

AFRP シート補強鋼管橋脚模型の耐荷性状に関する静載荷実験

Static loading tests for load carrying capacity and ductility of steel-pipe pier models winding with cross-directional AFRP sheet

室蘭工業大学 正員 小室 雅人 (Masato Komuro)
 室蘭工業大学 フェロー 松岡 健一 (Ken-ichi Matsuoka)
 三井住友建設(株) フェロー 三上 浩 (Hiroshi Mikami)
 室蘭工業大学 ○学生員 保木 和弘 (Kazuhiro Hoki)

1. はじめに

現在、RC 構造物の補修、補強材料に広く利用されている炭素繊維、アラミド繊維等の新素材繊維シートを鋼製橋脚の耐震補強に適用する試みが各研究機関や大学で行われている¹⁾。著者らも、直径10 cm程度の小型円形鋼製橋脚を対象にアラミド繊維シート(以後、単にAFRPシート)を巻き付け補強する工法を提案し、静載荷実験および基部加振実験を行い、2方向シート巻き付けによる耐震性能の向上効果を詳細に検討してきた^{2),3)}。その結果、単位幅当たりのシート補強量を鋼材の一軸降伏耐力の60%程度とすることにより、基部近傍に発生する局部座屈の形状を外側に凸状となる座屈モード(以後、EFB型座屈)から内側に凹状となる座屈モード(以後、DP型座屈)に移行させることができること、耐力の上昇を10%程度に抑えつつ変形性能を飛躍的に向上させることができること、等を明らかにしている。しかしながら、これらの知見は直径が10 cm程度の小型鋼管橋脚模型に対して得られたものであり、本工法を実鋼製橋脚の耐震補強に適用するためには、試験体寸法や載荷履歴などを変化させた種々の条件下で実験を行い、シート巻き付けによる補強効果と耐荷性状の関係について、十分なデータを蓄積する必要があるものと考えられる。

このような観点より、本研究では、AFRPシートによる補強を施した円形鋼製橋脚の耐震性能向上効果を検証することを目的として、直径が26 cm程度の中型鋼管橋脚模型を対象に、2方向AFRPシートを巻き付け接着した(以後、単にシート補強)試験体を製作し、静的単調および漸増繰り返し載荷実験を行った。ここでは、シートの巻き付け高さを一定とし、その剛性(巻き付け層数)を変化させた場合について、シート補強が鋼管橋脚模型の耐震性能に与える影響について検討を行っている。

2. 実験概要

2.1 試験体

図-1および表-1には、試験体の形状寸法および各パラメータを、表-2には、試験体名および実験条件を示している。試験体名は、シート層数および載荷方法が容易に明らかになるように、第1項目はシート層数、第2項目は載荷方法を示している。ここで、-m、-cは、それぞれ静的単調載荷実験、静的漸増繰り返し載荷実験を意味している。なお、AFRPシートの補強割合 ρ は、単位幅当たりの鋼管の一軸降伏耐力に対するシートの引張耐力の比として定義している。

