。

図6 鋼管部材

図7 PC鋼棒部材

図8 試験体構成部材概要図

表1 部材の断面諸量

	ϕ (mm)	t(mm)	A(mm ²)	Z _p (mm ³)	I(mm ⁴)
Pipe	34.06	2.19	2.19x10 ²	2.23x10 ³	2.80x10 ⁴
PC Bar	7.1	-	3.96x10	5.97x10	1.25x10 ²

表2 部材の機械的性質

	E(N/mm ²)	σ_y (N/mm ²)	σ_b (N/mm ²)
Pipe	2.08x10 ⁵	46.9x10	54.7x10
PC Bar	2.13x10 ⁵	-	11.8x10 ²

表3 接合部の機械的性質

第1降伏モーメント My ₁ (kNmm)	第2降伏モーメント My ₂ (kNmm)	回転ばね剛性(kNmm/rad)		
		1次 k ₀	2次 k ₁	3次 k ₂
3.16 x10 ²	5.76 x10 ²	5.41 x10 ⁴	9.08 x10 ³	3.14 x10 ³

2.2 テンション材への初期軸力導入方法

テンション材の初期軸力はノード面間設計寸法より部材長を短くしたPC鋼棒部材を特別な加力装置なしに締め付けることにより自動的に導入される。組み立て時のPC鋼棒部材長は、締め付けによるPC鋼棒部材の伸びを、鋼管の軸縮みが生じないと仮定し定め、設計値に対し、T03では約0.5mm(至361 μ)、T12では約2.0mm(至1,443 μ)短くする。表4にPC鋼棒部材の組み立て寸法を示す。

表4 PC鋼棒部材組み立て寸法

部材種別	ℓ (mm)	ΔL (mm)	
		T03	T12
7	1332.21	0.48	1.92
8	1355.62	0.49	1.96
9	1359.19	0.49	1.96
10	1437.72	0.52	2.08
11	1601.45	0.58	2.31

ℓ ノード面間設計寸法
 ΔL 軸力導入用調整寸法

PC鋼棒部材の締め付けは試験体の中心部から先に行い、中心部に対して点对称となる格子位置を内から順に行う。なお、T12では、PC鋼棒部材の締め付けは、1.05mm隙間ゲージを使用し、2段階で行い、初期軸力が均等に導入されるよう注意した。

2.3 載荷・測定

写真1に載荷装置取り付け後の試験体外観を示す。載荷はPC鋼棒部材の初期軸力導入後に油圧ジャッキで行い、座屈後領域まで加力を行う。載荷点は、中央集中載荷では節点13、非対称載荷は節点12、13である。非対称載荷にはトーナメントシステムを用いる。試験体4隅点の砲弾型ノードを支持台に固定し、移動と回転を拘束することを目指す。非対称載荷システムを図9に示す。測定項目は載荷荷重、節点変位、部材歪である。図10に非対称載荷の測定点及び載荷点を示す。

図9 非対称載荷システム

図10 測定点及び載荷点（非対称載荷時）

写真1 試験体外観

3. 初期軸力導入結果と考察

3.1 初期軸力導入量の均一性と導入精度

PC鋼棒部材締め付け後の平均導入初期軸力を表5に示す。中央集中載荷用試験体における導入初期軸力分布を図11に示す。図中、部材歪を測定していない部材は、導入初期軸力量を0で表している。T03、T12それぞれの試験体において鋼管部材、PC鋼棒部材それぞれの部材群へ初期軸力がほぼ均一に導入されている。

PC鋼棒部材の平均導入初期軸力はT03で4.86kN、T12で11.5kNとなっている。T12では設定導入軸力量11.8kNとほぼ対応しており、工学的に有意の精度で、初期軸力が導入されている。T03においては設定導入軸力量2.94kNに対し、1.92kN大きな初期軸力が導入されている。導入軸力が小さいT03はPC鋼棒部材調整寸法が0.5mmと非常に小さく、製作誤差の導入軸力量への寄与が大きかったためと推論される。

