

論文 炭素繊維シートで横拘束されたコンクリート柱の応力-ひずみ関係

細谷 学*1・川島一彦*2・星隈順一*3・宇治公隆*4

要旨：炭素繊維シート（以下、CFS(Carbon Fiber Sheets)と記す）で補強された鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査にCFSによる横拘束効果を反映させるため、CFSで横拘束されたコンクリート柱の一軸圧縮試験を実施し、コンクリートの応力-ひずみ関係を求めた。実橋を考慮したCFS補強量では、コンクリート最大圧縮応力の増加は見られないが、最大圧縮応力後の強度低下が緩やかになり終局ひずみが増大する効果が認められた。この傾向は帯鉄筋による拘束効果とは大きく異なる。これは横拘束補強量の考え方に最大引張力を採用したためであり、補強材の弾性率や断面積を考慮する必要があることを明らかとした。
キーワード：炭素繊維シート、拘束効果、応力-ひずみ関係、耐震補強、RC橋脚

1. はじめに

兵庫県南部地震では、鉄筋コンクリート橋脚（以下、RC橋脚と記す）がこれまでにない甚大な被害を受けた。これらの多くは、じん性の向上が考慮されていない時代の旧耐震基準で設計されたものである。そのため今後、被災した橋脚の復旧と同時に、今回被災した橋脚と同じ旧耐震基準により設計された既存橋脚の耐震補強が急務である。RC橋脚の耐震補強工法としては、RC巻立て工法、鋼板巻立て工法がよく知られているが、施工性を考慮して近年、炭素繊維シート巻立て工法が注目されている。この工法は、耐震補強による躯体断面および躯体重量の増加がほとんどなく、施工性や耐腐食性も優れている。既往の研究によれば、CFSが、段落し部の曲げ補強や段落し部および基部のせん断補強に対して有効であることが報告されている[1,2]。しかし、横拘束効果を耐震補強に取り入れるためには、CFSによるコンクリートの最大応力や変形性能の向上を定式化しておかなければならない。

そこで本研究では、CFSによる横拘束効果をRC橋脚の地震時保有水平耐力の照査に反映できるように、CFSで横拘束されたコンクリート柱試験体の一軸圧縮試験を行い、横拘束下でのコンクリートの応力-ひずみ関係を求めた。

2. 実験概要

本実験では、断面形状、断面寸法、CFS補強量をパラメータとして、星隈らの実験[3,4]を参考に表-1に示すように合計16体の試験体を用いた。断面形状は円形と正方形の2種類とし、試験体寸法は直径または辺長が500mmの大型試験体と直径または辺長が200mmの小型試験体の2種類とした。試験体の高さは、直径および辺長の3倍とした。CFS補強量は、次式によるコンクリートに対するCFSの体積比 ρ_{cf} （カーボンファイバー比）で与えることとした。

-
- *1 東京工業大学 工学部土木工学科 研究生（正会員）（大成建設(株) 勤務）
 - *2 東京工業大学教授 工学部土木工学科、工博
 - *3 建設省土木研究所 耐震研究室研究員
 - *4 大成建設(株)技術研究所 材料研究部、工博（正会員）

$$\rho_{CF} = 4 \times n \times t_{CF} / d \quad (1)$$

ここで、 t_{CF} : CFS 1層の厚さ (mm), n : CFSの巻立て層数, d : コンクリート柱の断面長である。 d としては、円形断面の場合は直径を、また、正方形断面の場合は辺長をとる。

カーボンファイバー比 ρ_{CF} としては、表-1に示すように0.05~0.15%を与えた。これは、実橋レベルでのコストや施工性を考慮して定めた値であり、例えば、直径3mの円柱に対してCFSを2~6層程度巻いた場合の値に相当する。

CFSの補強状況を図-1に示す。大型試験体の一部 (No.2, No.6) と小型試験体では、幅1~3cmの帯状にしたCFSを一定の間隔で巻付けた。これは、CFSをフルに巻くと、1層だけでも上記の ρ_{CF} を上まわってしまうためである。CFSの巻付け方向はいずれの試験体も帯鉄筋方向とした。シートのラップ長は、大型試験体では20cm、小型試験体では10cmとした。CFSが応力集中

