

仮設足場の新しい安全性評価に関する基礎的研究

The fundamental study on a new evaluation method of the safety of temporary 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)

When a new member of the scaffolds is developed, it is necessary to follow the present regulations. For that reason, any product is almost the same, and it is difficult to develop more economical members of the scaffolds that safety was guaranteed. Then, the problem points of the present regulation was pointed out in this study. Moreover, the numerical analysis on a necessary matter to guarantee the safety of the scaffolds was carried out. And a new method to evaluate the performance of the scaffolds was evaluated. About the numerical analysis, the boundary of the two buckling modes, i.e. member buckling and total buckling, was obtained, and the acceptable performance of the scaffolds was confirmed.

Key Words: Scaffolds, Performance, Member buckling and Total buckling

キーワード: 足場, 性能, 個材座屈, 全体座屈

1. はじめに

1.1 社会的な背景

建物の建設工事において、躯体の立ち上がり、外壁の仕上げなど、施工対象物への近接作業が容易に行えるように、足場を設置する必要がある。この足場に関しては、作業を行う労働者の安全を確保するため、労働安全衛生法¹⁾に関連した種々の法規制がされている。労働安全衛生規則(以下、この規則を安衛則とする。)、及び鋼管足場用の部材及び付属金具の規格(以下、この規格を構造規格とする。))には、足場用の部材である建わくや布わくなどの材料、寸法、強度などが規定されており、新しい足場用部材を開発する際は、これらの規格に従わなければならない。しかし、手すり先行工法では、従来とは異なる形状の足場用部材が使用されている。手すり先行工法は、足場からの墜落災害等の防止を目的として開発された足場で、足場の組立・解体時に常に先行して手すりを設置するという工法である。平成15年に、「手すり先行工法に関するガイドライン」¹⁾が策定され、主に土木公共工事に使われている。この手すり先行工法に使われる足場用部材の一部は、構造規格の適用除外として扱われている。しかし、この場合、新しい足場を開発する際の安全性を評価する評価方法が確立されていないため、開発した足場ごとに強度試験や審査を行わなければならない。

多大な労力を要することになる。

建築物の設計においては、平成10年の建築基準法改定において、「性能規定」が導入され、それまでの仕様基準を必ずしも満たす必要がなくなり、設計の自由度が高まった。しかし、構造規格は、昭和56年に告示されてから、約25年間、大きな改正はなく、現在に至っている。新しい足場用部材の開発においては、原則として構造規定に従うか、手すり先行工法のように強度試験または審査を行わなければならないため、開発の自由度が損なわれているのが現状である。

一方で、平成17年の建設業の労働災害による死亡者数は、594人²⁾であるが、この内、墜落・転落による災害は、40.8%²⁾であり、建設業の労働災害の中で、最も件数が多い。更に、この内訳として、足場からの墜落・転落による災害は19.7%²⁾となっている。このため、墜落・転落による災害を防止することが、急務である。

これらのことから、労働者にとって安全な足場を開発するためには、現行の構造規定に定められている材料や構造に捉われない新しい性能評価手法の確立が必要であると考えられる。

