

I-2 剛結と半剛結接合を組み合わせた鋼骨組柱の有効長係数

室蘭工業大学 正員 岸 徳光
 名古屋工業大学 正員 後藤 芳顕
 Purdue Univ. Chen W. F.
 苫小牧高専 正員 小室 雅人

1. はじめに

一般に鋼骨組構造の梁と柱の接合部は、溶接接合や end-plate 接合等の剛結接合とアングル材を用いた接合形式の半剛結接合に分類される。剛結接合は構造全体の剛性確保や柱部の耐力を向上させることができるため高層骨組に用いられている。一方、半剛結接合は耐震上あるいは横移動量が問題とならないような低層多径間骨組に多く用いられているようである。半剛結接合の代表的な接合であるアングル系接合は、溶接作業を必要としないことより、品質管理の問題も少なく、施工性、経済性に優れた接合方法であると考えられる。これより、骨組の横移動量や構造安定性、耐震性が保障されるならば、これらアングル系接合の利用も一層高まるものと考えられる。

著者等はこのような観点より、剛結接合と半剛結接合を組み合わせた場合の高層骨組構造への適用性について、使用限界状態時の横移動量に着目した研究を行ってきた^{1), 2)}。本研究ではそれらの研究成果を踏まえ、高層骨組構造への適用性に関する柱の耐荷力的な検討を行う前段階として、AISC-LRFD の設計基準³⁾の安全照査式に含まれている有効座屈長係数 (K 値) に着目し、数値解析を行った。本論文では、4つの剛結接合と半剛結接合の組み合わせを考え、同設計基準に基づいて係数倍荷重を載荷した場合について数値解析を行った。対象とした骨組は過去の研究に採用した8層4径間骨組とし、半剛結接合部には top- and seat-angle with double web-angle 接合を採用した。数値解析は、top-angle と seat-angle を同一断面形状に固定し、web-angle の板厚と長さを変化させた場合の横移動骨組柱の K 値について行っている。なお、 K 値の算定に関しては、剛結接合構造に広く用いられている alignment chart 法を半剛結接合骨組構造に適用できるよう修正して行っている。

2. 解析手法および有効座屈長係数の算定

半剛結接合柱の K 値算定に関する座屈方程式は、半剛結接合部を接合部接線剛性をバネ定数とする線形バネにモデル化し、alignment chart 過程に基づいて誘導されている。その詳細は文献 4) を参照されたい。またこの場合の K 値は接合部の線形バネを考慮した修正相対剛度係数を用いることにより、alignment chart を用いて算出可能である。なお、線形バネに用いられる接合部接線剛性は微小変形理論に基づく梁-柱の剛性方程式と半剛結接合部の非線形な剛性特性を組み合わせた解析手法により算出するものとする。図-1には本数値解析で対象とする横移動骨組柱に関する alignment chart 過程に基づいた座屈モードを示している。

3. 接合部剛性評価

接合部の非線形な剛性特性の評価に関しては、著者等が提案した三要素パワーモデルを用いることとする。このモデルは、接合部初期剛性 R_{ki} 、限界曲げ耐力 M_u および形状指数 n の3つのパラメータから構成される接合部剛性評価モデルである。無次元化された三要素パワーモデルを次式に示す。

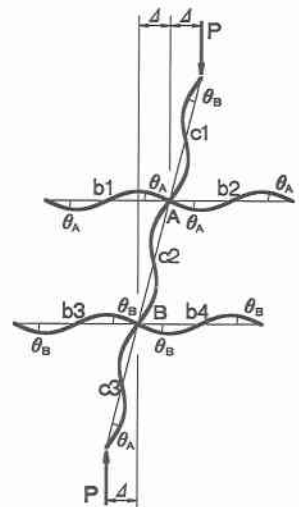


図-1 座屈モード

$$m = \frac{\theta}{(1 + \theta^n)^{1/n}} \quad (1)$$

$m = M/M_u$: 無次元接合部曲げモーメント
 $\theta = \theta_r/\theta_0$: 無次元接合部相対回転角
 $(\theta_0 = M_u/R_{kt} : \text{塑性回転角})$
 n : 形状指数