PC鋼棒部材の軸力導入用調整寸法は、PC鋼棒部材の軸力導入時に鋼管の軸縮みが生じないと仮定し定めている。PC鋼棒部材に対する格子部材の伸び剛性比が小さい場合には、格子部材の軸縮みの影響により設定した軸力以下の導入軸力となるため注意が必要である。格子部材とテンション材の弾性係数がほぼ同じ場合、本方法によって有意な初期軸力を導入するためには、PC鋼棒部材に対する格子部材の伸び剛性比が5倍程度は必要である。詳細は本論文の附録に示す。

PC鋼棒部材の締め付けによる初期軸力導入に要した施工時間は15分程度であり、非常に短時間かつ容易な施工が可能であった。テンション材にケーブルを用い、軸力制御しながら各ケーブル部材に緊張を行う初期軸力導入方法に比べ、テンション材としてPC鋼棒部材を用いた場合の施工時における優位性が確認できた。

図11 導入初期軸力分布図

表5 締め付け後の平均導入初期軸力

荷重パターン		中央集中		非対称			
試験体	部材	鋼管		PC鋼棒	鋼管		PC鋼棒
	部位	内部	外周部	部材	内部	外周部	部材
T03	平均(kN)	-6.96	-3.00	4.97	-5.96	-3.24	4.74
	標準偏差	1.27	0.52	1.32	1.34	1.48	1.73
T12	平均(kN)	-15.8	-6.98	11.5	-15.7	-6.82	11.5
	標準偏差	1.77	1.32	1.94	1.75	1.41	1.84

3.2 試験体組み立て形状へ初期軸力が与える影響

中央集中載荷前のT03試験体を例として、PC鋼棒部材への初期軸力導入前、導入後のノード高さ測定値と設計値との差を図12に示す。図中、設計値に対し測定値が低い場合を負、高い場合を正とする。

初期軸力導入前の各節点ノード高さは設計値に対して低くなっていた。特に中央節点における設計値との差は他点に比べて大きく、-14.6mmであった。PC鋼棒へ初期軸力導入後、設計値とノード高さとの差はT03の場合平均-1.5mm、T12にて-1.9mmとなり、各節点のノード高さは設計値に近づき設計形状が精度良く得られている。

軸力導入前の試験体形状に初期不整が無い場合には、軸力導入により格子節点間距離が縮まりノード高さが下がることが予想される。本実験のように形状初期不整がある場合には、軸力導入により格子形状が設計形状に近づき、試験体ノード高さの組み立て精度が向上したと推論できる。

図12 初期軸力導入前後のノード高さの設計値と測定値との差

4. 荷重実験結果と考察

4.1 荷重変位関係

載荷点及びY方向子午線アーチ上節点における荷重と節点鉛直変位の関係を図13～16に示す。

中央集中載荷では、図13に示すように荷重と変位の関係の傾きがT03は5kN、T12は15kN付近より低下している。これは、中心方向PC鋼棒部材に導入した初期軸力がほぼ消失したことによるものである。最大荷重に達した後、載荷点での節点座屈により荷重が減少し始め、載荷点と連結する鋼管部材の座屈により荷重が急激に減少した。子午線アーチ上の節点は3半波長型の変形を示し、図14に示すように載荷点である節点13の変位が最も大きく、次に節点11,15の変位が大きくなった。

図13 中央集中載荷時載荷点約合経路 (T03,T12)

図14 中央集中載荷時Y方向子午線上節点約合経路 (T03)

非対称載荷では、図15に示すように荷重変位関係における傾きの変化は中央集中載荷時ほど明瞭ではないものの、T03は荷重10kN、T12は25kN付近にて確認された。Y方向の子午線アーチ上の節点は、図16に示すように節点11,12,13の順で変位が大きく、載荷点側へ剛体的に回転した。最大荷重に達した後、鋼管部材の座屈により荷重が急激に減少した。

図15 非対称載荷時載荷点約合経路 (T03,T12)

図16 非対称載荷時Y方向子午線上節点約合経路 (T03)