で破断するのを防ぐため、正方形断面の試験体では、辺長が200mmの場合には半径30mmの、また辺長が500mmの場合には50mmの面取りを行った。使用したCFSの諸元を表-2に示す。コンクリートには、早強ポルトランドセメントを使用し、呼び強度は30N/mm²、またスランプは8cmとした。粗骨材としては最大寸法20mmのものをを用いた。試験時の圧縮強度は37~40N/mm²である。载荷は変位制御による単調一軸圧縮

表-1 試験体の諸元

No.	断面形状	試験体寸法	炭素繊維比 ρ_{CF} (%)
1	円形	$\phi 500\text{mm}$ $\times h 1500\text{mm}$	—
2			0.044
3			0.089
4			0.178
5	正方形	$\square 500\text{mm}$ $\times h 1500\text{mm}$	—
6			0.044
7			0.089
8			0.178
9	円形	$\phi 200\text{mm}$ $\times h 600\text{mm}$	—
10			0.056
11			0.111
12			0.167
13	正方形	$\square 200\text{mm}$ $\times h 600\text{mm}$	—
14			0.056
15			0.111
16			0.167

表-2 炭素繊維シートの力学的特性

繊維目付	g/m ²	200
繊維比重	g/cm ³	1.80
厚さ	mm	0.110
引張強度	N/mm ²	4,227
弾性率	kgf/cm ²	2.48×10^6
破断伸び率	%	1.5