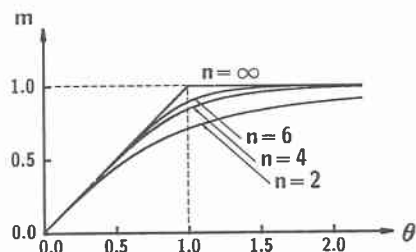


図-2 無次元三要素パワーモデル

ただし、 M : 接合部モーメント、 θ_r : 接合部相対回転角である。図-2に式(1)の概形図を示す。式中の初期剛性 R_{kt} と限界曲げ耐力 M_u はアンゲル材の諸形状寸法に関連づけられたノモグラフを利用

することにより算定できる。また、形状指数 n についても接合部剛性に関する実験結果に基づいて求められた評価式を用いて与えることが可能である。本解析に用いた top- and seat-angle with double web-angle 接合の評価式を次式に示す。

$$\begin{aligned} 1.398 \log_{10} \theta_0 + 4.631 & \dots \log_{10} \theta_0 > -2.721 \\ 0.827 & \leq -2.721 \end{aligned} \quad (2)$$

4. 数値解析

4.1. 骨組、設定荷重および接合部アンゲル材の主形状寸法

本研究では、数値解析のための高層骨組として8層4径間骨組を採用している。図-3に解析に用いた骨組の主寸法および使用形鋼を示している。本研究では AISC-LRFD の設計基準に従うこととしていることより、寸法は米国の慣用単位に、形鋼の呼称は AISC-LRFD の設計基準書に従っている。本骨組の奥行き中心間隔は300 in (7.62 m) とし、各基準荷重強度を表-1のように仮定した。本解析では終局限界状態を仮定していることより、載荷荷重は係数倍荷重とし、各荷重の組み合わせ荷重を1.2 D + 0.5 L とした。骨組に載荷する各荷重は以下になる。

$$\begin{aligned} W_R &= 0.0708 \text{ kip/in} & W_F &= 0.2117 \text{ kip/in} \\ & & (1 \text{ kip/in} &= 178.74 \text{ kgf/cm}) \end{aligned}$$

表-1 各基準荷重強度一覧

	D(psf) (死荷重)	L(psf) (活荷重)
床版部	68	40
屋根部	20	20

$$(1 \text{ psf} = 4.89 \text{ kgf/m}^2)$$

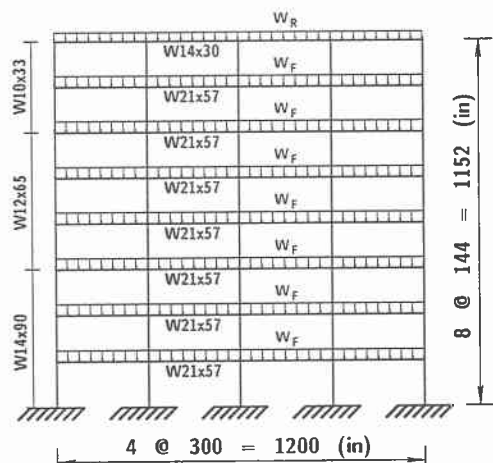


図-3 解析に用いた8層4径間骨組

一方、半剛結接合部に用いられているアンゲル材の主形状寸法において、板厚を t 、アンゲル材の長さを l 、アンゲル材のかかと部から近接する柱側締結孔中心点までの距離を g とする(図-4参照)。本研究では top-angle と seat-angle は同一寸法とする top- and seat-angle with double web-angle 接合を採用することとした。それらと web-angle の変数には添え字として t 、 w を付記して区別することとする。数値解析は top-angle と seat-angle に L4×4×1/2 を用い、 $l_t = 6.0$ in、 $g_t = 2.5$ in と固定している。また、web-angle は L3×3 を用い、 $g_w = 1.75$ in に固定して、 l_w 、 t_w を変化させている。なお、図-5に解析に用いた $M - \theta_r$ 曲線の一例を示す。

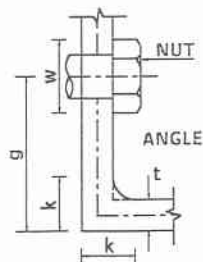


図-4 アンゲル材

4.2. 解析結果および考察

本研究では剛結接合部と半剛結接合部の組み合わせパターンとして図-6に示すような4ケースを設定した。すなわち、両外側の柱と梁材の接合部と第1層目の梁材の接合部をすべて剛結接合としたものを基本構造(ケース1)とし、基本構造に加えて、屋根部の梁材を剛結接合とした場合(ケース2)、径間方向中心点における柱と梁材の接合部をすべて剛結接合とした場合(ケース3)、両外側径間の梁材の接合部を剛結接合とした場合(ケース4)、およびすべてを剛結接合とした場合の5ケースについて検討を行った。なお、構造形式は全て中央部の柱に関して左右対称であることより、K値は骨組の半分について検討している。