4.2 荷重と歪の関係

荷重と鋼管総歪の関係を図17に示す。鋼管部材は圧縮部材として機能し、中央集中載荷時、非対称載荷時ともに載荷点と連結する部材にて座屈が発生した。座屈が発生する部材では図17に示すように歪の急激な増加が確認された。座屈発生時の部材圧縮応力度はT03において245N/mm²、T12において260N/mm²であり、T12はT03に比べ約7%大きくなっている。部材両端をピンとした場合のオイラー座屈荷重に対する比はそれぞれ95%、100%となった。

図17 中央荷重時荷重と荷点連結鋼管部材歪の関係 (T03)

荷重時に軸力増減が大きいPC鋼棒部材を図18に荷点連結径路の変化とPC鋼棒部材の荷重総歪の関係における変化の関連性を図19に示す。図18に示すように、荷点と連結する中心方向PC鋼棒部材歪は荷重の増加とともに減少し、同一格子内の周方向PC鋼棒部材歪は増加する。図19に示すように、中心方向PC鋼棒部材歪が0になった後、周方向PC鋼棒部材の荷重と歪関係における傾きが1/2に減少した。従って、PC鋼棒部材は引張り部材として機能すると同時に、導入初期軸力が消失するまでは見かけ上、圧縮部材としても機能している。導入初期軸力が大きいT12は、T03に比べ、PC鋼棒部材の初期軸力消失時の荷重が増大し、荷点連結径路上の勾配低下が緩やかになった。

図18 荷重時に軸力増減が大きいPC鋼棒部材

4.3 座屈荷重

荷重実験時の最大荷重を座屈荷重と定義し、実験で得られた座屈荷重を表6に示す。

中央集中荷重時、T03とT12の座屈荷重はほぼ同一の値となり、導入初期軸力の影響は僅かであった。一方、非対称荷重時ではT12の座屈荷重はT03に比べ約10%増大し、導入軸力量により座屈荷重が増加しうること示している。

非対称荷重時、荷点あたりの座屈荷重は中央集中荷重時に比べT03では16%、T12では11%減少した。本実験の範囲内では導入軸力量により荷重パターンの影響が減少しうること示している。

表6 座屈荷重

荷重パターン	中央集中		非対称	
試験体	T03	T12	T03	T12
荷重総荷重(kN)	22.1	22.7	37.2	40.6
荷点あたりの荷重(kN)	22.1	22.7	18.6	20.3

4.4 最終変形

T12試験体について中央集中荷重時、非対称荷重時の最終変形形状を写真2、写真3に示す。中央集中荷重、非対称荷重どちらにおいても荷点と連結する鋼管部材の座屈が発生した。T03も荷重パターンごとにT12と同様な最終変形を示した。非対称荷重時、座屈荷重が大きかったT12の方がT03に比べ残留変形量が大きくなった。

写真2 中央集中荷重実験後

図19 PC鋼棒部材歪の初期軸力消失に伴う荷点連結径路の変化 (中央集中荷重)

写真3 非対称載荷実験後

5. 解析結果と実験結果の比較

5.1 数値解析方法の概要

本論文における数値解析法の詳細は文献⁹⁾に示す。以下に本論文における数値解析法の特徴を示す。システムトラス接合部の剛性と大きさを考慮するために、ノードを剛域に、部材とノードの連結部を回転ばねとみなす¹⁰⁾。部材モデルには、接合部を含む鋼管トラス部材の増分弾塑性剛性行列に部材端の剛域と回転ばねを導入したモデルを採用する。鋼管トラス部材には、座屈撓角法に基づく接線剛性行列を採用し、幾何学的ならびに材料学的非線形性を考慮する。部材の降伏関数には、数値計算上の取扱いが簡単となるように、部材の軸力(X軸方向)、Y軸、Z軸まわりの曲げモーメントによる球面式を用いる。回転ばねの曲げモーメント回転角関係は、trilinearとする。PC鋼棒部材は節点間距離を材長とし、軸力が引張の場合に剛性を有するトラス部材とする。

初期軸力導入過程には荷重増分法を、釣合経路の追跡法には弧長増分法を用いる。座屈点は、荷重増加中に剛性行列が零固有値を有する最小の荷重とする。

解析対象ドームの節点座標は、水平方向に設計値を、鉛直方向に初期軸力導入後ノード高さの測定値を採用する。初期軸力量には設定値を用いる。部材断面諸量、部材の機械的性質、接合部の機械的性質には表1～3の値を用いる。鋼管部材の歪硬化係数は0.01とする。