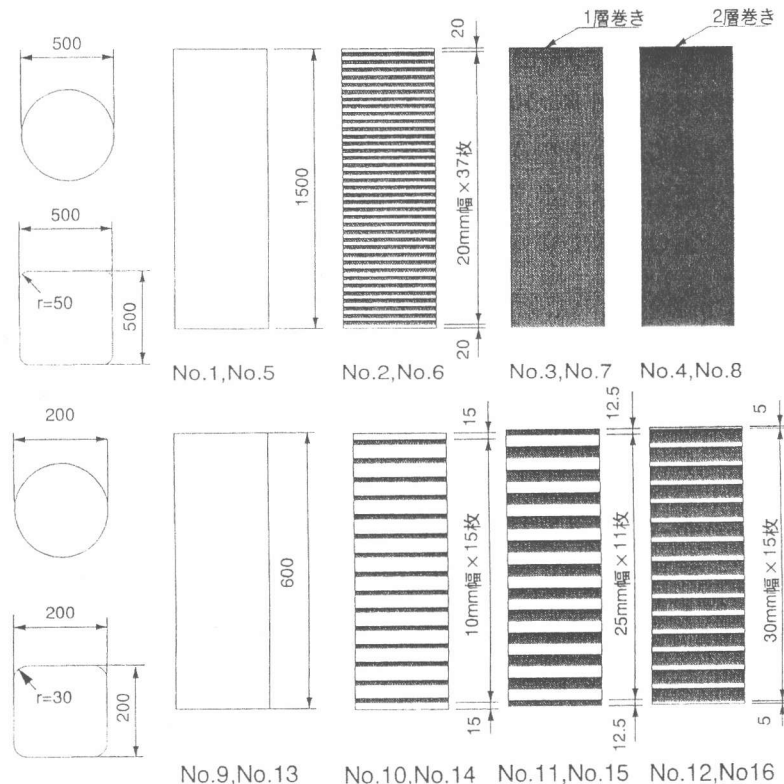


図-1 炭素繊維シートの取り付け方

とし、載荷速度は毎分0.2mmとした。試験体の軸方向ひずみは、変位計で測定した試験体上下間の変位を試験体の高さで割って算出した。

3. 横拘束したコンクリートの 応力度－ひずみ関係

3.1 応力度－ひずみ関係

図-2にコンクリートの応力度－ひずみ関係を示す。無補強の試験体ではひずみが2500～3000 μ 付近でコンクリートの強度は最大となり、その後、急激に低下し、脆性的に破壊する。最大圧縮応力度は大型試験体では約27MPa、小型試験体では約38MPaである。なお、原因がはっきりしないが、無補強での正方形断面のNo.5試験体は、応力度が22MPaあたりで破壊した。これについては、将来、再実験が必要であるが、これをそのまま正方形断面の無補強試験体の基準値とみなすには問題があるため、ここでは暫定的に円形断面の無補強試験体No.1の結果を用いることとした。この理由は、無補強の場合には、前述したように応力－ひずみ関係は、それ程大きく断面形状が円形か正方形かによらなかったためである。ただしこれはあくまでも取り敢えずの措置であることに注意して頂きたい。CFS補強した場合には、いずれも最終的にはCFSが破断して終局状態となった。大型試験体では、多少ばらつきがあるが、補強量が増加するにつれてコンクリートの最大圧縮応力およびこれが生じる時のひずみが増大し、また、最大圧縮応力後の下降勾配が緩やかになる。一方、小型試験体では最大圧縮応力およびその時のひずみにほとんど変化は見られない。両者に違いが生じる原因は明らかでない。また、下降勾配は補強量の増加にともない緩やかになり、終局時のひずみも増加

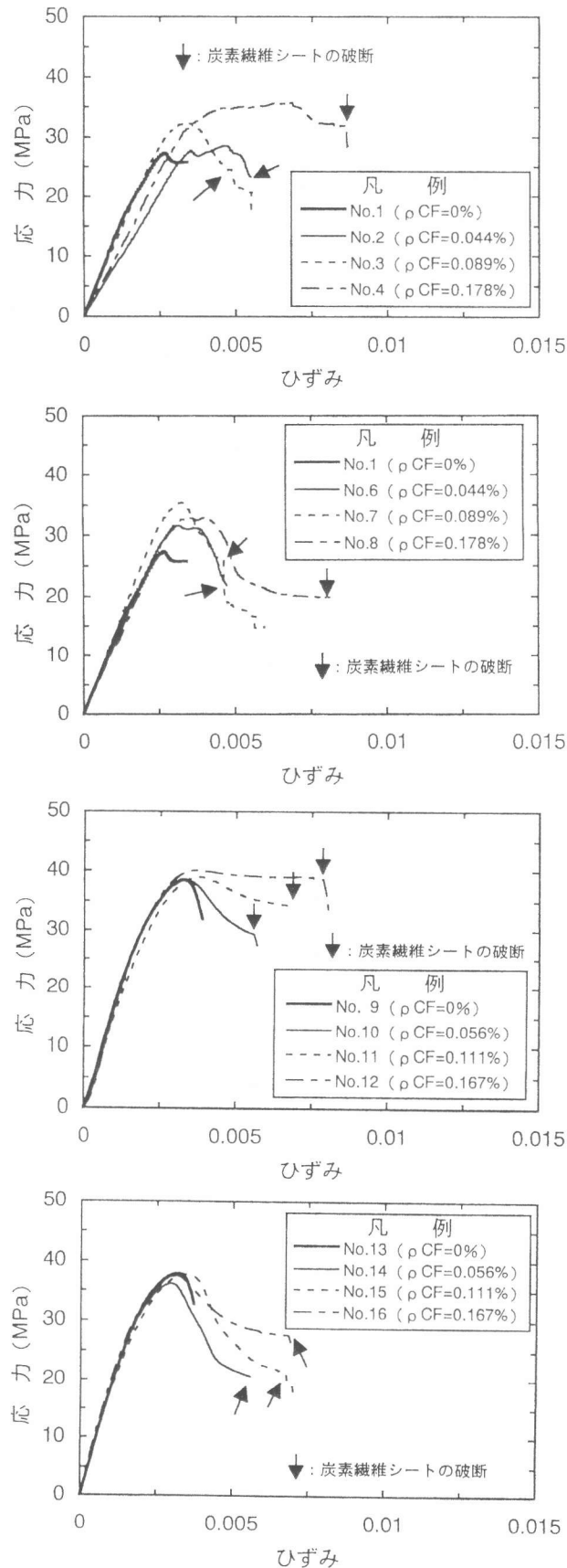


図-2 コンクリートの応力度－ひずみ関係

する。また、最大圧縮応力およびその時のひずみには断面形状による差異はほとんどないが、下降勾配は円形断面のほうが正方形断面よりも緩やかである。

3.2 横拘束効果の定式化

(1) コンクリート最大圧縮応力

図-3に拘束効果と最大圧縮応力の関係を示す。ここで、 f_{yh} はCFSの引張強度、 f_{co} は無補強試験体の圧縮強度である。図中の実線は復旧仕様で示されている星隈らの帯鉄筋で拘束した場合の関係式である[3,4]。帯鉄筋で拘束した場合には、円形断面と正方形断面では拘束効果に顕著な違いがあり、円形断面の方が拘束効果が高い。一方、CFSで拘束した場合には、断面形状による違いはほとんどなく、CFSによる補強量が増えても、矩形断面コンクリートを帯鉄筋で横拘束した場合と同程度の強度の増加率となっている。