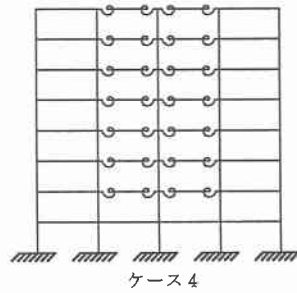
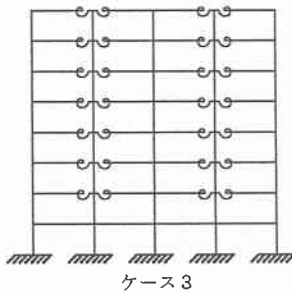
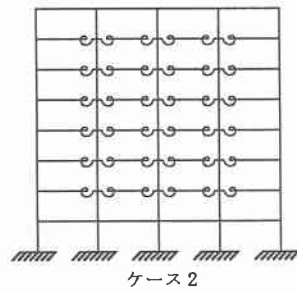
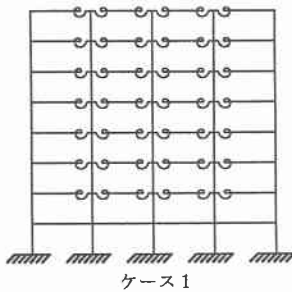


図-6 各解析ケースの一覧

各柱材の位置を明確にするために、図-7に示すように柱番号を左側から1～3、層番号を下から上方に1～8と定義することとした。また図中には比較の基準となる剛結接合骨組の場合のK値を各柱上に示している。

表-2は $t_w = 3/8$ in, $l_w = 7.5$ in とした場合の各ケースに対する第2層目以上の柱材のK値を比較して示している。表より類似のK値を与えるケースの組み合わせのあることがわかる。例えば、column 1に関してはケース1～3が1つのグループとなっている。このような組み合わせを整理すると、下記のように示される。

column 1 : ケース 1, 2, 3 ケース 4
column 2 : ケース 1, 2 ケース 3 ケース 4
column 3 : ケース 1, 2, 4 ケース 3

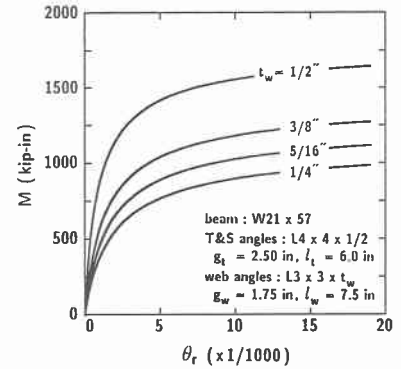


図-5 解析に用いた $M - \theta_r$ 曲線の一例

column:			story:	
1	2	3		
1.287	1.149	1.149		8
1.292	1.152	1.152		7
1.475	1.253	1.253		6
1.564	1.302	1.302		5
1.661	1.361	1.361		4
1.852	1.476	1.476		3
2.200	1.608	1.608		2
1.294	1.200	1.200		1

図-7 剛結接合骨組柱のK値

表-2 $t_w = 3/8$ in, $l_w = 7.5$ in とした場合の各柱の K 値の一覧

story	column 1					column 2					column 3				
	case1	case2	case3	case4	rigid	case1	case2	case3	case4	rigid	case1	case2	case3	case4	rigid
2	2.508	2.507	2.506	2.200	2.200	2.296	2.296	2.150	1.813	1.608	2.500	2.500	1.765	2.503	1.608
3	2.215	2.215	2.214	1.852	1.852	2.731	2.730	2.398	1.781	1.476	3.353	3.354	1.707	3.364	1.476
4	1.956	1.956	1.656	1.661	1.661	2.383	2.382	2.119	1.604	1.361	2.899	2.900	1.547	2.912	1.361
5	1.826	1.825	1.825	1.564	1.564	2.204	2.203	1.975	1.514	1.302	2.681	2.682	1.465	2.695	1.302
6	1.702	1.702	1.702	1.475	1.475	2.037	2.036	1.837	1.433	1.253	2.443	2.444	1.391	2.456	1.253
7	1.449	1.449	1.447	1.292	1.292	1.706	1.706	1.558	1.267	1.152	1.944	1.945	1.239	1.954	1.152
8	1.397	1.348	1.396	1.287	1.287	1.467	1.361	1.384	1.230	1.149	1.579	1.434	1.208	1.584	1.149