5.2 数値解析の結果と考察

T03, T12について中央集中載荷時、非対称載荷時の載荷点の荷重と変位関係の解析結果を図20～22に示す。数値解析により得られた座屈荷重を表7に示す。T03について中央集中載荷時、非対称載荷時の座屈モードを図23, 24に示す。

中央集中載荷時、初期剛性ならびにPC鋼棒部材の初期軸力消失による剛性の低下及び幾何学的非線形性の影響による剛性の低下についても数値解析結果と実験結果とは精度良く一致した。非対称載荷時、解析結果による初期剛性は実験結果よりも高くなったが、2次剛性はほぼ等しくなり、その後の剛性変化についてもほぼ一致している。

座屈荷重について、数値解析結果は実験結果に比べて、中央集中載荷時に8%、非対称載荷時に25%大きな値となった。

座屈モードについて、中央集中載荷時の数値解析結果は実験結果

と一致し、載荷点における節点座屈と載荷点に連結する部材の個材座屈とが連成した座屈モードとなった。非対称載荷時の数値解析結果についても実験結果と一致し載荷点と連結する部材での座屈モードとなった。

以上より本論文における数値解析法は中央集中載荷時について荷重と節点変位の関係、座屈荷重、座屈モードを精度良く算定することが可能であることが確認された。非対称載荷時について本数値解析法は、荷重と節点変位の関係における剛性変化や導入軸力量の差異による座屈荷重の大小等の性状が実験結果と対応したが、いずれも実験結果に比べ大きな値となった。

表7 数値解析による座屈荷重

荷重パターン	中央集中		非対称	
試験体名	T03	T12	T03	T12
実験座屈荷重 (kN)	22.1	22.7	37.2	40.6
解析座屈荷重 (kN)	22.1	24.5	47.0	50.3

図20 中央集中載荷時載荷点釣合経路(T03,T12)

図21 非対称載荷時載荷点釣合経路(T03)

図22 非対称載荷時載荷点釣合経路(T12)

図23 中央集中载荷時座屈モード

図24 非対称载荷時座屈モード

6. 結論

本論文では、既往の研究が少ないテンション材を配置した単層2方向格子シェルの基本的な力学的特性とテンション材が力学的特性に与える影響の把握を目的とし、PC鋼棒部材を対角材として用いた単層2方向格子ドームを対象として载荷実験を行った。

テンション材の取り付け及び初期軸力導入時の施工性に着目し、PC鋼棒部材の締め付けによる初期軸力導入方法を提案し、軸力導入精度の確認も行った。

さらに、既往の研究では対象とされていないPC鋼棒部材への初期軸力導入量が力学的特性に与える影響を、異なる初期軸力導入量の試験体について载荷実験を行い両者の比較を行うことにより論じた。また、荷重分布形が上記性状に与える影響についての検討も行った。

载荷実験により基本的な力学的特性を把握した後、離散的取扱法による解析結果と実験結果の比較を行い、離散的取扱法の適用性を論じた。

本研究により得られた結論を以下に示す。

- 1) PC鋼棒部材の締め付けによる材長指定形の初期軸力導入は短時間かつ簡易に行うことができた。また、導入される初期軸力は設定値とほぼ対応し、その有用性が確認された。
- 2) 初期軸力の導入により、試験体の形状安定性が確保された。
- 3) PC鋼棒部材に導入された軸力により、PC鋼棒部材は導入軸力の消失時までは見かけ上圧縮材として機能することを確認した。
- 4) PC鋼棒部材に導入された軸力が消失することにより、荷重変形関係での傾きが減少した。導入軸力が大きい場合には、傾きが減少する荷重が大きくなった。
- 5) 中央集中载荷時にPC鋼棒部材の初期軸力の差異が座屈荷重に与える影響は小さかった。
- 6) 非対称载荷時にPC鋼棒部材の初期軸力量が大きいT12はT03に比べ座屈荷重が10%大きくなった。
- 7) 離散的取扱法は、中央集中载荷時について工学的に有意の精度で荷重と節点変位の関係、座屈荷重、座屈モードの推定に有効である。非対称载荷時には、荷重と節点変位の関係、座屈荷重、