1.2 足場の座屈

建設工事現場等で一般的に使われているわく組足場で

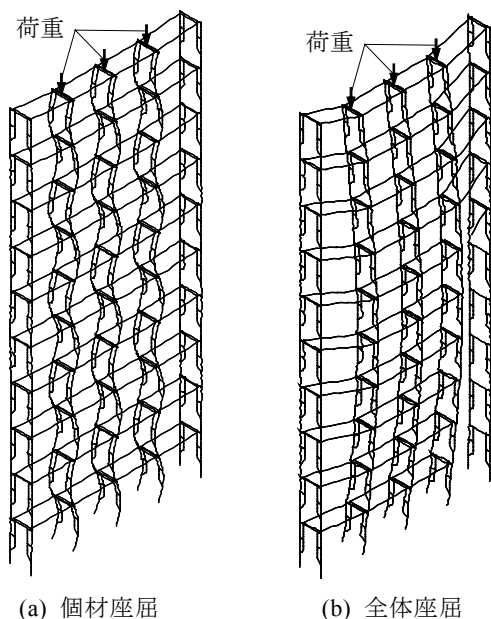


図1 わく組足場の座屈形状

は、足場そのものの自重と人などによる積載重量によって、鉛直方向に力が加わる。この鉛直方向の力によって、わく組足場は座屈と呼ばれる不安定な現象が生ずる。座屈形状としては、足場の各層ごとに変曲するような個材座屈、または、足場の側面が全体的に湾曲するような全体座屈が生ずる(図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、小さい荷重で発生する。また、全体座屈は、建わくの補剛材がない不安定な場合で発生することが多く、補剛材のある建わくを用いたわく組足場においては、10層以下で全体座屈は生じないと言われている³⁾。これらのことから、全体座屈は、建わくのせん断剛性が不足することにより発生すると考えられ、わく組足場の安全性を保証した最低限の性能は、わく組足場が全体座屈をしないことであると考えられる。

1. 3 足場の性能評価に関する筆者らのこれまでの研究

これまで、筆者らが行った足場用部材の性能評価に関する研究として、構造規格において強度に関する基準のない布わくのせん断剛性を確認する実験⁴⁾と低層建築工事をする場合に使われる低層用建わくを用いたわく組足場の座屈形状と性能を確かめる実験⁵⁾を行った。これらにより、建設工事現場等で一般的に使われている布わくのせん断剛性と低層用建わくを用いたわく組足場の性能について基礎的なデータを取得することができた。しかし、布わくのせん断剛性が足場の性能に及ぼす影響は不明であり、わく組足場の性能と建わくや布わくなどの足場用部材の性能との関連性も不明である。そこで、建わくや布わくなどの足場用部材の性能がわく組足場の性能に与える影響を検討した。

1. 4 建わくと布わくのせん断剛性

わく組足場の座屈形状に影響を与える要素は、建わくのせん断剛性以外に、布わくのせん断剛性が考えられる。しかし、布わくのせん断剛性がわく組足場の座屈形状に与える影響は不明である。そこで、建設工事現場で一般的に使われているわく組足場を対象として、建わくと布わくのせん断剛性の関連性が、わく組足場の性能に及ぼす影響を検討した。本論では、これらのことを検討するため、構造に関する研究などに広く使われている有限要素法を用いた数値解析を行った。わく組足場の安全性を保証した最低限の性能は、全体座屈をしないことであると考えられることから、数値解析により、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を探り、足場として最低限必要な性能を検討した。

2. 解析概要

はじめに、足場用部材である建わくと床付き布わくについて、解析モデルのモデル化の検討を行い、それぞれのせん断剛性の評価を行った。そして、これらを踏まえ、わく組足場の座屈解析を行い、建わくと布わくのせん断剛性の関連性がわく組足場の座屈形状に及ぼす影響を検討した。

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。わく組足場の材料は、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、数値解析で一般的に使われている Von Mises の降伏条件に従うものとした。解析に使用した応力-ひずみ関係を図2に、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、降伏後は、ひずみ硬化を考慮した。

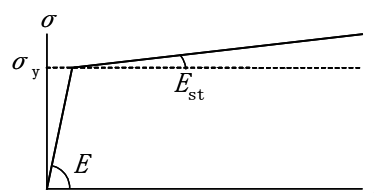


図2 解析に用いた応力-ひずみ関係

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)	205000	0.3	355	2050
建わくの補剛材 (STK400)	205000	0.3	235	2050
布わく (SS400)	205000	0.3	235	2050

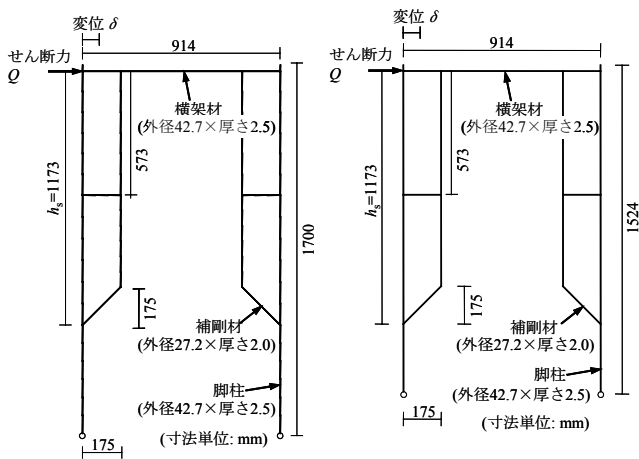
3. 建わくのモデル化とせん断剛性の評価

建わくは、建設工事現場等で一般的に使われている門型補剛材式の建わく(以下、この建わくを標準わくとする。)を対象とした。解析に用いた建わくの外枠寸法は、現在使われているものを参考にして、次の2種類とした。

