

論文 鋼管とプレストレスで高横拘束した RC 柱の耐震性能に関する 実験的研究

山川哲雄^{*1}・村中圭介^{*2}・倉重正義^{*3}

要旨: 鋼管とプレストレスで高横拘束した RC 柱の耐震性能を検討するために、せん断スパン比が 1.5 で断面と高さが 250 × 250 × 750mm の柱試験体を用いて、一定軸圧縮応力下（軸応力度 $f_c/3$ ）の正負繰り返し水平加力実験を行った。その結果、高強度の太径鉄筋で主筋量が多く、せん断スパン比が付着割裂しやすい 1.5 という厳しい状態にあっても、プレストレスの導入により耐震性能が大きく改善されることがわかった。

キーワード: 合成柱, 正方形鋼管, 耐震性能, 付着すべり, プレストレス, PC 鋼棒

1. 序

正方形鋼管を横拘束材としてその機能を十分発揮させるためには、板の面外たわみなどを押さえるなどなんらかの工夫が必要であると思われる。本報告では帯筋無しで、高強度（SD490相当）の多量な太径（12-D19）の主筋（ $p_g=5.51\%$ ）を配筋した RC 柱を正方形鋼管（板厚 = 6mm で柱の両材端では 10mm 程度のあきを設ける）で横補強した上で、応力が厳しい柱頭、柱脚のみを主筋と直交した方向にフランジとウェブの両面から PC 鋼棒でプレストレスを与える。この結果、正方形鋼管の面外たわみが押さえられるとともに、コアコンクリートに対して鋼管による受動的な横拘束のほかに、プレストレスによる能動的な横拘束が加わることになる。また、フランジ面からウェブ面に平行に串刺しされた PC 鋼棒はせん断補強筋の役割も担うと同時に、PC 鋼棒で上下端部を強く横拘束された鋼管はコンクリート表面とのズレが止められたことになるので鋼管自身がかなりのせん断力を負担し、曲げ強度に比較してせん断強度が大幅に増大するものと推定される。

以上のことから、きわめて強度とじん性に富んだ、いわゆるコンファインドコンクリートが得られ、大きな軸力を受けても大きな水平耐力とじん性に富んだ鉄筋コンクリート柱の設計が可能となる。しかも従来せん断破壊を防止できなかったせん断スパン比の小さい RC 柱も、曲げ破壊先行のねばりのある短柱として、積極的に利用できる可能性を秘めている。また、この基本的考えは鋼板を溶接し、閉鎖形に加工し、既存のコンクリート表面との隙間をグラウトし、PC 鋼棒を柱頭や柱脚に利用した既存 RC 造建物における柱の耐震補強にも利用可能である。このように耐震補強した柱部分を支点に鋼製ブレースを新設することにより、既存鉄筋コンクリート骨組構造の耐震補強にもそのまま利用することも考えられる。さらには土木構造物の鉄筋コンクリート造橋脚などにも応用できるなど、耐震設計や耐震補強上多様な利用と発展が期待できる。

本論の目的は正方形鋼管とプレストレスを併用して高横拘束した合成 RC 柱の弾塑性挙動と耐震性能を、まずは一定軸圧縮力下の正負繰り返し水平加力実験で検証することにある。

2. 柱試験体

試験体の形状、寸法及び配筋図を図-1 に示す。試験体の寸法は 250 × 250 × 750mm である（図

*1 琉球大学教授 工学部環境建設工学科, 工博（正会員）

*2 琉球大学大学院 工学研究科建設工学専攻（正会員）

*3 ネットレン(株)製品事業部開発営業課 課長

表-1 試験体一覧表

試験体名	CC96H-RS	CC96H-S2	CP96H-S2	CC96H-SS	CP96H-SS
試験体					
断面図	柱頭・柱脚部				
	中央部				
配筋	鋼管：t=6mm 主筋：12-D19, $p_g=5.51\%$		帯筋：D6@40, $p_w=1.28\%$		

