

標準わく組足場の耐荷性能に及ぼすスパン数の影響

Influence of span's number on strength performance of standard prefabricated scaffolds

高橋 弘樹*, 大嶋 勝利**, 高梨 成次***

Hiroki Takahashi, Katsutoshi Ohdo and Seiji Takanashi

*博士 (工学), (独) 労働安全衛生総合研究所研究員, 建設安全研究グループ(〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6)

**博士 (工学), (独) 労働安全衛生総合研究所上席研究員, 建設安全研究グループ(〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6)

***工修, (独) 労働安全衛生総合研究所主任研究員, 建設安全研究グループ(〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6)

In the stiffening member of the main frame, to guarantee the strength of the scaffolds, the length of the stiffening member have been regulated by the standard. However, in the shear rigidity of the flooring ledger frame, there is no regulation and little research data. When the scaffolds were buckling, it is thought that the shear rigidity of the flooring ledger frame influences the strength of the scaffolds. However, this influence have not been made clear. In this study, the buckling analysis of the standard prefabricated scaffolds was executed as a parameter in the shear rigidity of the main and the flooring ledger frames. Thus, the evaluation method of the strength of the prefabricated scaffolds was examined. Moreover, it is considered that the span's number of the scaffolds is different for the geographic condition in the construction sites etc. Therefore, the influence of span's number on the strength of the scaffolds was examined.

Key Words: Standard prefabricated scaffolds, Strength, Span and Buckling

キーワード: 標準わく組足場, 強度, スパン, 座屈

1. はじめに

建設工事現場等で一般的に使われている足場には、足場そのものの自重や人などによる積載重量によって、鉛直荷重が作用する。特に標準わくを用いたわく組足場においては、足場を型枠支保工として使用するため、足場が座屈する程の過大な荷重が作用することもある。わく組足場について、座屈実験を行うと、図 1 に示すような交差筋違い面方向に建てわくが一層毎にわん曲方向が変わる個材座屈、または、わく面方向に建てわくが全体的に座屈する全体座屈によって座屈強度(耐荷強度)が決まる¹⁾。わく組足場が全体座屈を生ずる場合は、個材座屈を生ずる場合よりも座屈長さが長くなるため、個材座屈よりも小さい荷重で発生する。従って、個材座屈は、全体座屈よりも安全性が保障されることになる。

これら足場に関しては、労働者の安全を確保するため、労働安全衛生法²⁾に関連した法規制がされており、労働安全衛生規則(昭和 47 年 9 月 30 日労働省令第 32 号、以下、安衛則とする。)及び「鋼管足場用の部材及び附属金具の規格」(昭和 56 年 12 月 25 日労働省告示第 103 号、以下、構造規格とする。)には、足場用の部材である建わくや床付き布わく(図 1 中の写真)などの材料、構造、強

度などが規定されている。標準わく組足場については、足場を型枠支保工として使用することもあるため、全体座屈よりも安全が保障されている個材座屈により強度が決まることを前提として、構造規格が規定されている。既存の実験¹⁾により、全体座屈は建わくの補剛材がない場合に多く発生することが知られている。この実験結果

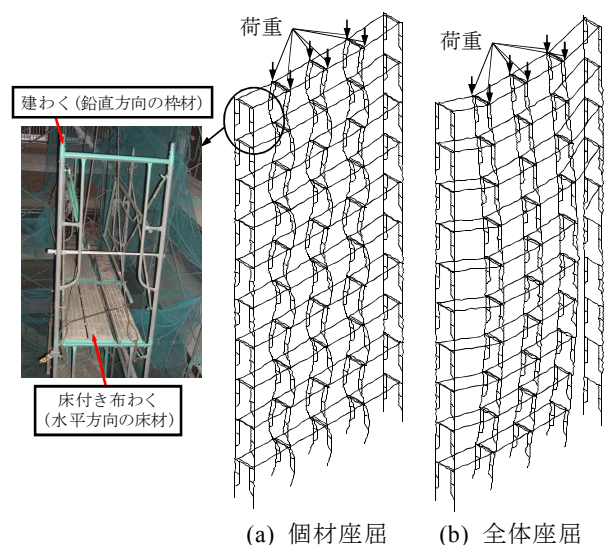


図 1 わく組足場の座屈形状

より、補剛材を短くすることで建わく枠面のせん断剛性が小さくなり、結果として全体座屈が発生すると考えられる。このため構造規格には、建わくの補剛材長さが決められており、補剛材長さを規定値以上にする事で、わく組足場は個材座屈になる。