(2) コンクリート最大圧縮応力時のひずみ

図-4に拘束効果と最大圧縮応力時のひずみ ϵ_{cc} の関係を示す。最大圧縮応力と同様に、補強量の増加によるひずみの増大はあまり大きなものではない。また、断面形状による違いも大きくない。帯鉄筋で横拘束した場合と比べて、 ϵ_{cc} に対する効果は少ないことが分かる。

(3) 最大圧縮応力後の下降勾配

図-5に拘束効果と下降勾配 E_{des} の関係を示す。ここで E_{des} は、最大圧縮応力時から終局破壊時までの平均弾性係数と定義し、実験結果を最小自乗近似して求めた。なお、終局破壊はCFSが破断し、圧縮応力が急激に減少する点と定義した(図

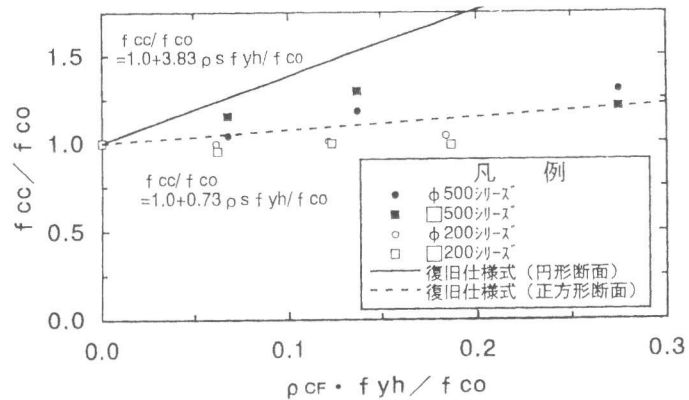


図-3 横拘束と最大圧縮応力の関係

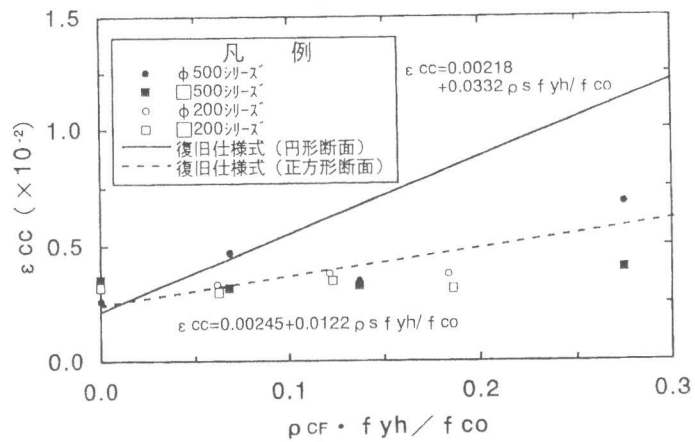


図-4 横拘束と最大圧縮応力時ひずみの関係

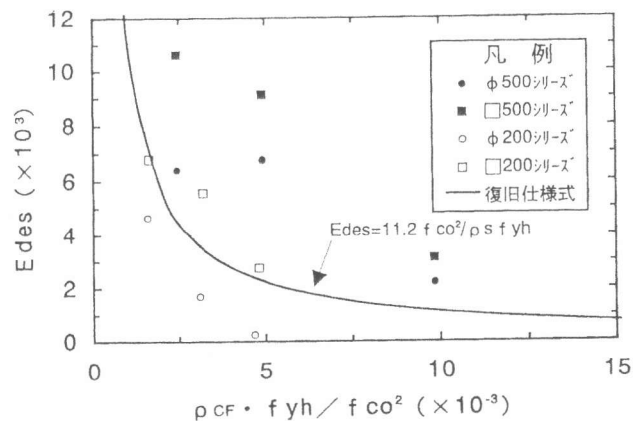


図-5 横拘束と下降勾配の関係

2参照)。試験体の寸法によって差があるが、補強量が多くなると E_{des} は緩やかになる。また、断面形状による影響も現れており、同一の補強量に対する E_{des} は円形断面の方が正方形断面よりも小さい。