外枠寸法：幅 914mm×高さ 1700mm

外枠寸法：幅 914mm×高さ 1524mm

これらの建わくについて、補剛材の取り付け長さを調整し、建わくのせん断剛性 k_s を調べた。建わくの解析モデルを図 3 に示す。図の補剛材長さは、建設工事現場で一般的に使われている代表的と考えられる長さを示した。建わくは、鋼管により構成されていることから、有限要素は、2 節点のビーム要素とした。また、現在、安衛則によって行われている建わくの性能を確かめる試験では、脚柱下端をピン支持として試験していることから、脚柱下端の支持条件をピン支持として、建わくのせん断剛性を調べた。解析結果を図 4 に示す。建わくの補剛材がない場合のせん断剛性は、外枠高さ 1700mm の場合が $k_s=0.013$ kN/mm、外枠高さ 1524mm の場合が $k_s=0.018$ kN/mm であった。外枠高さ 1524mm の場合の方が、外枠高さ 1700mm の場合より、総体的に k_s の値が大きく、ど



(a) 外枠高さ 1700mm (b) 外枠高さ 1524mm

図 3 解析に用いた建わく

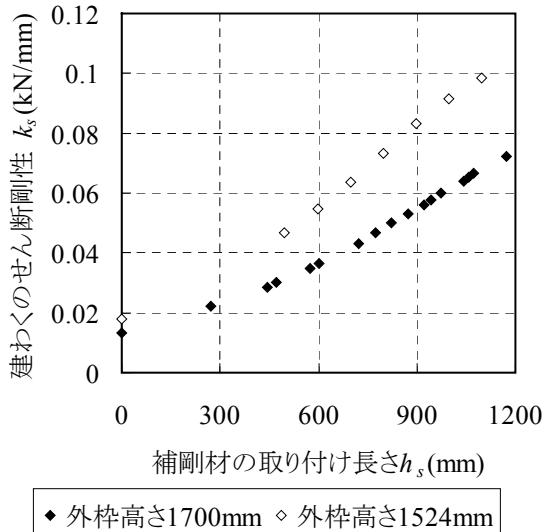


図 4 建わくの初期せん断剛性
— 補剛材の取り付け長さ関係

らの場合も、おおよそ補剛材長さに比例して k_s の値が大きくなった。

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、水平板や側板などで構成され、解析モデルとして、その形状をそのままモデル化するには、やや複雑な形状であることから、解析モデルとしては、2 節点のビーム要素を用いて、簡略化してモデル化した。床付き布わくの解析モデルを図 5 に示す。床付き布わくを建わくに掛け渡す場合、人の墜落防止を考慮して、床付き布わくは、建わくの幅方向のすき間をできるだけ少なくするように掛け渡す。現在、建設工事現場で一般的に使われている床付き布わくには、幅が 240mm と 500mm の 2 種類がある。建わくの幅が 914mm の場合、幅方向のすき間を最も少なくするようにするためには、幅 240mm と幅 500mm の床付き布わくを並列にして掛け渡すことが考えられる。このことから、床付き布わくの解析モデルの幅は、240mm と 500mm を足した 740mm とした。解析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、床付き布わくのせん断剛性 k_h を調べた。この時、床付き布わくの解析モデルのせん断剛性は、実物の床付き布わくのせん断剛性を調べた実験⁴⁾を参考にして、解析モデルの外枠の断面幅を調整して決定した。床付き布わくの解析モデルのせん断剛性と解析モデルの外枠幅の関係、及び参考文献 4 による床付き布わくのせん断剛性の実験値を図 6 に示す。