一方で、建わくと建わくに掛け渡す床付き布わくについては、床付き布わくの積載荷重に対する曲げ耐力が、構造規格に定められている。しかし、床付き布わくが足場の枠面方向に力が作用した場合の床付き布わくのせん断剛性に関する規定はなく、この場合の安全性については、あまり分かっていない。わく組み足場が座屈する場合、建わくのせん断剛性がわく組足場の座屈強度に影響を及ぼすことから、床付き布わくのせん断剛性もわく組足場の座屈強度に影響を及ぼすと考えられる。従って、床付き布わくのせん断剛性を適度な値とすることで、床付き布わくが、建わくの変形を拘束する座屈補剛材になり、建わくの補剛材長さを構造規格の規定値より短くしても、わく組足場の全体座屈を抑えることができると考えられる。また、建わくと床付き布わくのせん断剛性をパラメータとして、わく組足場の耐荷性能の評価を行うことで、建築物の設計などに導入されている性能規定型の評価をすることになり、足場の設計の自由度が広がると考えられる。

筆者らは、わく組足場の耐荷性能に関する研究として、10層4スパンのわく組足場の解析モデルを用いて、座屈解析を行い、床付き布わくのせん断剛性をパラメータとして、わく組足場が全体座屈を生ずる場合と個材座屈を生ずる場合の境界について検討を行った³⁾。しかし、わく組足場の耐荷強度に関する具体的な設計方法については、検討していない。

本研究では、建わくと床付き布わくのせん断剛性をパラメータとして、わく組足場の座屈解析を行い、わく

組足場の耐荷性能の評価方法について具体的に検討を行う。また、建物の形状や工事現場の地理的な条件等で、足場のスパン数が異なることを考慮し、足場のスパン数が、わく組足場の耐荷性能に及ぼす影響について検討する。

2. 解析概要

数値解析は、汎用有限要素解析プログラムの ANSYS を用いて行った。わく組足場の材料が、鋼材であることから、解析モデルの材料は、等方性の弾塑性体とし、降伏条件は、数値解析で一般的に使われている Von Mises の条件に従うものとした。解析に使用した材料物性値を表1に示す。応力-ひずみ関係は、一般的な鋼材の応力-ひずみ関係を簡略化したバイリニア型とした。降伏後はひずみ硬化を考慮し、2次勾配 E_{st} をヤング係数 E の 0.01 倍とした⁴⁾。表中の ν はポアソン比であり、 σ_y は降伏応力である。

3. 建わくのモデル化と強度性能の評価

建わくは、一般的に使われている標準わくを対象とした。建わくの解析モデルを図2に示す。図2に示した補剛材長さは、一般的に使われている建てわくの代表的な長さである。建わくの解析モデルは、鋼管により構成されていることから、有限要素は、2節点のビーム要素を用いた。

この建わくについて、補剛材の取り付け長さ h_s を調整して、建わくのせん断剛性 k_s を調べた。せん断剛性は、図2に示すように、建わくの脚柱の上端にせん断力 Q を作用させ、 $k_s = Q/\Delta$ として求めた。このときの脚柱下端の

表1 解析に用いた材料物性値

部材 (鋼材の材質)	E (N/mm ²)	ν	σ_y (N/mm ²)	E_{st} (N/mm ²)
建わくの脚柱, 横架材 (STK500)	205,000	0.3	355	2,050
建わくの補剛材 (STK400)	205,000	0.3	235	2,050
床付き布わく (SS400)	205,000	0.3	235	2,050