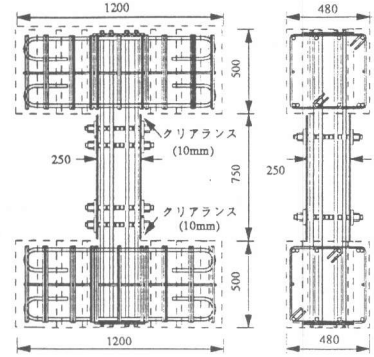


図-1 試験体の配筋図

表-2 コンクリートの力学的性質とスランプ

試験体名	f'_c (MPa)	ϵ_{co} (%)	E_c (GPa)	スランプ (cm)
CC96H-RS	46.0	0.18	35.0	11
CC96H-S2	44.7	0.20	32.3	10
CP96H-S2	45.2	0.23	32.0	10
CC96H-SS	45.3	0.23	30.6	14
CP96H-SS	49.1	0.21	33.1	12

注) f'_c : シリンダー強度 ϵ_{co} : シリンダー強度時のひずみ
 E_c : ヤング係数

表-3 鋼管及び鉄筋の力学的性質

種類	B/t	f_y (MPa)	ϵ_y (%)	E_s (GPa)	
鋼管(250×250×6)	42	320	0.17	197.5	
主筋	D19	2.87*	490	0.26	193.5
帯筋	D6	0.32*	388	0.22	184.1

注) B: 鋼管の幅 t: 鋼管の厚さ f_y : 降伏点応力
 ϵ_y : 降伏点ひずみ E_s : ヤング係数
 * は断面積を示す。

参照)。試験体のせん断スパン比 (M/VD) は 1.5 であり、かつ RC 柱としては一種のせん断破壊である付着割裂破壊先行の試験体である。試験体は在来の RC 柱 1 体、柱の柱頭、柱脚を鋼管で柱せい分 (250mm) だけ局部的に横補強した RC 柱 1 体、鋼管のみで横補強した RC 柱 1 体、これらの試験体 2 体の柱頭、柱脚にプレストレスを導入した RC 柱 2 体の合計 5 体である (表-1 参照)。PC 鋼棒は外径 23mm、内径 15.8mm、肉厚 3.6mm、断面積 219.4mm² の中空鋼棒であり、降伏点強度は 932MPa で、そのときの降伏ひずみは 0.475% である。ヤング係数は 196.1GPa である。コンクリート打設前にプレテンション (プレストレス 1 本当たり 147.1kN) の PC 鋼棒として埋設したが、加力実験直前にリラクゼーションによるプレストレスの減少を補うために、ジャッキにより再緊張し、所定の 147.1kN を確保した。その時点で PC 鋼棒とコンクリートの付着は切れたことを確認している。なお、プレストレス 147.1kN は PC 鋼棒の降伏点強度レベルの約 72% に相当する。プレストレスングの方法に関しては、そのほかに中実な PC 鋼棒、ポストテンション方式やトルクレンチを用いる方法など多種多様な方法が考えられるが、正方形鋼管で横補強した合成 RC 柱の柱頭、柱脚を何らかの方法で締め付けることが肝要であると思われる。

鋼管の板厚は 6mm で鋼管には直接軸圧縮力が伝達しないように柱頭、柱脚部に 10mm 程度のクリアランスを設けている。主筋は太径の高強度鉄筋 (SD490 相当品) 12-D19 を配筋し、その主筋比 (主筋全断面積の柱全断面積に対する比) は $p_g=5.51\%$ である。コンクリート、鋼管及び鉄筋の力学的性質を表-2、3 にそれぞれ示す。

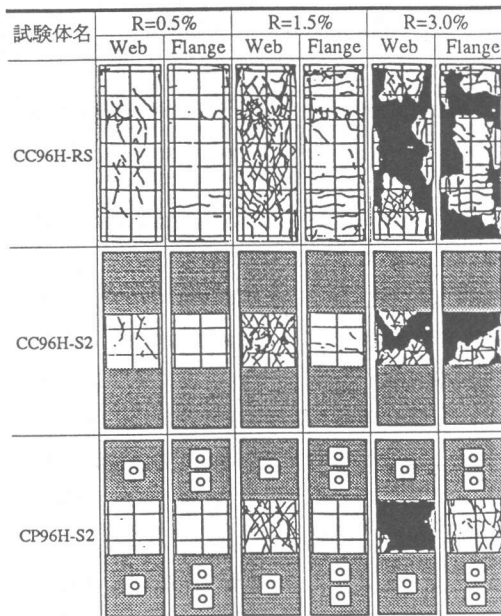
3. 測定及び載荷方法

主筋、帯筋及び鋼管などにはひずみゲージを貼付し、試験体の水平 (曲げせん断変形) と鉛直 (伸縮変形) 変位には変位計を用いてそれぞれ測定した。載荷は建研式水平加力装置を用い、一定