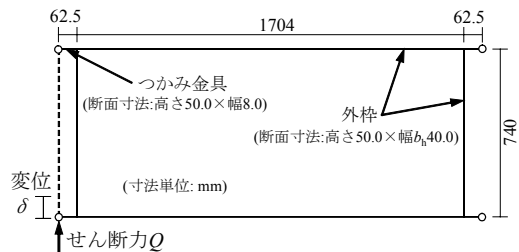


図 5 解析に用いた布わく

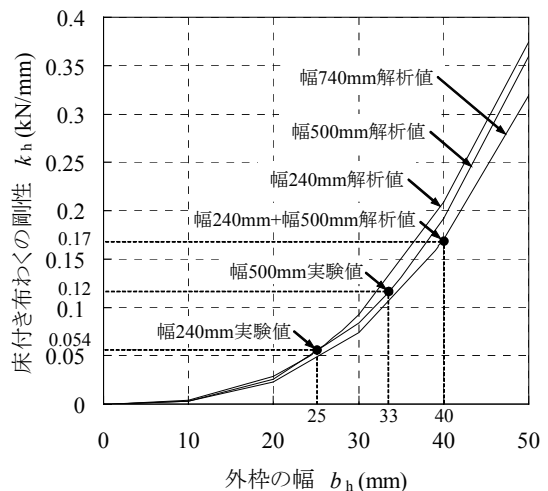


図 6 布わくの初期せん断剛性—外枠の幅の関係

参考文献 4 によると、床付き布わくのせん断剛性の実験値は、幅 240mm が 0.054kN/mm、幅 500mm が 0.12kN/mm であった。そこで、幅 740mm の床付き布わくの解析モデルについては、実験値と同じせん断力を持つ幅 240mm と幅 500mm の床付き布わくの解析モデルを並列に配置してせん断剛性を計算し、この時の値を解析モデルの標準形のせん断剛性の値とした。なお、この時のせん断剛性の値は、0.17kN/mm である。

5. わく組足場の座屈解析

5.1 解析モデルと解析方法

わく組足場は、図 7 のようにモデル化した。建わくのはり間方向を X、けた行方向を Y、高さ方向を Z とした。わく組足場は、10 層以下では全体座屈しないと言われていることから、このことを確かめるため、層数は 10 とした。壁つなぎの間隔は、安衛則により、水平方向 8000mm 以内に取り付けることになっていることから、この最大の値として、スパン数は 4(床付き布わくの水平方向の長さ: 1829mm×4=7316mm) とした。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支持とした。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、足場頂部に、剛体のビーム要素をピン接合で取り付け、剛体の中央部から鉛直方向に漸増荷重を作用させた。また、荷重を作用させた地点は、水平方向の移動を抑えるため、X 方向を拘束した。筋かいは、部材としてのモデル化は行わず、筋かいによる各層の座屈拘束を考慮して、わく組足場の Y 方向の中央に位置する建わくの各層において、横架材中央部の Y 方向を拘束した。壁つなぎに関しては、壁つなぎを模擬した拘束(拘束方向は X 方向のみ)を 4 箇所

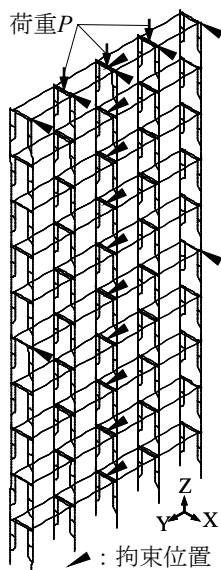


図 7 解析に用いたわく組足場

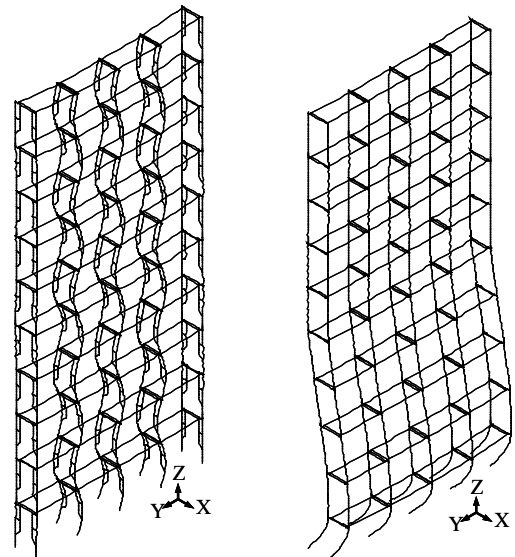
た。

わく組足場の全体座屈する方向(X 方向)と個材座屈する方向(Y 方向)に初期不整を与えた。全体座屈する方向においては、最大たわみが足場の高さの 1/1000(17mm)となるように sin 波で与え、個材座屈する方向においては、足場の各層において、最大たわみが建わく長さの 1/1000(1.7mm)となるように sin 波で与えた。