これは、部分構造モデルの境界条件が各ケースとも等しくなるためと考えられる。従って、以下では各柱番号に対する部分構造モデルの境界条件が異なるグループごとにケースを分類し考察することとする。

図-8～10 は $t_w = 3/8$ in とした場合の径間方向の柱における各ケースごとの K 値の分布を、 l_w を横軸にとって整理したものである。図-8 は column 1 における結果を示したものである。(a) 図において K 値は l_w に対して線形的な減少傾向にあることがわかる。しかしながら、その勾配は最大で 0.04/3 程度と小さい。これは、接合されている梁の他端半剛結接合の接合部剛性の column 1 の K 値に与える影響が小さいことを意味している。また、story 8 において、ケース 1, 3 はケース 2 より 0.05 程度大きく示されている。これは、ケース 2 の story 8 の梁が剛結接合されていることによる影響であると考えられる。しかしながら、その差は 3～4 % と比較的小さい。(b) 図より、ケース 4 の場合の K 値は各 l_w に対して一定となっていることがわかる。これは部分構造モデルの接合条件がすべて剛結接合となっていることより、 l_w に無関係に図-7 の剛結接合に対する K 値と一致するためと考えられる。(a), (b) 図の各層における K 値を比較すると、ケース 1～3 がケース 4 より最大約 20 % 程度 (story 3)、平均で約 10 % 程度大きくくなっているようである。

図-9 (a)～(c) は column 2 における結果を示したものである。図より、K 値の大小関係はケース 1, 2 > ケース 3 > ケース 4 となっている。部分構造モデルにおける半剛結接合の数は、ケース 1, 2 では 6 コ、ケース 3, 4 ではともに 2 コとなっている。またその位置はケース 3 では柱の両側の接合部に、ケース 4 では片側の梁材の両端となっている。これより、部分構造モデルにおいて、着目している柱に関する梁-柱の接合条件が K 値に大きく影響し、半剛結接合数の多いほど K 値が大きくなることがわかる。また、 l_w に対する K 値の分布性状も、着目している柱に

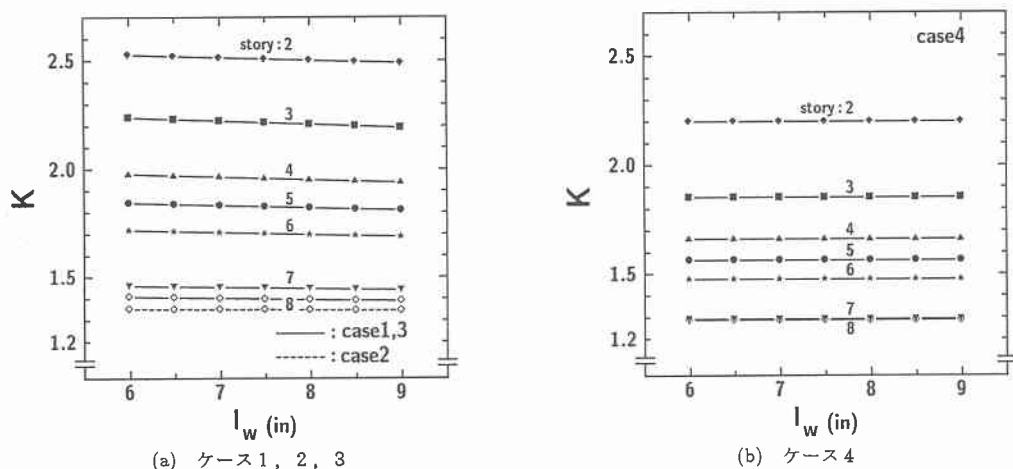
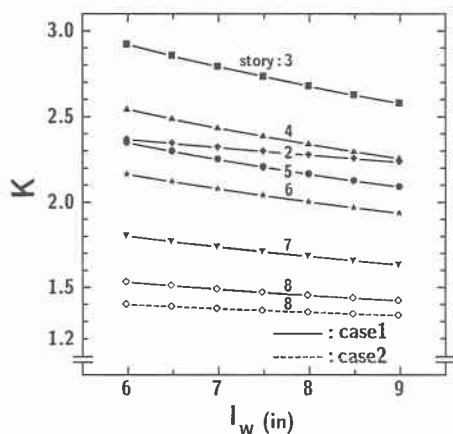
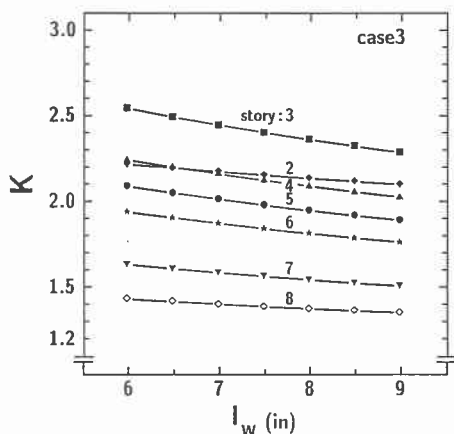