軸圧縮応力 ($f_c/3$) のもとで正負繰り返し水平力を与えた。加力の制御は、初期剛性を得るために最初は荷重制御により行い、それ以降は柱の部材角を0.5%づつ同一振幅で3サイクルづつの変形制御で3%まで行った。

4. 実験結果の検討

鋼管でRC柱の柱頭、柱脚を柱せい分だけ局部補強した試験体 CC96H-S2 と、その上にさらにPC鋼棒で締め付けた試験体 CP96H-S2 の間には、図-2 に示すようにひび割れ発生上の大きな差異は認められない。しかし、図-3 に示すように履歴曲線にはプレストレスの導入により、かなり大きな改善が見られる。このことは図-4、5 からも理解できる。しかし、主筋の径がD19 と大きい上に、その主筋比が断面に対して5.51% とかなり多いので、鋼管で包みこまれていないRC柱中央部分（反曲点位置近傍）では柱全体の水平変形が大きくなると、かぶりコンクリートが剥離し、耐力やエネルギー吸収能力などの耐震性能が若干低下している。



注) Web: 水平加力方向 Flange: 水平加力と直交方向
図-2 各部材角終了時のひび割れ状況

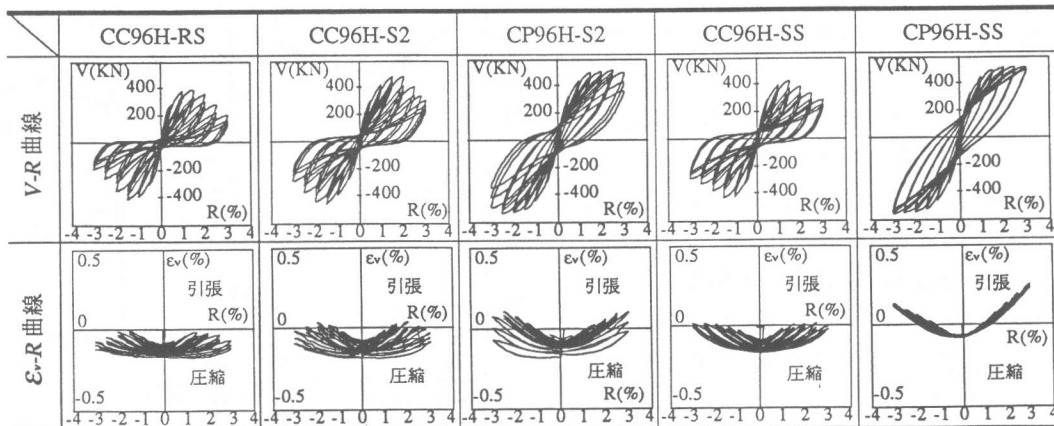


図-3 各試験体の V-R と ϵ -R 曲線

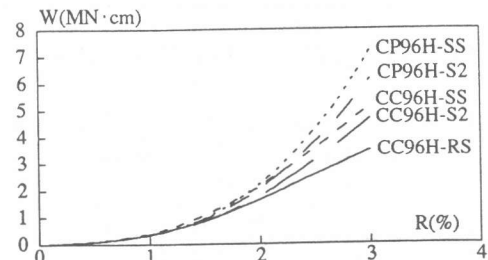


図-4 各試験体のエネルギー吸収量 (実験結果)

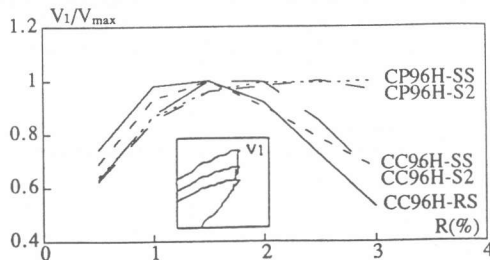


図-5 各試験体の耐力低下率 (実験結果)