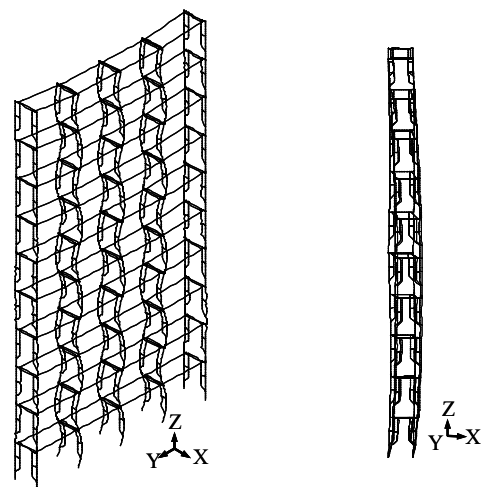
このモデルに対して、建わくの補剛材長さを調整したものと布わくのせん断剛性を調整したものを計算した。

5.2 解析結果と考察

解析後の座屈形状を図 8 に示す。(a), (b)は、建わくの外枠高さ 1700mm の場合で、(c), (d)は、建わくの外枠高さ 1524mm の場合のである。図のキャプションは、補剛材のない建わくの初期せん断剛性を k_{s0} 、標準形の布わく



(a) $k_s/k_{s0}=5.5, k_h/k_{h0}=1.0$ (b) $k_s/k_{s0}=1.0, k_h/k_{h0}=0.1$
(建わくの外枠高さ 1700mm) (建わくの外枠高さ 1700mm)



(c) $k_s/k_{s0}=5.5, k_h/k_{h0}=1.0$ (d) $k_s/k_{s0}=5.3, k_h/k_{h0}=0.1$
(建わくの外枠高さ 1524mm) (建わくの外枠高さ 1524mm)

図 8 座屈形状

のせん断剛性を k_{h0} として示した。(a), (c)は、建わくの補剛材長さを図 3 に示した長さとした場合を示し、(b)は、補剛材のない場合、(d)は、補剛材長さの短い場合を示した。なお、図の変位は、実変位の 10 倍で表示した。

(a), (c)の場合は、個材座屈となった。(d)では、全体座屈となり、(b)では、X 方向に変形が生じ、最下層の建わくが最も大きく変形した。この座屈形状は、全体座屈ではないが、建わくのせん断力不足により発生したと考えられたので、本論では、この場合を全体座屈と仮定した。また、(b)の場合は、足場最下層の脚柱下端をピン支持としたことも、最下層の建わくが、最も大きく変形したことに影響を与えていると考えられる。

座屈解析の結果から、降伏軸力 P_y に対する座屈荷重 P_e の割合と基準化細長比 $\bar{\lambda}$ を計算した。降伏軸力 P_y については、座屈による横たわみが最大となるのは、建わくの脚柱であると考えられることから、建わくの脚柱が降伏するとして計算した。降伏軸力 P_y は、次のようになる。

$$P_y = 2A_0\sigma_y \quad (1)$$

ここで、 A_0 : 脚柱の断面積、 σ_y : 脚柱の降伏応力
この P_y を用いて、座屈荷重 P_e の降伏軸力比は次のように表せる。

$$P_e/P_y \quad (2)$$

基準化細長比 $\bar{\lambda}$ については、補剛材の影響を考慮した等価断面 2 次モーメント I_e ³⁾ を用いて、わく組足場が個材座屈するものと仮定して計算した。補剛材の影響を考慮した等価断面 2 次モーメント I_e は、次式で表される。

$$I_e = 2 \left(I_0 + I_s \frac{h_s}{h_0} \right) \quad (3)$$

ここで、 I_0 : 脚柱の断面 2 次モーメント、 I_s : 補剛材の断面 2 次モーメント、 h_s : 補剛材の脚柱への射影長さ、 h_0 : 建わく 1 層の高さ