4. CFSの剛性によって評価した横拘束効果

以上のように、CFSでは帯鉄筋と違って、応力上昇域での拘束効果は小さく、応力下降域になって初めて効果が発揮されることが明らかとなった。この理由を明らかにするために、CFSの周方向ひずみとそのときのコンクリートの圧縮応力を示した結果が図-6である。コンクリートの圧縮応力が最大になる時の、CFSのひずみは2000~4000 μ 程度にしか達していない。CFSの破断ひずみは約15000 μ であり、2000~4000 μ 程度の段階では、CFSには500~1000N/mm²程度の応力しか生じていない。すなわち、CFSが最大発揮できる1/7~1/4の拘束力しか生じていないことになる。帯鉄筋で拘束した場合には、帯鉄筋が最大強度に達し、破壊し始める付近でコンクリートの圧縮強度は最大となるが、CFSの場合には引張強度が最大になる前にコンクリート強度が最大値に達し、破壊し始める点が大きく異なっている。

CFSの引張強度は3500~4500N/mm²で、鉄筋の降伏強度の10倍程度であるため、CFSで補強する場合には、帯鉄筋の1/10程度の断面積で良いのではないかと考えられてきた。今回の実験では、 ρ_{CF} は星隈らの実験による帯鉄筋量の1/10程度しか考慮していない。しかし、CFSと鉄筋の弾性係数はほぼ同じであることから、CFSと帯鉄筋が同じ拘束力を発揮するためには、CFSは帯鉄筋の約10倍の変形量が必要である。言い換えれば、CFSの断面積を帯鉄筋の断面積