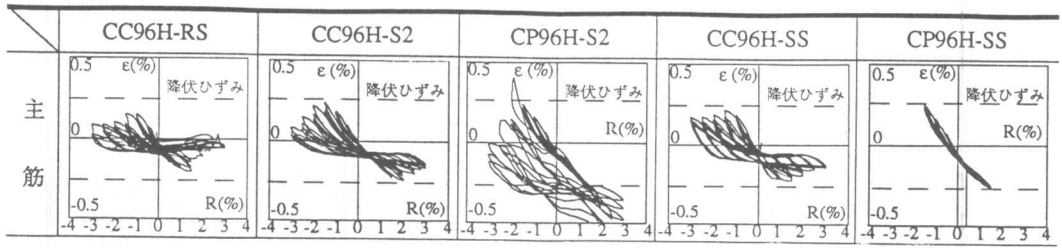


図-6 柱頭隅角部の主筋のひずみと部材角の関係

それに対して、帯筋は一切配筋されていないが鋼管で全面的に横補強され、かつPC鋼棒で柱頭、柱脚のみ締め付けた試験体CP96H-SSは、きわめて耐震性能に富んだ履歴曲線V-Rと、材軸上の平均鉛直伸縮ひずみ ϵ_v と部材角Rの関係を示している(図-3参照)。この耐震性能がいかに優れているかは、鋼管のみで全面的に横補強した試験体CC96H-SSと比較すれば明白である。このことは、図-6に示した柱頭隅角部における主筋のひずみ結果からも明らかである。プレストレスを導入した試験体の主筋のひずみは降伏レベルに達し、かつ試験体CP96H-SSは塑性流れを起こしているが、それ以外の試験体は部材角が3%に達しても、まだ降伏していない。さらに、これらの現象は図-7に示した柱頭部中央の鋼管のフープテンションひずみにも反映されている。すなわち、プレストレスを導入すると、コアコンクリートの膨張による鋼管の面外方向のふくらみが抑制されていることがわかる。このことは、太径の多量な主筋の付着すべりを防止していることを意味し、その結果が実験結果として図-3-6に表現されているこ