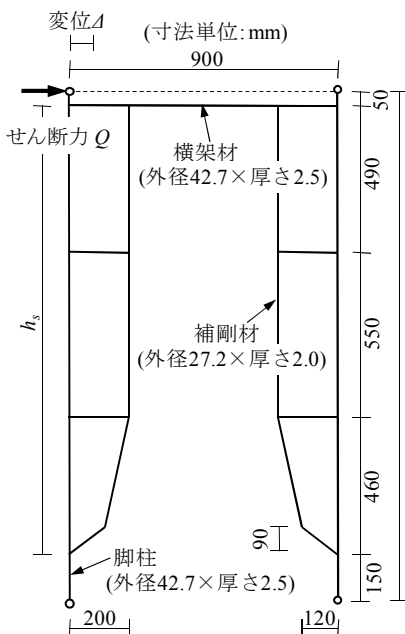


図2 解析に用いた建わく

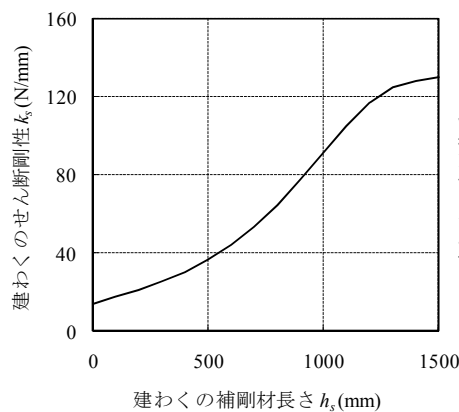


図3 建わくのせん断剛性と補剛材長さの関係

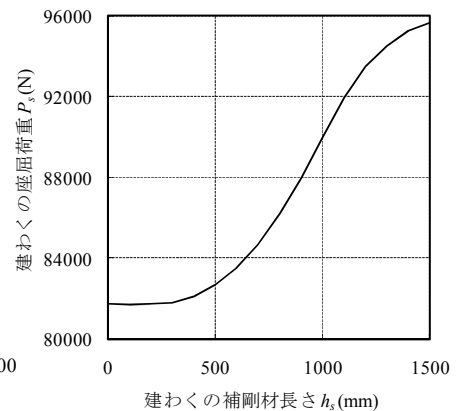


図4 建わくの座屈荷重と補剛材長さの関係

支持条件は、最も危険な条件のピンとした。解析結果を図3に示す。建わくの補剛材がない場合の k_s は、14 N/mm程度であり、 k_s の値は、 h_s が長くなるほど大きくなった。

また、この建わくの脚柱上端から鉛直荷重 N を作用させ、補剛材の取り付け長さ h_s を調整して、建わくの座屈荷重 P_s を調べた。建わくの支持条件は、脚柱の上下端をピンとし、脚柱の横移動を拘束した。この支持条件により計算された建わく1枠の座屈荷重 P_s は、組み上げたわく組足場が個材座屈するときの座屈荷重とほぼ同じになる。解析結果を図4に示す。建わくの補剛材がない場合の P_s は、81,700 N程度であり、 P_s の値は、 h_s が長くなるほど大きくなった。

4. 床付き布わくのモデル化とせん断剛性の評価

床付き布わくは、一般的に使われている床付き布わくを対象とした。実際の床付き布わくは、作業床となる水平板やその撓みを抑える側板などで構成され、やや複雑な形状であることから、解析に用いた床付き布わくは、図5に示すように2節点のビーム要素を用いて簡略してモデル化した。

一般的に使われているわく組足場の建わくと床付き布わくの接合部は、ピン接合であるから、このモデルのつかみ金具の先端をピン接合とし、図5に示すようなせん断力を作用させて、床付き布わくのせん断剛性 k_h を調べた。 k_h の値は、解析モデルの外枠の断面幅 b_h を調整して決定した。解析結果を図6に示す。 k_h の値は、 b_h が長くなるほど、大きくなった。