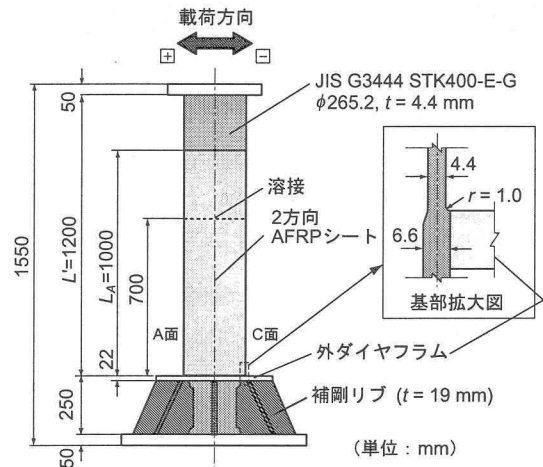


図-1 試験体寸法

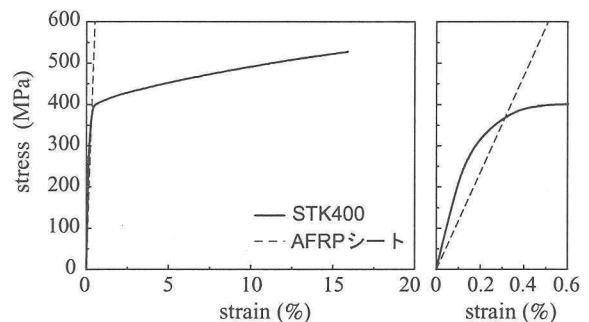


図-2 真応力-真ひずみ関係

試験体の鋼管部は、外径267.4 mm、厚さ6.6 mmの一般構造用炭素鋼鋼管(JIS G3444 STK400-E-G)を所定の長さで切断し、施盤により内外面を約1 mm切削して製作した。なお、製作精度を保つために、試験体は基部より高さ700 mmの位置で2本の鋼管を突合わせ溶接して所定の長さとしている。板厚および径の加工公差は ± 0.1 mmである。試験体の基部は剛体変形を可能な限り抑制するため、図-1に示すように底板上面より高さ約250 mmの位置に外ダイヤフラム(外径500 mm、板厚22 mm)を溶接し、それを補剛リブ(板厚19 mm)8枚を用いて底板と溶接固定している。また、鋼管部は底板より高さ約250 mmまでの区間を素材鋼管のまま使用することとし、試験体基部の剛性を高めている。試験体の上部には鉛直荷重を載荷するために、正方形板を周溶接により取り付けている。

表-3には、本実験で使用した鋼材の力学的特性を示している。鋼材の力学的特性は、試験体からJIS 6号試験片を製作し、引張試験により求めている。また、表-4

表－1 試験体の形状寸法および各パラメーター一覧

荷重点高さ*1 L (mm)	鋼管高さ L' (mm)	板厚中心半径 R (mm)	板厚 t_s (mm)	細長比パラメーター*2 $\bar{\lambda}$	径厚比パラメーター*3 R_t
1,405	1,200	130.4	4.4	0.415	0.090

*1 試験体基部から荷重作用位置までの高さ

*2 $\bar{\lambda} = \frac{2L}{\pi r} \sqrt{\frac{f_y}{E_s}}$, *3 $R_t = \frac{R}{t_s} \frac{f_y}{E_s} \sqrt{3(1-\nu_s^2)}$

表－2 試験体名および実験条件

試験体名	AFRPシート			荷重方法	軸力 P (kN)	軸力比 P/P_y (%)	降伏水平荷重*2 H_y (kN)	降伏水平変位	
	層数 L_n	高さ L_A (mm)	補強割合*1 ρ					実験値*3 δ_{yE} (mm)	解析値*4 δ_y (mm)
L0-m,-c	0	1,000	0.00	m: 単調荷重 c: 繰り返し荷重	124	9.1	56.5	11.4	8.28
L3-m,-c	3		0.72						
L4-m,-c	4		0.96						

*1 $\rho = \frac{f_{ua} t_a L_n}{f_y t_s}$, *2 $H_y = \frac{(f_y - P/A) \cdot I_s}{(R + t_s/2) \cdot L}$, *4 $\delta_y = \frac{H_y L^3}{3EI_s}$

*3 δ_{yE} : L0-m 試験体から得られる水平荷重-変位曲線の H_y に相当する変位

表－3 鋼材の力学的特性 (STK400)

降伏応力 f_y (MPa)	ポアソン ン比 ν_s	弾性係数 E_s (GPa)	引張強度 f_t (MPa)	降伏ひずみ ϵ_y (μ)
378	0.3	212	452	1,783

降伏応力は0.2%耐力から算出

表－4 AFRPシートの1方向の力学的特性 (公称値)

目付量 (g/m^2)	厚さ t_a (mm)	引張強度 f_{ua} (MPa)	弾性係数 E_a (GPa)	ポアソン ン比 ν_a	破断ひずみ ϵ_{ua} (%)
650	0.193	2,060	118	0.4	1.75