図-8 $t_w = 3/8$ in とし、 l_w を変化させた場合の column 1 の K 値の分布



(a) ケース 1, 2



(b) ケース 3

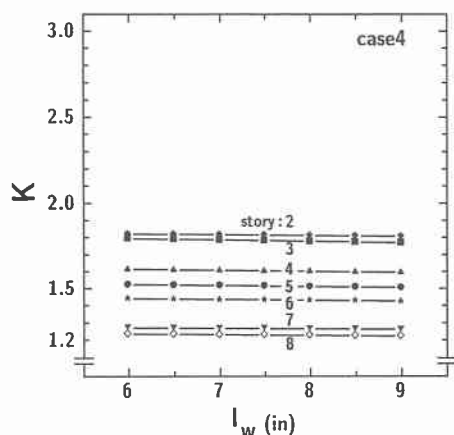
図-9 $t_w = 3/8$ in とし、 l_w を変化させた場合の column 2 の K 値の分布

対する半剛結接合数の多いほどその影響が顕著に示されているようである。また、story 2 の柱の K 値に着目すると、他の柱に比べ l_w による K 値の変化は小さいことがわかる。これは、story 2 柱の上端の梁材との接合部が半剛結接合となっているが、下端の接合部がすべて剛結接合となっていることにより、半剛結接合の影響が小さくなったためと考えられる。ケース 1 とケース 4 の K 値を比較すると、ケース 1 の方がケース 4 より最大 63 % 程度 (story 3) 大きくになっている。

図-10 は column 3 の結果である。図-8~10 の各 column に関する K 値を比較すると、column 3 (図-10) のケース 1, 2, 4 における K 値が、各 story において最も大きな値となっている。また、 l_w の変化に対する K 値の変化の度合いも column 3 のケース 1, 2, 4 が最大となっている。

その差は story 3 で最大 0.557 程度となっている。これは着目している柱における部分構造モデルの境界条件がすべて半剛結接合となっていることより、接線剛性の影響を最も大きく受けるためと考えられる。ケース 3 の場合、柱の両側の接合部が剛結接合となっていることより、K 値はほとんど変化せず、ほぼ一定値となっている。

図-11 は column 3 の story 3 に着目し、 l_w , t_w を変化させた場合の K 値を各ケースごとに比較して示したものである。ケース 1, 2, 4 の結果より、K 値は $t_w = 1/4$ in, $l_w = 6.0$ in で 4.307、 $t_w = 1/2$ in, $l_w = 9.0$ in で 2.378 となり、 t_w , l_w によって K 値は大きく変化することがわかる。ケース 3 の場合、 t_w , l_w の変化の影響はほとんど受けず K 値はほぼ一定となっている。