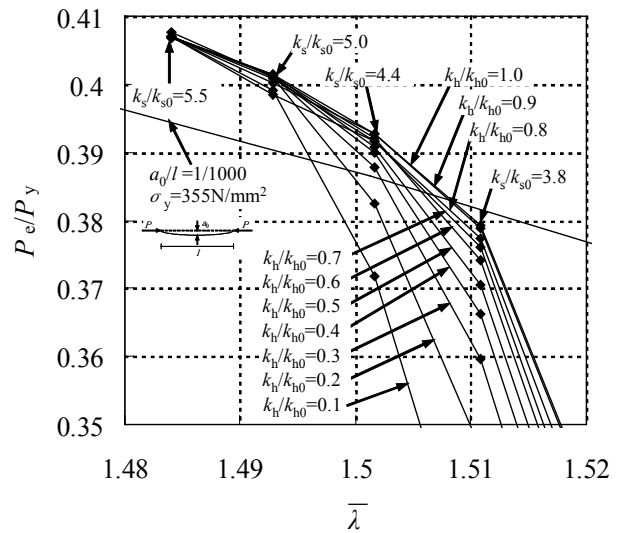
この等価断面 2 次モーメントを用いて細長比 λ は次のように表せる。

$$\lambda = h_s/i = h_s / \sqrt{\frac{I_e}{2A_0}} \quad (4)$$

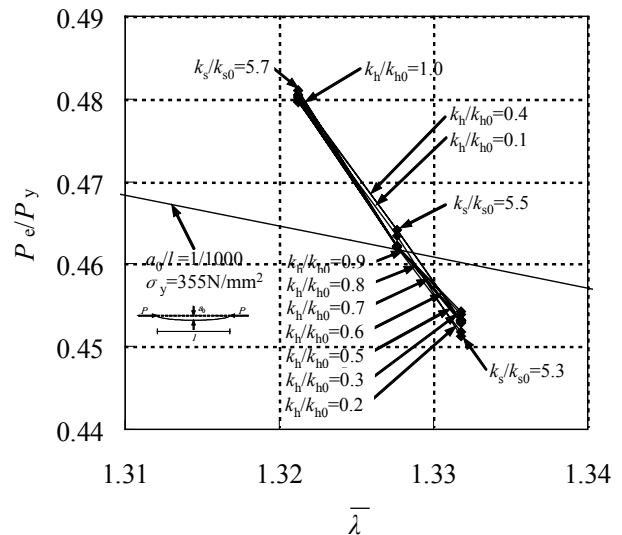
ここで、 i : 断面 2 次半径、 E : ヤング係数
基準化細長比 $\bar{\lambda}$ は次式で与えられる。

$$\bar{\lambda} = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\sigma_y}{E}} \lambda \quad (5)$$

解析結果の $P_e/P_y - \bar{\lambda}$ 関係を図 9 に示す。(a)は、建わく



(a) 建わくの外枠高さ 1700mm



(b) 建わくの外枠高さ 1524mm

図 9 座屈形状

の外枠高さ 1700mm の場合で、(b)は、建わくの外枠高さ 1524mm の場合である。図中の曲線は、 $\sigma_y = 355\text{N/mm}^2$ 、部材の中央点で $a_0/l = 1/1000$ となるように sin 波により初期不整を仮定した場合の $P_e/P_y - \bar{\lambda}$ の関係である(以下、この $P_e/P_y - \bar{\lambda}$ の関係を示した曲線を単に $P_e/P_y - \bar{\lambda}$ 曲線とする。)

全体座屈する場合は、個材座屈する場合よりも座屈長さが長くなるため、個材座屈する場合よりも座屈荷重が小さな値となる。解析結果の $\bar{\lambda}$ の値は、個材座屈すると仮定して計算しているため、全体座屈する場合は、 $P_e/P_y - \bar{\lambda}$ 曲線より P_e/P_y の値が小さくなる。これより、図中の $P_e/P_y - \bar{\lambda}$ 曲線は、わく組足場が個材座屈する場合と全体座屈する場合の境界線となると考えられ、 $P_e/P_y - \bar{\lambda}$ 曲線より P_e/P_y の値が大きい場合は個材座屈となり、小さい場合は全体座屈となる。 $P_e/P_y - \bar{\lambda}$ 曲線と解析結果の各線との交点を、個材座屈と全体座屈の境界を示す点であるとして、この交点より、個材座屈と全体座屈の境界を示す建わく