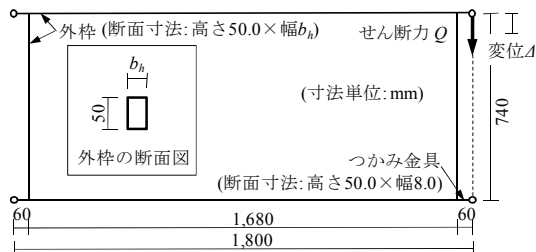


図5 解析に用いた床付き布わく

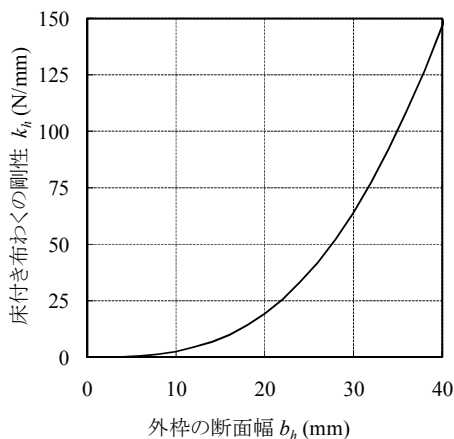


図6 床付き布わくのせん断剛性と外枠の断面幅の関係

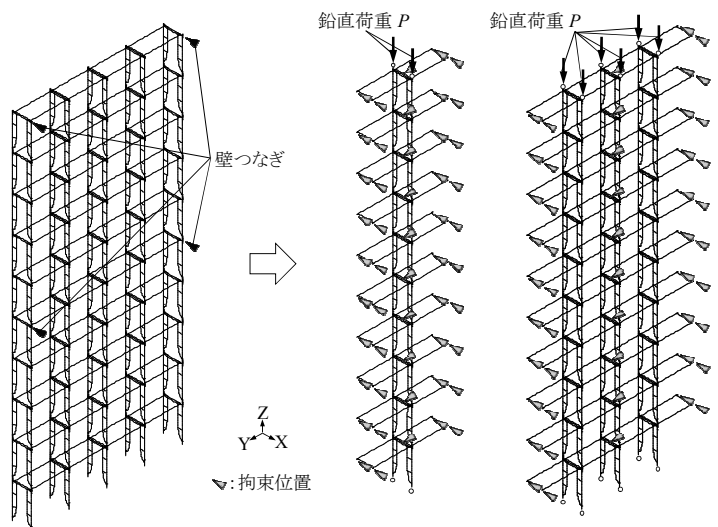
5. わく組足場の座屈解析

5.1 解析モデルと解析方法

足場には、足場の転倒を防止するため、壁つなぎと呼ばれる水平材を取り付ける必要がある²⁾。壁つなぎの間隔は、安衛則において、足場の水平方向8m以下、垂直方向9m以下となっている。本論文で用いたわく組足場は、建わく高さが1,700mmであり、床付き布わくの長さが1,800mmであるので、図7(a)に示すように、少なくとも5層4スパン(垂直方向に対しては、 $5 \times 1,700 = 8,500$ mm、水平方向に対しては、 $4 \times 1,800 = 7,200$ mm)の間隔で壁つなぎを設置する必要がある。壁つなぎを設置した建わくの頂部に、鉛直荷重が作用した場合、壁つなぎが荷重をある程度負担すると考えられる。しかし、今回は、最も危険と考えられる条件を想定して、壁つなぎが設置されていない建わくの頂部に荷重が作用した場合を検討対象とした。解析のスパン数については、壁つなぎ間隔の法定範囲である4スパン以内の2スパンと4スパンについて、検討を行った。標準わくを用いたわく組足場は、10層以下で全体座屈はしないといわれている⁵⁾。このことを確かめるため、解析の足場の層数は10とした。

解析に用いたわく組足場は、壁つなぎが取り付けられている列の建わくは、水平方向に移動しないものと仮定し、図7(a)のように組み上げたわく組足場を簡略化して、図7(b)及び図7(c)に示すようなモデルとした。(b)は、建わく1列とその建わくに掛け渡された床付き布わく2スパンのモデルであり、(c)は建わく3列とその建わくに掛け渡された床付き布わく4スパンのモデルである。座標は、図中に示すように、枠方向をX、交差筋違い方向をY、高さ方向をZとした。(b)及び(c)のモデル共に、床付き布わくの建わくに接合していない方の端部は、床付き布わくが壁つなぎに取り付けられている建わくに掛け渡されていることを想定し、X方向の変位を拘束した。

交差筋違いと床付き布わくは、足場の全スパン、全層



(a) わく組足場 (b) 2スパンモデル (c) 4スパンモデル

図7 解析に用いたわく組足場

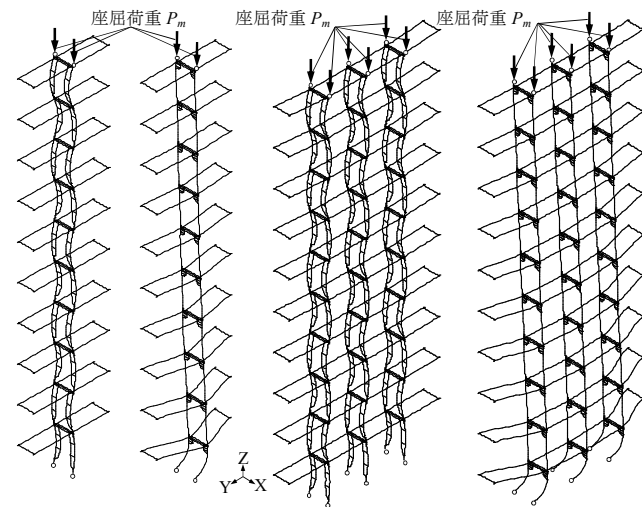
にわたって取り付けるものとする³⁾。最下層の脚柱下端の支持条件は、最も危険であると考えられるピンとした。また、一般的に使われている足場を参考に、建わくと建わくの接合部を剛接合、建わくと床付き布わくの接合部をピン接合とした。荷重は変位制御とし、足場を型枠支保工として使用した場合を想定して、足場最上部の建わくの脚柱上端から鉛直方向に漸増荷重を作用させた。また、荷重の載荷点は、水平方向の移動を抑えるため、X方向の変位を拘束した。