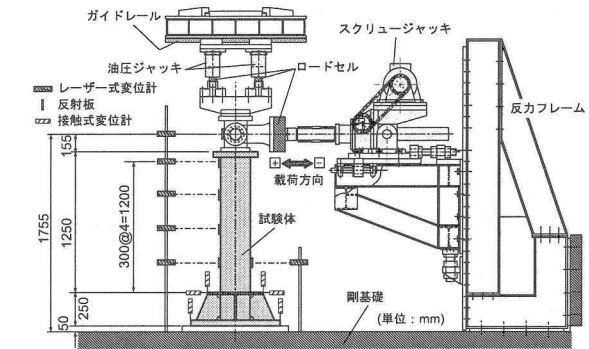
目付量は2方向の場合の値

には、本実験で使用した AFRPシートの1方向の材料特性を示している。AFRPシートは、繊維目付量(単位面積当たりの連続繊維の質量)が650 g/m²、公称保証耐力が392 kN/mの2方向シートである。図-2には、本実験で用いた鋼材および AFRPシートの真応力-真ひずみ関係を示している。図より、鋼材には明確な降伏棚は存在せず、加工硬化を受けていることが分かる。一方、AFRPシートは破断ひずみ($\epsilon_{ua} = 1.75\%$)まで弾性状態が保持されている。なお、AFRPシートの弾性係数 E_a は、鋼材のそれ E_s の約55%である。

AFRPシートの巻き付け方法は、以下の手順に基づいて行った。1) 試験体表面の油分を除去する。2) 含侵・接着用樹脂を塗布し、その上にシートを接着させ気泡を抜きながら連続的に所定の層数を巻き付ける。3) シート接着後、室温を20度前後に保ち気中養生をさせ、触感により粘着感がないことを確認する、である。なお、シート巻き付け開始位置は、荷重方向中立軸付近とし、ラップ長を約10 cmとしている。

2.2 実験装置および実験方法

図-3には、本実験で用いた静的荷重実験装置を示している。鉛直荷重は2本の油圧ジャッキを用い、合計124 kNの軸力を荷重している。この軸力は降伏軸力に対して9%程度である。実験は、ストローク500 mmの電動スクリージャッキを用いて、外ダイヤフラム上面から1,405 mmの高さの位置に水平荷重を与えることにより行っている。水平荷重荷重点部にはスィベルを設置し、試験体上端部に生じる回転を拘束しないようにしている。また、荷重方向と直角方向への変位は、ガイドレールを用いることにより拘束することとした。



図－3 実験装置の概要

ルを用いることにより拘束することとした。

実験の測定項目は、1) 荷重作用点における水平変位と水平荷重、2) 試験体の高さ方向各点における水平変位、3) 試験体の滑動および浮き上がり量、および4) 試験体の荷重方向において局部座屈が発生すると予想される位置を中心とする各点の軸方向および周方向ひずみである。また、3台のデジタルビデオカメラを基部近傍に設置して局部座屈の進行状況を撮影している。各変位は図-3に示すように2種類の変位計を使用して測定した。すなわち、荷重作用点および試験体の高さ方向各点の変位の測定にはレーザー式変位計を、試験体の滑動および浮き上がりの測定には接触式変位計を使用した。なお、水平変位 δ は、水平荷重荷重点位置と試験体基部の外ダイヤフラムとの相対変位を用いて評価することとした。また、水平荷重 H の測定には容量300 kNのロードセルを使用した。計測はサンプリング周波数を10 Hzとし、アンプ内蔵のデジタルメモリーレコーダにて一括収録している。

実験は水平変位制御方式により、2種類の荷重方法で行った。すなわち、1) 一方向に変位を単調増加させる(以後、単調荷重)実験および2) 1サイクルごとの漸増変動変位による繰り返し荷重(以後、繰り返し荷重)実験である。繰り返し荷重方法は、無補強試験体(L0-m試験体)における単調荷重実験結果から得られた降伏水平変位 δ_{yE} (以後、単に実験降伏水平変位)を基準にして、各サイクルで水平変位 δ をその整数倍に漸増させながら正負方向に繰り返し与える方法である。なお、実験は変位振幅時の荷重が降伏荷重を下回るまで行った。

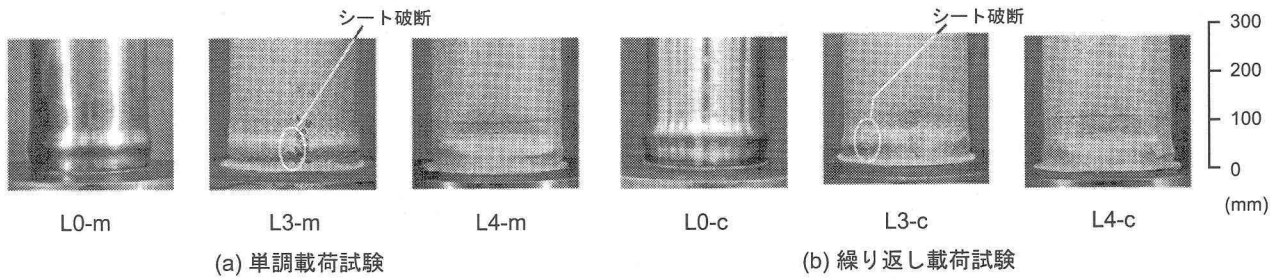


図-4 局部座屈発生状況 (A 面)