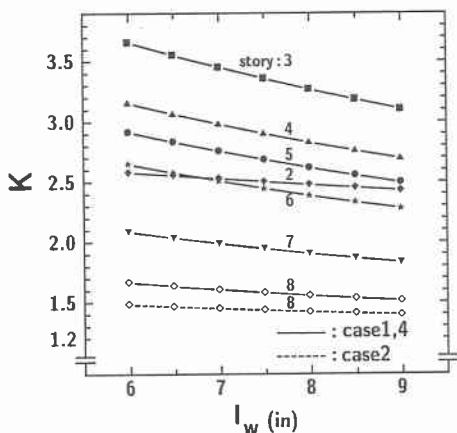


(c) ケース 4

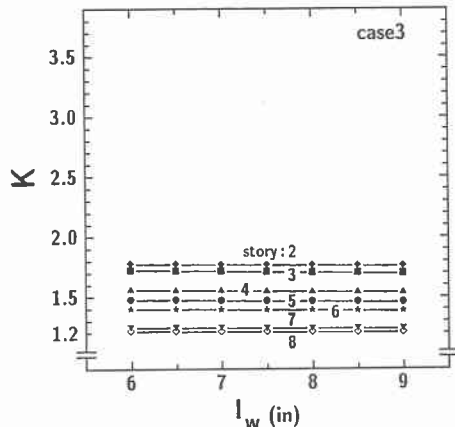
図-9 — 続 き —

5. まとめ

本論文では、剛結接合と半剛結接合を組み合わせた場合の高層骨組構造についての柱の K 値の分布性状について検討することを目的として、AISC-LRFD 設計基準に基づいた数値解析を行った。ここでは、4 つの剛結接合と半剛結接合の組み合わせを考え、特に横移動骨組に限定して検討を行った。対象とした骨組は過去の研究に用いた 8 層 4 径間骨組とし、半剛結接合部には top- and seat-angle with double web-angle 接合を採用した。数値解析は、top-angle



(a) ケース 1, 2, 4



(b) ケース 3

図-10 $t_w = 3/8$ in とし、 l_w を変化させた場合の column 3 の K 値の分布

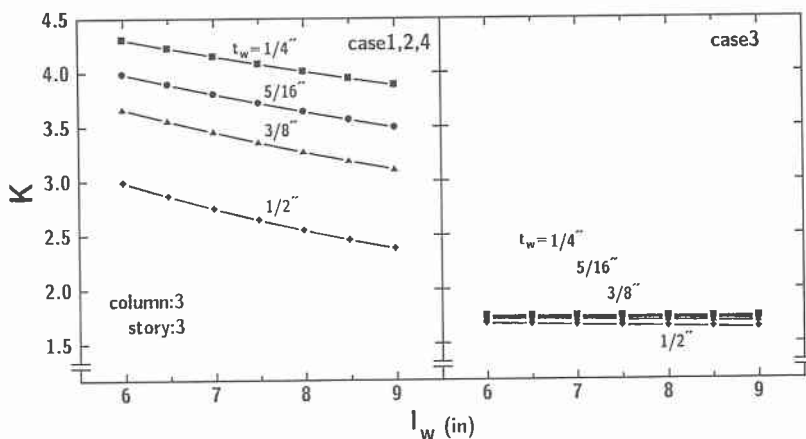


図-11 column 3, story 3 における K 値の分布

と seat-angle を同一断面形状に固定し、web-angle の板厚と長さを変化させた場合の骨組柱の K 値について行った。

本数値解析により高層骨組柱の K 値の分布性状を明らかにすることができた。また、 t_w 、 l_w の変化による K 値の分布に関しては、部分構造モデルの境界条件に大きく左右されることがわかった。柱側の接合部が剛結接合の場合の K 値は、 t_w 、 l_w の変化による影響が小さく、半剛結接合の場合にはこれらの影響を大きく受けることが明らかになった。

参考文献

- 1) 岸 徳光, 後藤芳顕, 松岡健一: 剛結および半剛結接合を組み合わせた鋼骨組の挙動解析, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 49 号, pp.141-144, 平成 5 年 2 月
- 2) 岸 徳光, 後藤芳顕, Chen W.F., 小室雅人: 剛結と半剛結接合を組み合わせた高層鋼骨組の横移動解析, 日本鋼構造協会, 鋼構造年次論文報告集, 第 2 巻, pp.53-60, 平成 6 年 11 月
- 3) American Institute of Steel Construction, Load and Resistance Factor Design Specification for Structural Buildings 2nd Edition, Chicago, IL., 1993.
- 4) 岸 徳光, 後藤芳顕, 松岡健一, 小室雅人: 半剛結横移動骨組柱の有効座屈長の算定, 土木学会北海道支部論文報告集, 第 50 号, pp.42-47, 平成 6 年 2 月