実際の鋼材は通常、製造段階から少し湾曲しており、これを元たわみと呼んでいる。ヨーロッパ鋼構造協会連合では、実部材の計測などから、両端がピン支持された部材の中央の元たわみは、部材長さの 1/1,000 程度であるとしている⁶⁾。本論文で対象としているわく組足場も元たわみを有していると考えられ、この値を参考にして、わく組み足場の解析モデルに元たわみを与えた。全体座屈する方向(X方向)においては、足場の中央のたわみが足場の高さの 1/1,000(17mm) となるように sin 波で与え、個材座屈する方向(Y方向)においては、足場の各層において、建わく中央のたわみが建わく高さの 1/1,000(1.7mm) となるように sin 波で与えた。

これらのモデルに対して、建わくと床付き布わくのせん断剛性を調整して、座屈解析を行った。

5.2 解析後の座屈形状と足場の耐荷性能の評価式

図 8 に解析結果の最大荷重時(座屈荷重) P_m の変形図を示す。(a),(b)は 2 スパンモデルの変形図であり、(c),(d)は 4 スパンモデルの変形図である。また、(a),(c)は $k_s=130\text{N/mm}$ ($h_s=1,500\text{mm}$), $k_h=30\text{N/mm}$ の場合の変形図であり、(b),(d)は $k_s=25\text{N/mm}$ ($h_s=300\text{mm}$), $k_h=1\text{N/mm}$ の場合の変形図である。(a),(c)は個材座屈になった場合の代表例であり、(b),(d)は個材座屈にならなかった場合の



(a)個材座屈 (b)最下層座屈 (c)個材座屈 (d)最下層座屈
2 スパンモデル 4 スパンモデル

図 8 座屈形状

代表例である。個材座屈にならなかった場合は、最下層の建わくが、X方向に変形している。この形状は、全体座屈ではないが、建わくのせん断剛性が不足したことにより発生したと考えられる。このため、個材座屈とは区別した。また、この座屈は、わく組足場の地盤面との境界条件をピンとしたことも影響したために発生したと考える。

この X 方向に変位した最下層の建わくに注目して、最下層の建わくとその建わくに掛け渡された床付き布わくのせん断剛性及び、わく組足場の座屈荷重の関係について考察する。図 9(a)は、最下層の建わくを対象としたモデルであり、図 9(b)は、図 9(a)のモデルを簡略化して、建わくを 1本の棒と仮定したモデルである。図中の k は、建わくの脚柱の上端 O 点を横補剛したばねのばね定数である。建わくに発生する X 方向の水平力はすべてこの k が受け持つものとする。また、床付き布わくを建わくの横補剛材と考えると、図 12 の k には、最下層の建わくに掛け渡された床付き布わくのせん断剛性 k_h も加わる。すなわち、 k は次のように表現できる。

$$k = k_s + k_h \quad (1)$$

図 9(a),(b)に示すように、元たわみ δ_0 をもつ建わくが座屈して横変位 δ が生じると、ばね反力 $Q_k = k(\delta_0 + \delta)$ が生じる。このときの図 9(b)における O 点のモーメントの釣り合いは、次式のようになる。

$$2P(\delta_0 + \delta) = k(\delta_0 + \delta)h_0 = Q_k h_0 \quad (2)$$

ここで、 h_0 : 建わく 1 枠の高さ(mm)