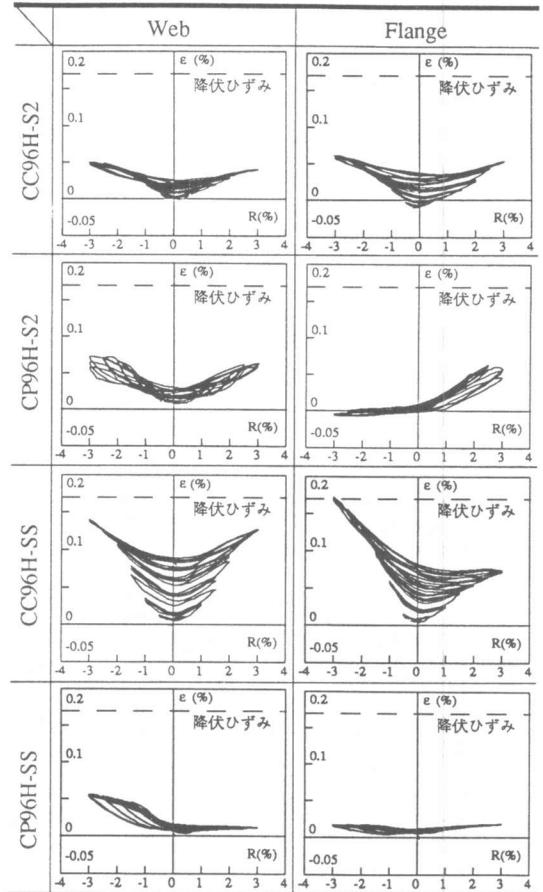


図-7 柱頭部の鋼管のフープテンションのひずみと部材角の関係

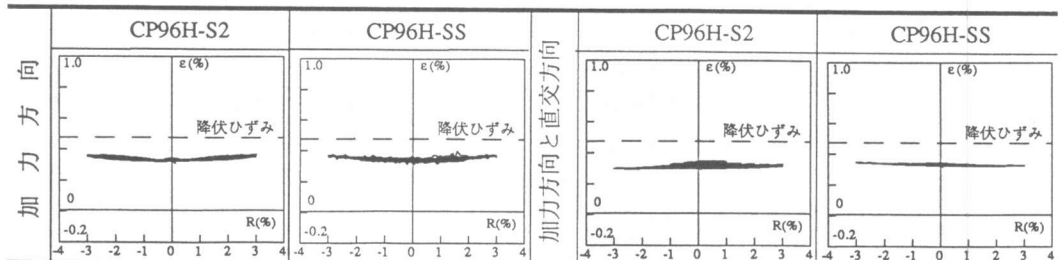


図-8 PC鋼棒のひずみと部材角の関係

とになる。

図-8に正方形鋼管のウェブ，フランジ方向にそれぞれ平行に導入されたPC鋼棒のひずみを示す。初期導入ひずみが降伏ひずみ0.475%の約72%に相当する0.342%である。部材角が増加してもPC鋼棒のひずみはそれほど増加せず，降伏点ひずみ以下に十分とどまっている。

5. 理論的検討

鋼管による横補強に加えて，プレストレスを導入することは鋼管の受動的横拘束効果をさらに高め，しかもプレストレス力による能動的横拘束効果もある程度期待できるのではないかと考えられる。その上，軸圧縮応力度が $f_c/3$ 常時作用した上での正負繰返し水平加力実験であることを考慮すると，3軸圧縮状態下のRC柱の耐震性能確認実験といっても過言ではないように思われる。しかも，プレストレスを導入するために

利用したウェブ面に平行なPC鋼棒がせん断補強筋の役割を演じるとともに，柱の表面と鋼管の間に通常であれば生じるであろう付着ずれもPC鋼棒の締め付けのため防止され，鋼管もそれ相当のせん断力を負担し，柱のせん断強度が飛躍的に増大することが考えられる。

以上のことより，Manderらの構成則 [1] に松村らの鋼管に関する横拘束効果 [2]，Richartらの静水圧によるコンクリート強度の増大効果 [3]などを適用して，プレストレスを導入したコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線を図-9に示す。コンファインドコンクリートの圧縮強度は，単純累加に従って(1)式のように定義する。

$$\frac{f_{cc}'}{f_c'} = 1 + \frac{48.8n^2\sigma_y \left(\frac{t}{B}\right)^2}{f_c'} + 4.1\sigma_r \quad (1)$$

ここに

f_{cc}' : コンファインドコンクリートの圧縮強度

f_c' : コンクリートのシリンダー強度

n : PC鋼棒数+1 (鋼管による横拘束効果)

σ_y : 鋼管の板材としての降伏点強度

t : 鋼管の板厚

B : 正方形鋼管の幅またはせい

σ_r : プレストレス力による平均的な側圧

図-9より，横拘束効果が增大するにつれてコンファインドコンクリートの応力-ひずみ曲線が改善されていることが計算上わかる。図-9より， N - M 相関曲線を図-10に示すような付着応力-付着ひずみ関係を用いて付着すべり

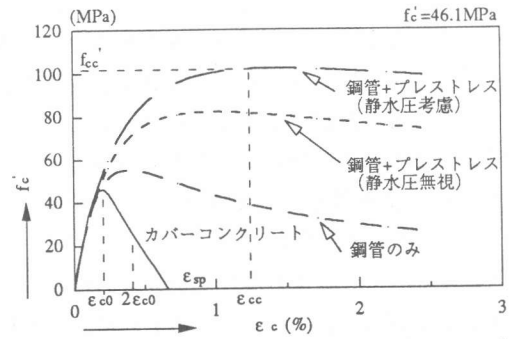


図-9 コンクリートの構成則 (計算結果)

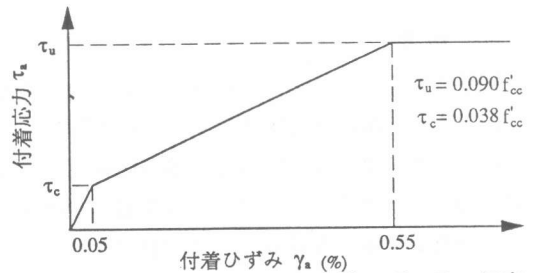


図-10 付着応力 τ_a と付着ひずみ γ_a の仮定

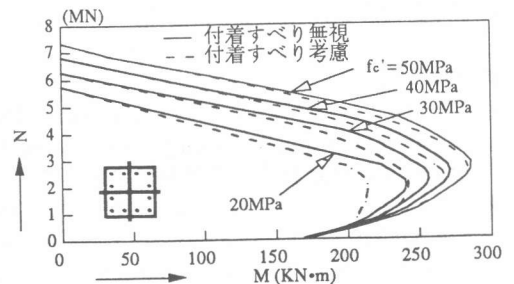


図-11 プレストレスと鋼管で横拘束したRC柱の N - M 相関曲線 (計算結果)