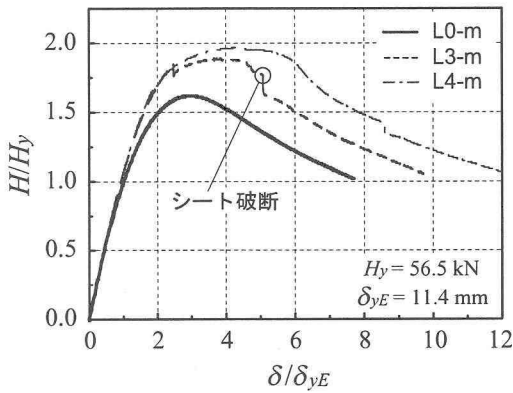


図-5 水平荷重-水平変位関係 (単調載荷実験)

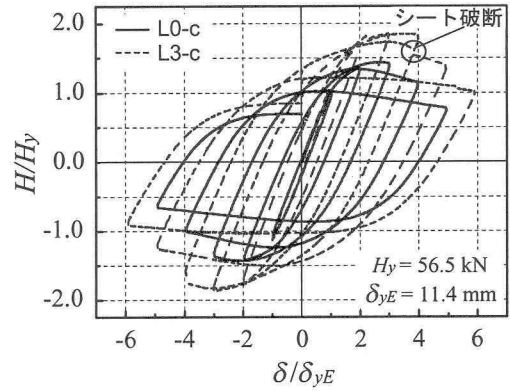


図-6 水平荷重-水平変位関係 (繰り返し載荷実験)

3. 実験結果および考察

3.1 局部座屈発生状況

図-4には、各試験体における実験終了後の基部近傍の局部座屈発生状況を比較して示している。なお、図は全て処女載荷時に曲げ圧縮を受けるA面の結果である(図-1参照)。(a)図より、単調載荷実験におけるL0-m試験体は基部から高さ52mm程度の位置で、EFB型の局部座屈が発生していることが分かる。また、L3-m試験体に関してもシートの破断が生じ、最終的にはL0-m試験体と同様に基部から高さ45mm付近にEFB型の局部座屈が発生している。一方、L4-m試験体に関しては、シートの拘束効果によって外側に凸状となるEFB型の局部座屈は発生せず、基部より高さ70mm付近において、内側に凹状となるDP型の局部座屈が発生していることが分かる。

一方、(b)図に示す繰り返し載荷実験における座屈状況に着目すると、L0-c試験体は、基部から63mm程度の位置でEFB型の局部座屈が発生しているのに対し、シート補強した試験体はいずれも内側に凹状となるDP型の局部座屈が発生し終局に至っていることが分かる。

以上より、本実験の範囲内では、載荷方法にかかわらずシート層数を4層(シート補強割合 $\rho=0.96$)とすることで、基部近傍に発生する局部座屈モードをEFB型からDP型に移行することが可能であることが明らかになった。

3.2 単調載荷実験

図-5には、単調載荷実験における水平荷重-水平変位曲線を試験体毎に比較して示している。縦軸、横軸は、それぞれ降伏水平荷重 H_y および実験降伏水平変位 δ_{yE} を用いて無次元化している。