座屈モードについて定性的な評価は行うことが可能だが、定量的には実験結果に比べて高い値を示した。

(謝辞) 本研究の一部は、科学研究費補助金・基盤研究(C)及び阪大フロンティア研究機構の補助を受けた。

参考文献

- 1) 斎藤公男, 岡田章他: テンション・グリッド・ドーム(TGD)のストリング効果に関する基礎的研究(その1~3), 日本建築学会大会学術講演集梗概集(関東), B-1, pp. 857-862, 1997.9
- 2) Kato, S., Fujimoto, M. and Ogawa, T.: Buckling Load of Steel Single-Layer Reticulated Domes of Circular Plan, Journal of IASS 2005, Vol. 46, n.1, pp. 41-63, 2005.4.
- 3) Kato, S. and Yamashita, T.: Evaluation of Elasto-plastic Buckling Strength of Two-way Grid Shells using Continuum Analogy: Int. J. of Space Structures, Vol. 17, No. 4, pp. 249-261, 2002.
- 4) Gioncu, V.: Buckling of Reticulated Shells: State-of-the-Art, Int. J. of Space Structures, Vol. 10, No. 1, pp. 1-46, 1995.
- 5) Schlaich, J. and Schober, H.: Glass-covered Lightweight Spatial Structures, Proc. IASS-ASCE Int. Symp. 1994, Atlanta, pp. 1-27, 1994.4.
- 6) 金山敬, 川口健一: パーツ方式によるハイブリッド単層ラチスシェルのパーツ配置設計法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第559号, pp. 157-163, 2002.9.
- 7) 宮里直也, 岡田章, 斎藤公男: 逆工程解析に基づくテンション構造の工法選択手法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第560号, pp. 133-138, 2002.10.
- 8) 藤本益美, 今井克彦, 木下陵二: PC鋼棒により初期軸力が導入された単層グリッドドームの座屈実験の数値シミュレーション, 計算工学講演会論文集, Vol. 3, pp. 793-796, 1998.5.
- 9) Nooshin, H. and Tzourmakliotou, D.: An Approach for Generation of Geodesic Forms, Proc. 4th International Conference on Space Structures, Guildford, pp. 1085-1096, 1993.9.
- 10) 坂 壽二, 日置興一郎: ねじ込み接合で組み立てた立体トラスの座屈挙動, 日本建築学会論文報告集, 第331号, pp. 1-9, 1983.9.

附録

鋼管の縮みを考慮した場合にPC鋼棒部材に導入される初期軸力量

鋼管を2方向格子部材, PC鋼棒部材を格子対角部材とする図A.1に示す正方形ユニットを対象とし、鋼管縮みを考慮した場合のPC鋼棒部材導入軸力量を求める。部材接合部は全てピン接合とする。

軸力導入後の軸力の釣合条件と軸力導入前後の適合条件より実際のPC鋼棒部材の伸びを求め、実際にPC鋼棒部材に導入されている軸力を算出する。数式で用いる記号を下記に示す。

$A_{pc}(\text{cm}^2)$: PC鋼棒断面積	$\ell_{pc}(\text{cm})$: PC鋼棒ノード間設計寸法
$E_{pc}(\text{kN/cm}^2)$: PC鋼棒弾性係数	$L_{pc}(\text{cm})$: 寸法調整後PC鋼棒寸法
$A_{tube}(\text{cm}^2)$: 鋼管断面積	$\Delta \ell_{pc}(\text{cm})$: 軸力導入用調整寸法
$E_{tube}(\text{kN/cm}^2)$: 鋼管弾性係数	$\Delta \ell_{pc}^*(\text{cm})$: 実際のPC鋼棒の伸び
$P_{pc}(\text{kN})$: PC鋼棒軸力	$\ell_{tube}(\text{cm})$: 鋼管ノード間設計寸法
$P_{tube}(\text{kN})$: 鋼管軸力	$\Delta \ell_{tube}^*(\text{cm})$: 鋼管の縮み
$P_{pc}^*(\text{kN})$: PC鋼棒設定軸力