この式を、横補剛材のばね定数 k について解くと、次のようになる。

$$k = \frac{2P}{h_0} \quad (3)$$

これは、座屈荷重 $2P$ がばね定数 k に比例することを表している。仮に、 k が無限大になると、座屈荷重 $2P$ も

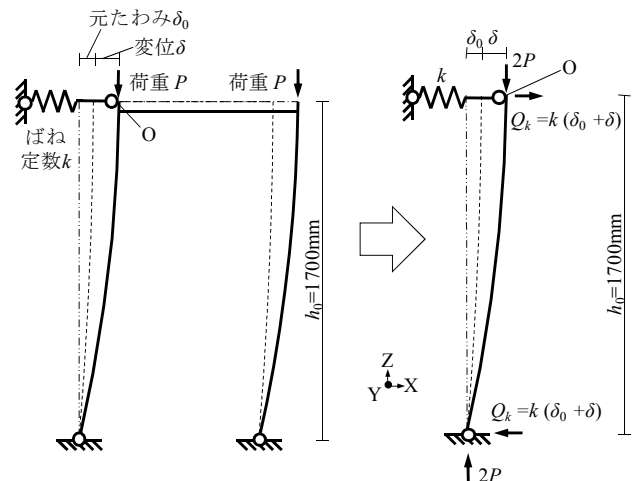


図 9(a) 横補剛された足場最下層の建わく

図 9(b) 横補剛された建わくの簡略モデル

無限大になってしまう。しかし、 $2P$ が図4に示した建わく1枚の座屈荷重 P_s と同じ値になると、わく組足場は個材座屈になる。このとき、O点は移動せず、わく組足場の座屈荷重は、ばね定数に関わらず、常に P_s になる。この P_s を(3)式の $2P$ に代入すると、次式が得られる。

$$k_{cr} = \frac{P_s}{h_0} = \frac{\pi^2 EI_e}{h_0^3} = \frac{2\pi^2 E \left(I_0 + I_s \frac{h_s}{h_0} \right)}{h_0^3} \quad (4)$$

ここで、 I_e : 建わくの補剛材長さを考慮した等価断面2次モーメント¹⁾、 I_0 : 脚柱の断面2次モーメント(mm⁴)、 I_s : 補剛材の断面2次モーメント(mm⁴)、 h_s : 補剛材の脚柱への射影長さ(mm)

この k_{cr} の値は、わく組足場が個材座屈するために必要な建わくの最小のせん断剛性の値を示している。

ここで、 k_{cr} と建わく1枚のせん断剛性 k_s の比較を、図10に示す。図の縦軸は、 k_{cr} と k_s の値を示し、横軸は、建わくの補剛材長さを考慮した等価断面2次モーメント I_e を用いて計算した建わくの細長比 λ を示す。 λ は次式で与えられる。

$$\lambda = h_0 \sqrt{\frac{I_e}{2A_0}} = \frac{h_0}{i_e} \quad (5)$$

ここで、 A_0 : 建わくの脚柱の断面積(mm²)、 i_e : 補剛材長さを考慮した建わくの断面2次半径(mm)

なお、 $h_s=1,500$ mmは $\lambda=110.2$ 程度であり、 $h_s=0$ mmは $\lambda=119.4$ 程度である。

k_{cr} と k_s を比較すると、次式の場合は、 k_h の値に関わらず、わく組足場は個材座屈になる。

$$k_{cr} < k_s \quad (6)$$

また、次式の場合は、 k_s が不足するため、建わくのせん断剛性だけでは、わく組足場は個材座屈にならない。

$$k_{cr} > k_s \quad (7)$$

(7)式の場合は、 k_h の値を次式の値以上にすることで、わく組足場は個材座屈になる。

$$k_{crh} = k_{cr} - k_s \quad (8)$$

ここで、 k_{crh} : $k_{cr} > k_s$ ((7)式)の場合に、わく組足場が個材座屈するために必要な床付き布わくのせん断剛性(N/mm)

図10と(8)式より、わく組足場が個材座屈するためには、 $\lambda=115 \sim 120$ の範囲で、床付き布わくのせん断剛性 k_h を0~36 N/mm程度にしなければならない。2スパンモデルは、図11(a)に示すように、足場の層ごとに、建わく1枚に対して床付き布わくが2枚取り付けられている。このため、床付き布わく1枚に作用するせん断力は、建わく1枚に作用するせん断力の1/2になる。従って、わく組足場が個材座屈するために必要な k_{crh} は、0~18