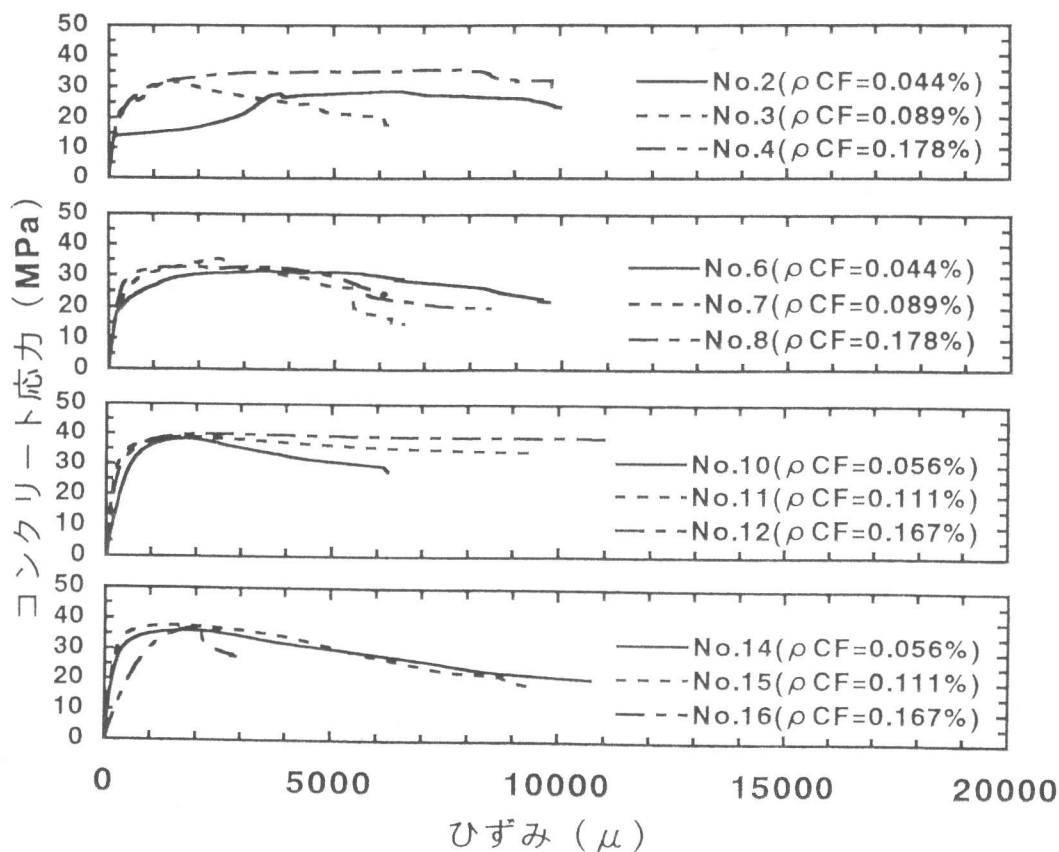


図-6 炭素繊維シートの周方向ひずみとコンクリート応力の関係

の1/10とすれば、帯鉄筋に比べてC F Sの方が横拘束に対する引張剛性が小さく、同じ変形量ではC F Sによる拘束力は帯鉄筋の1/10程度しか生じない。したがって、コンクリートの応力上昇域ではC F Sによる拘束効果はあまり大きくなく、応力下降域にはいって、変形につれて拘束力が増加し続けた段階で、拘束効果が次第に現れてくると考えられる。応力上昇域では拘束力が小さいため形状による拘束効果の差が現れにくい、下降域になると拘束力が大きくなってくため、形状による効果の差が現れ始めたものと考えられる。以上より、C F Sの強度が帯鉄筋の10倍程度であることからC F Sの断面積を帯鉄筋の1/10程度にして、帯鉄筋換算によって地震時保有水平耐力の照査を行うことは、C F Sによる横拘束効果を過大に評価する。

なお、実際にC F Sで巻き立て補強したR C橋脚のじん性率は無補強の場合より増加することが報告されている[1]が、これは横拘束によるコンクリートの f_{cc} や ϵ_{cc} の増大ではなく、終局ひずみの増大や応力低下の減少などによるのではないかと考えられる。これについては、さらに今後、検討していく必要がある。

5. 結 論

C F Sによる横拘束効果をR C橋脚の地震時保有水平耐力の照査に反映させるために、C F Sで補強したコンクリート柱試験体の一軸圧縮載荷試験を行い、応力-ひずみ関係を求めた。主な結果は以下の通りである。

- (1) C F Sによりコンクリート柱を横拘束した場合には、本実験の補強量程度であれば、①コンクリートの最大圧縮応力の増加はあまりなく、②最大圧縮応力時のひずみもあまり変化しないが、③最大圧縮応力後の下降勾配は緩くなり、終局ひずみを増大させる効果がある。
- (2) 上記(1)のようになるのは、C F Sの強度が帯鉄筋の10倍程度であることから、C F Sの断面積を帯鉄筋の1/10程度にすると、横拘束に対する引張剛性が帯鉄筋の1/10しかなく、このため、C F Sの引張強度が最大になる前にコンクリート強度が最大値に達し、破壊し始めるためである。
- (3) C F Sの横拘束効果は、帯鉄筋とは大きく異なる。このため、C F Sの強度が帯鉄筋の10倍程度であることからC F Sの断面積を帯鉄筋の1/10程度にして、帯鉄筋換算によって地震時保有水平耐力の照査を行うことは、C F Sによる横拘束効果を過大に評価する。

参考文献

- [1] 宇治公隆、横田和直、池田尚治：シート状炭素繊維による既設構造物の耐荷性能向上機構、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14、No.2、1992
- [2] 藤原博、東田典雅、大野了、岡島豊行：炭素繊維によるR C橋脚の耐震補強効果について（その1 載荷実験）、土木学会第46回年次学術講演会、V-377、1991
- [3] 星隈順一、川島一彦、長屋和宏：鉄筋コンクリート橋脚の地震時保有水平耐力の照査に用いるコンクリートの応力-ひずみ関係、土木学会論文集、No.520/V-28、p1-11、1995.8
- [4] 星隈順一、川島一彦、長屋和宏：大型模型を用いた拘束コンクリート柱の圧縮載荷実験と応力-ひずみ特性の分析、土木技術資料、37-7、1995