図A.1 鋼管とPC鋼棒部材によって構成される2方向格子ユニット

図A.2 軸力導入によるPC鋼棒部材寸法変化

初期軸力導入後のPC鋼棒部材軸力と鋼管の軸力は

$$P_{pc} = A_{pc} E_{pc} \frac{\Delta \ell_{pc}^*}{L_{pc}} = A_{pc} E_{pc} \frac{\Delta \ell_{pc}^*}{\ell_{pc} - \Delta \ell_{pc}} \quad (A-1)$$

$$P_{tube} = A_{tube} E_{tube} \frac{\Delta \ell_{tube}^*}{\ell_{tube}} \quad (A-2)$$

と表せる。

初期軸力導入後の鋼管部材長は軸力導入前後での適合条件より

$$\frac{\Delta \ell_{tube}^*}{2} : \frac{\Delta \ell_{pc} - \Delta \ell_{pc}^*}{2} = \frac{\ell_{tube}}{2} : \frac{\ell_{pc}}{2}$$

の関係が成り立つので

$$\Delta \ell_{tube}^* = \frac{\ell_{tube} (\Delta \ell_{pc} - \Delta \ell_{pc}^*)}{\ell_{pc}} \quad (A-3)$$

となる。

一様の初期軸力が導入されている場合、PC鋼棒部材と鋼管の軸力との関係において

$$2P_{pc} \cos \frac{\pi}{4} = P_{tube} \quad (A-4)$$

が成り立つ。

式(A.1)～(A.4)より

$$\Delta \ell_{pc}^* = \frac{A_{tube} E_{tube} \Delta \ell_{pc} (\ell_{pc} - \Delta \ell_{pc})}{\sqrt{2} A_{pc} E_{pc} \ell_{pc} + A_{tube} E_{tube} (\ell_{pc} - \Delta \ell_{pc})} \quad (A-5)$$

従って実際にPC鋼棒部材に導入される軸力は

$$P_{pc} = A_{pc} E_{pc} \frac{\Delta \ell_{pc}}{\ell_{pc}} \frac{A_{tube} E_{tube}}{\frac{A_{tube} E_{tube}}{\ell_{tube}} \frac{\ell_{pc} - \Delta \ell_{pc}}{\ell_{pc}} + 2 \frac{A_{pc} E_{pc}}{\ell_{pc}}} \quad (A-6)$$

となる。この時導入軸力が小さく導入軸力用調整寸法が微小な場合

$$\ell_{pc} - \Delta \ell_{pc} = \ell_{pc} \quad (A-7)$$

と見なすことができるので、式(A-6)は

$$P_{pc} = A_{pc} E_{pc} \frac{\Delta \ell_{pc}}{\ell_{pc}} \frac{A_{tube} E_{tube}}{\frac{A_{tube} E_{tube}}{\ell_{tube}} + 2 \frac{A_{pc} E_{pc}}{\ell_{pc}}} \quad (A-8)$$

と表すことができる。

従って式(A-8)より、PC鋼棒部材の伸び剛性($A_{pc} E_{pc} / \ell_{pc}$)に対する鋼管の伸び剛性($A_{tube} E_{tube} / \ell_{tube}$)の割合が小さい場合には、鋼管縮みを考慮せずにPC鋼棒部材の調整用寸法を定めると、鋼管縮みの影響によりPC鋼棒部材に実際に導入される軸力が設定した初期軸力に比べ小さくなるため注意が必要である。

鋼管歪を考慮した場合にPC鋼棒部材に導入される軸力について図A.3に示す。締め付け長さの管理による初期軸力の導入を行う場合には、PC鋼棒部材の伸び剛性に対する鋼管伸び剛性の比が5～6以上必要である。

図A.3 鋼管歪を考慮した場合のPC鋼棒部材への導入軸力

(2005年12月10日原稿受理, 2006年2月1日採用決定)