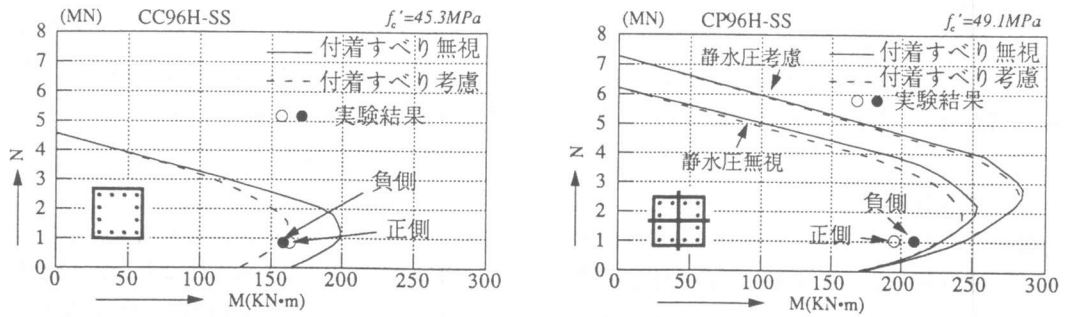


図-12 N-M相関曲線に関する計算結果と実験値の比較

を考慮した場合と無視した場合を、プレストレスを導入した試験体CP96H-SSについてファイバーモデルを用いて曲げ強度の計算を行った。なお、付着すべりは曲げモーメントの勾配によるせん断力にしたがって、図-10の関係を適用し、主筋の応力を緩和することによって簡便的に考慮した[4]。図-11よりプレストレスを導入すると、コンクリート強度の上昇にしたがって、付着すべりの影響が無視できるほど小さくなる。この該当するN-M相関曲線に実験値をプロットしたのが図-12である。特にプレストレスを導入した試験体CP96H-SSに関しては、プレストレスによる静水圧項を無視した場合も含めて図示した。図-12より鋼管のみで単純横補強した試験体CC96H-SSには、付着すべりが生じていることが推定される。その一方、プレストレスを導入した試験体CP96H-SSは耐震性能が飛躍的に増大したが、計算によって示された曲げ強度まで実験値が至っていない。しかし、その実験値も正方形鋼管のみで横補強し、付着すべりが生じていない曲げ強度の計算値には到達している。実験値と計算値の曲げ強度の差異に関しては、せん断強度とともに今後さらに検討する必要がある。

6. 結論

鋼管にプレストレスを併用することによって耐震性能を飛躍的に向上させる帯筋なしのRC柱を提案した。本研究は合成構造としてのRC柱のみならず、耐震補強にも応用できる可能性を秘めている。しかしながら、PC鋼棒の種類やその配置形式、そしてプレストレスの導入方法、さらには柱が強くなりすぎることによる柱梁接合部や梁とのかかり合いも含めて、ラーメン構造物としての新たな問題の発生など、まだ検討すべき課題は多い。本研究はまだ緒についたばかりで、今後も継続した研究を展開する予定である。

謝辞：高強度鉄筋（SD490相当品）を提供いただいた東京鉄鋼株式会社に厚くお礼申し上げます。

参考文献：

- 1) J.B.Mander, M.J.N.Priestley and R.Park : Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete, ASCE Journal of Structural Eng., Vol.114, No.8, pp.1804-1826, Aug. 1988
- 2) 松村弘道, 伊藤茂樹 : 角型鋼管に充填されたコンクリートの圧縮強度, 日本建築学会大会学術講演梗概集C (熊本), pp.1627-1628, 1989.10
- 3) F.E.Richart et al. : A Study of the Failure of Concrete under Combined Compressive Stresses, Univ. of Illinois Eng. Experimental Station, Bulletin No.185, 1928
- 4) 郝洪涛, 山川哲雄, 村中圭介 : An Experimental Study on Seismic Behavior of RC Columns Doubly Confined by Steel Tube and Hoops, 日本建築学会大会学術講演梗概集 (近畿), pp.67-70, 1996.9