図-5より、 $H/H_y \leq 1.0$ では、いずれの試験体もほぼ同一な挙動を示していることが分かる。これより、AFRP

シートの巻き付け効果が初期剛性に与える影響は小さいことが分かる。また、 $H/H_y > 1.0$ において、無補強のL0-m試験体の場合には、その剛性勾配が徐々に低減しながら、 $\delta/\delta_{yE} \approx 3$ で最大荷重値 $H_m/H_y = 1.62$ に到達し、その後基部近傍に発生したEFB型座屈の成長によって荷重が徐々に低下している。一方、シート補強したL3/L4-m試験体の場合には、 $H/H_y > 1.0$ においてもほぼ線形的に荷重が増大し、無補強のL0-m試験体の最大荷重値($H_m/H_y \approx 1.6$)付近から緩やかに剛性が低減しながら、最大荷重値に到達している。また、最大荷重値到達後の挙動に着目すると、L3-m試験体では $\delta/\delta_{yE} \approx 5$ において、曲げ圧縮を受ける側面(A面)の基部近傍のシートが破断し(図-4(a)参照)、荷重がL0-m試験体の最大荷重値レベルまで急激に低下していることが分かる。一方、L4-m試験体の場合には、 $\delta/\delta_{yE} \approx 6$ において、鋼管が内側に入るような凹状の局部座屈が発生し荷重が低下している。

以上のことから、試験体にAFRPシートを巻き付け接着することにより、シートの拘束効果によってL0-m試験体に見られるようなEFB型座屈の発生を遅延または抑制できるため、耐荷力および変形性能は向上することが明らかになった。

3.3 繰り返し載荷実験

図-6には、繰り返し載荷実験におけるL0/L3試験体の無次元水平荷重-無次元水平変位曲線を示している。

図より、無補強試験体(L0-c)に着目すると、3サイクル目で最大荷重値 $H_m/H_y \approx 1.45$ を示し、その後荷重が低下している。一方、シート補強したL3-c試験体の場合には、3サイクル目でほぼ最大値 $H_m/H_y \approx 1.9$ を示し、その後4サイクル目まで荷重の低下が見られずほぼ一定値を示している。その後、+5サイクル目の $\delta/\delta_{yE} \approx 4$ (図中○印)において、基部近傍のシート破断によって耐

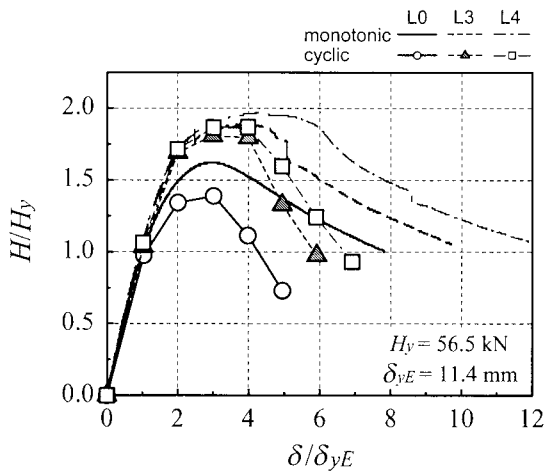


図-7 包絡線の比較

力が低下し、最終的には6サイクル目で終局に至っている。なお、L4-c試験体の場合には、4サイクル目まではL3-c試験体とほぼ同様な耐荷性状を示しており、その後L3-c試験体で見られたシート破断は発生せず、7サイクル目で終局に至っている。

図-7には、各試験体における無次元水平荷重-無次元水平変位曲線の包絡線を示している。なお、図には単調載荷実験結果も併せて示している。

図より、単調載荷と繰り返し載荷を比較すると、いずれの場合も後者の方が小さな変位振幅で終局に至っていることが分かる。また、シート補強した2試験体の包絡線を比較すると、L4-c試験体の最大荷重値が若干大きく、かつ最大荷重到達後の軟化勾配も若干小さく示されている。これは、図-4(b)に示したように、L3-c試験体では5サイクル目にシートが破断し、耐力が低下したことに起因している。

3.4 最大荷重および塑性率の比較

表-5には、各試験体の最大荷重値 H_m 、塑性率 μ_{95} 、座屈形態およびその発生位置を一覧にして示している。なお、塑性率 μ_{95} は、水平荷重が最大荷重値 H_m に到達後、その95%まで低下した時点での変位 δ_{95} と実験降伏水平変位 δ_{yE} との比をとり、 $\mu_{95} = \delta_{95}/\delta_{yE}$ として評価している。

表-5(a)より、単調載荷実験結果に着目すると、各試験体における無次元最大荷重値 H_m/H_y は、L0-m試験体で $H_m/H_y = 1.62$ であるのに対し、シート補強したL3およびL4-m試験体ではそれぞれ1.89、1.97となっており、その増加率は16~21%程度である。一方、塑性率 μ_{95} はシート層数の増大とともに増加し、L4-m試験体の場合にはL0-m試験体と比較して、1.5倍程度向上していることが分かる。