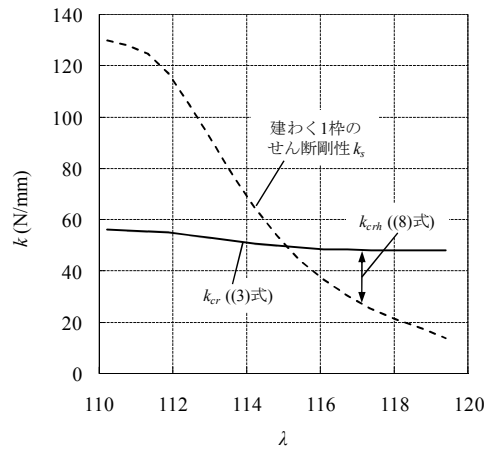


図10 わく組足場が個材座屈するために必要な建わくと床付き布わくのせん断剛性

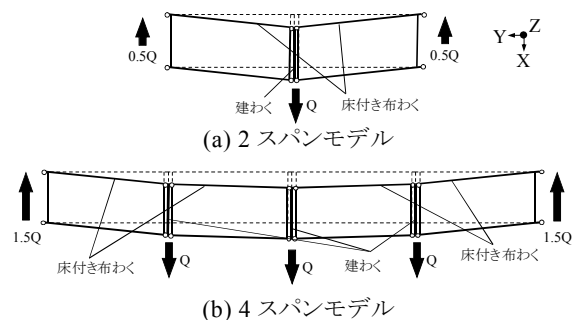


図11 わく組足場の平面図

N/mm程度になる。また、4スパンモデルは、足場がX方向に変形した場合、建わく1列に作用するせん断力を Q とすると、図11(b)に示すように、足場の端部に位置する床付き布わくには、 $1.5Q$ の力が作用する。従って、わく組足場が個材座屈するために必要な k_{crh} の値は、0~54 N/mm程度になる。これらの値を参考にして、わく組足場の k_h の値を決定した。2スパンモデルの場合は、 $k_h=1, 10, 20, 30$ N/mmの4パターンを設定し、4スパンモデルの場合は、 $k_h=1, 20, 40, 60, 80$ N/mmの5パターンを設定した。これらから、わく組足場が座屈する場合、わく組足場のスパン数が増えるほど、足場端部に位置する床付き布わくに作用するせん断力は、大きくなる。従って、 $k_{cr} > k_s$ の場合、わく組足場が個材座屈するためには、スパン数に比例して床付き布わくのせん断剛性を大きくする必要がある。足場が座屈して建わく1列にせん断力 Q が作用するとき、足場端部に位置する床付き布わくに作用するせん断力の値を γQ とする。この γ とわく組足場のスパン数 S の関係は、 $S > 2$ の場合、次式のようになる。

$$\gamma = \frac{S-1}{2} \quad (9)$$

γ は、わく組足場のスパン数 S を考慮した k_{crh} の割増係数を表し、 k_{crh} を計算する場合、次式のように、スパン数に応じて k_{crh} に γ の値を割り増す必要がある。

$$\gamma \cdot k_{crh} = \frac{(S-1)k_{crh}}{2} \quad (10)$$

5.3 解析結果と評価式の比較

座屈解析の結果を図 12(a), (b)に示す。(a)は、2 スパンモデルの結果であり、(b)は、4 スパンモデルの結果である。図の縦軸は、解析結果の座屈荷重 P_m の建わくの降伏軸力 P_y に対する比を示し、横軸は、図 10 のときと同じ方法で計算した建わくの細長比 λ を示す。 P_y は、次式により得られる。

$$P_y = 2A_0\sigma_{ys} \quad (11)$$

ここで、 σ_{ys} ：脚柱の降伏応力(N/mm²)

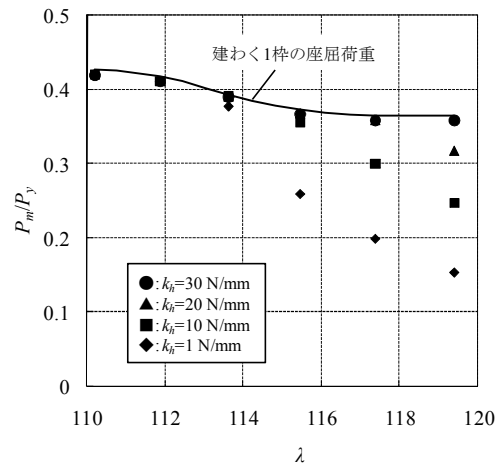
図中の曲線は、建わく 1 枠の座屈荷重 P_s の値であり、黒点は解析結果である。わく組足場が個材座屈する場合は、黒点の P_m/P_y の値が曲線の P_m/P_y の値とほぼ同じになり、個材座屈しない場合は、黒点の P_m/P_y の値が曲線の P_m/P_y の値より小さくなる。なお、 P_m は、今回設定した元たわみの影響で、オイラー荷重の 90%程度 の値となった。また、弾塑性解析を行ったことで、弾性解析では見られなかった座屈後の耐力低下がみられた。