と布わくのせん断剛性の関係を求めた。個材座屈と全体座屈の境界を示す建わくと布わくのせん断剛性の関係を図 10 に示す。図には、参考のため、図 3 に示す補剛材長さの建わくと標準形の床付き布わくで構成したわく組足場の解析結果の値も示した(図中では、標準モデルと表示した。)

建わくの外枠高さが 1524mm の場合の方が建わくの外枠高さが 1700mm の場合よりも建わくのせん断剛性の値が総体的に高く、標準モデルは、1700mm、1524mm どちらの場合も個材座屈と全体座屈の境界線よりも建わくのせん断剛性の値が高かった。建わくの外枠高さが 1700mm の場合、建わくと布わくせん断剛性は、反比例の関係となり、建わくの外枠高さが 1524mm の場合は、布わくのせん断剛性の値に対して建わくのせん断剛性はほぼ一定の値となった。解析を行った範囲では、建わくのせん断剛性を調整した場合の方が、布わくのせん断剛性を調整した場合よりもわく組足場の座屈形状に及ぼす影響が大きいことが分かった。

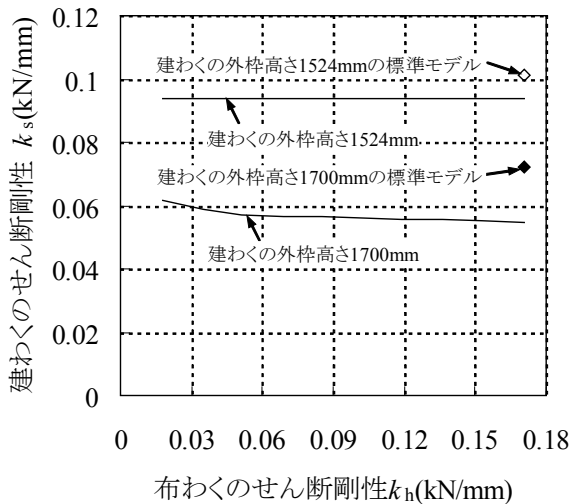


図 10 個材座屈と全体座屈の境界を示す
建わくと布わくのせん断剛性の関係

6. まとめ

本論では、現行の構造規格の問題点について指摘した。更に、わく組足場の座屈解析を行い、建わくと床付き布わくのせん断剛性の関連性がわく組足場の座屈形状に及ぼす影響を数値解析により検討した。結果をまとめると次のように要約される。

1. 標準形の建わくと布わくを使用した場合、わく組足場は、10層以下では、全体座屈しない。
2. わく組足場が、個材座屈する場合と全体座屈する場合の境界は、降伏軸力比-基準化細長比の関係を示す曲線で判断できる。
3. 建わくの外枠高さが短い方が、わく組足場は全体座屈しにくい。
4. 布わくのせん断剛性を調整した場合よりも、建わくのせん断剛性を調整した場合の方が、わく組み足場の座屈形状に及ぼす影響が大きい。
5. 今後の課題として、足場最下層の脚柱下端の境界条件が、わく組足場の座屈形状に影響を与えると考えられることから、これらの影響について調べる必要がある。

参考文献

- 1) 労働調査会出版局編：労働法便覧 平成 18 年度版，2006.
- 2) 建設業労働災害防止協会編：建設業安全衛生年鑑，2006.
- 3) 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.
- 4) 大嶋勝利，高梨成次：足場の性能評価に関する基礎的研究（その 1 布わくと床つき布わくのせん断特性），日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.829-830，2006.
- 5) 高梨成次，大嶋勝利：足場の性能評価に関する基礎的研究（その 2 低層わくの圧縮荷重試験），日本建築学会大会学術講演梗概集，A-1，pp.831-832，2006.

(2007年8月17日受付)