また、表-5(b)より、繰り返し載荷実験結果の最大荷重値に着目すると、L0-c試験体の場合には $H_m/H_y = 1.44$ と単調載荷時よりも小さく示されている。一方、シート補強試験体の場合には、いずれも $H_m/H_y = 1.9$ 程度を示しており、単調載荷時の場合と概ね一致した値となっている。また、L0-c試験体に対する耐力の増加率は30%程度である。次に、塑性率 μ_{95} について見ると、シート

表-5 最大荷重と塑性率一覧

試験体名	H_m (kN)	H_m/H_y^{*5}	δ_{95}^{*1} (mm)	μ_{95}^{*5}	座屈 ^{*2} 形式	座屈発生 ^{*3} 位置(mm)	
						A面 ^{*4}	C面 ^{*4}
(a) 単調載荷実験							
L0-m	91.8	1.62(1.00)	43.8	3.86(1.00)	EFB	52	-
L3-m	106.7	1.89(1.16)	54.4	4.79(1.24)	EFB	45	-
L4-m	111.5	1.97(1.21)	67.3	5.93(1.54)	DP	67	-
(b) 繰り返し載荷実験							
L0-c	81.3	1.44(1.00)	35.2	3.10(1.00)	EFB	63	57
L3-c	105.0	1.86(1.29)	46.2	4.06(1.31)	DP	65	70
L4-c	108.8	1.92(1.34)	46.9	4.12(1.33)	DP	62	65

*1 最大耐力から0.95 H_m まで低下した時点の変位

*2 EFB: 外側に凸状となる局部座屈(象の脚型座屈)

DP: 内側に凹状となる局部座屈(ダイヤモンド型座屈)

*3 外ダイヤフラム上面からの高さ

*4 A面およびC面はそれぞれ処女載荷時に

曲げ圧縮および引張側となる側面

*5 ()内の値は無補強試験体(L0-m/L0-c)に対する割合

補強試験体では単調載荷実験の場合とは異なり、シート層数にかかわらず $\mu_{95} \approx 4$ を示している。これは前述のように繰り返し載荷の場合、シート補強試験体はいずれも同一サイクル時においてDP型の局部座屈が発生したことに起因している。なお、シート補強した試験体の塑性率 μ_{95} は、L0-c試験体の約1.3倍を示しており、シートを巻き付け接着することにより変形性能が向上していることが分かる。

以上より、シートを適切に巻き付け補強することにより、無補強試験体と比較して、耐力の上昇を1.2~1.3倍程度に抑え、変形性能を単調載荷状態で1.5倍、繰り返し載荷状態で1.3倍程度向上させることができることが明らかになった。

4. まとめ

本実験で得られた結果を整理すると、以下のようになる。

- 1) AFRPシートを鋼管橋脚模型に巻き付け接着することにより、シートの拘束効果によって、基部近傍に発生するEFB型の局部座屈を抑制あるいは遅延させることができる。
- 2) 本実験範囲内では、シート層数を4層(シート補強割合 $\rho = 0.96$)とすることにより、載荷方法にかかわらず基部近傍に発生する局部座屈の形状をEFB型からDP型に移行することができる。
- 3) AFRPシートを巻き付けて補強した試験体は、無補強試験体と比較して最大耐力の上昇を1.2~1.3倍程度に抑え、変形性能を単調載荷状態で1.5倍、繰り返し載荷状態で1.3倍程度向上させることができる。

参考文献

- 1) T. Kitada, M. Matsumura, and M. Tokubayashi: Seismic retrofitting method for circular steel column members by CFRP. Proceedings of the Conference on Behaviour of Steel Structures in Seismic Areas, pp.703-709, 2003.6
- 2) 池田憲二, 岸 徳光, 小室雅人, 三上 浩: 基部加振を受けるAFRPシート補強鋼管橋脚模型の弾塑性応答性状, 構造工学論文集, Vol.48A, pp. 67-76, 2002.3
- 3) 池田憲二, 岸 徳光, 小室雅人, 三上 浩: AFRPシート補強鋼管橋脚模型の静的載荷実験, 日本鋼構造協会, 鋼構造年次論文報告集, Vol. 9, pp. 513-520, 2001.11