図 10 より、今回の解析モデルは、おおよそ $\lambda < 115$ であれば、床付き布わくのせん断剛性 k_h の値に関わらず、わく組足場は個材座屈になる。図 12(a), (b)を見ると、 $\lambda < 115$ の場合の黒点の P_m/P_y の値は、 k_h の値に関わらず、曲線の P_m/P_y の値とほぼ同じになっており、わく組足場は個材座屈になった。また、 $\lambda > 115$ の場合は、 λ が大きく、 k_h が小さい程、黒点の P_m/P_y の値は曲線の P_m/P_y の値より小さくなった。これは、わく組足場が個材座屈するためには、 λ が大きいほど、 k_h を大きくする必要があることを示している。図 12(a), (b)の結果は、図 10 にほぼ対応しており、(9)式の γ の割増係数の値もほぼ正しい値を示していると考えられる。これらから、(11)式により、わく組足場が個材座屈するために必要な k_s と k_h が計算できることが、裏付けられた。

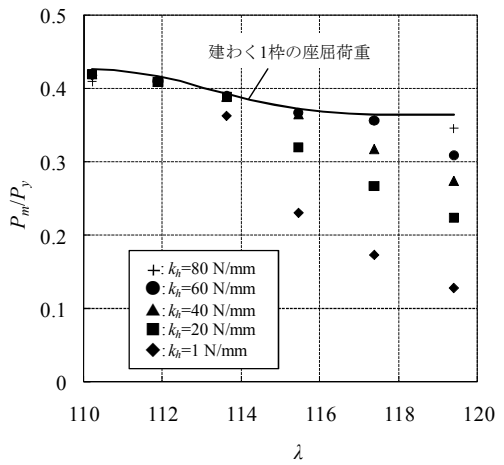
6. まとめ

本論文では、建わくと床付き布わくのせん断剛性をパラメーターとして、わく組足場の座屈解析を行い、わく組足場の耐荷性能の評価方法について検討を行った。また、わく組足場は、2 スパンと 4 スパンについて解析を行い、スパン数がわく組足場の耐荷性能に及ぼす影響について考察した。結果をまとめると、次のようになる。

1. わく組足場と地盤面との接合部がピンであると、わく組み足場の座屈強度(耐荷強度)は、足場最下層の建わくとその建わくに掛け渡された床付き布わくのせん断剛性の関係によって決まる。
2. 建わく 1 枠のせん断剛性 k_s が、(4)式の k_{cr} の値より大きい場合、すなわち、 $k_{cr} < k_s$ のとき、わく組足場は、床付き布わくのせん断剛性 k_h の値に関わらず、個材座屈になる。また、 $k_{cr} > k_s$ の場合、わく組足場が個



(a) 2 スパンモデル



(b) 4 スパンモデル

図 12 わく組足場の降伏軸力比と細長比の関係

材座屈するためには、わく組足場のスパン数 S に比例して k_{crh} の値を大きくする必要がある。 $k_{cr} > k_s$ のときは、(10)式を用いて γk_{crh} の値以上にすることでわく組足場は個材座屈になる。

参考文献

- 1) 森宜制・前郁夫・国森昌之：鋼管製枠組式コンクリート型枠支保工の強度に関する実験報告，労働省産業安全研究所研究所報，No.3, pp.1-8, 1962.
- 2) 労働調査会出版局編：労働法便覧 平成 18 年度版，2006.
- 3) 高橋弘樹・大嶋勝利・高梨成次：仮設足場の新しい安全性評価に関する基礎的研究，2007 年度 (Vol.2) 安全問題研究論文集，pp.149-154, 2007.
- 4) 井上一朗：建築鋼構造の理論と設計，2003.
- 5) 森宜制他：型わく支保工・足場工事計画作成参考者研修テキスト，2000.
- 6) 成岡昌夫・福本秀士・伊藤鉦一：ヨーロッパ鋼構造協会連合・VIII 委員会の鋼柱座屈曲線について，日本鋼構造協会誌，Vol.6, No.55, pp.56-71, 1970.

(2008 年 8 月 22 日受付)