

# S 造と SRC 造の建物の柱脚の実験的研究 (その 2)

——埋込型の中柱柱脚の検討——

武田 寿一 高橋 泰彦

## An Experimental Investigation of Column Bases of Steel Reinforced Concrete Structure (Part 2)

——Tests of Inner Column Bases——

Toshikazu Takeda Yasuhiko Takahashi

### Abstract

This paper describes test results of embedded inner column bases in which stresses of columns are transferred to foundation beams with bearing forces acting between columns and concrete of beams. The tests were performed to investigate the behaviors of bases for embedded lengths of columns and existence of orthogonal foundation beams.

As a result, the rigidity of the base was slightly lower than the calculated one and became lower after occurrence of cracking in beams. The behavior of the base of the column whose embedded length was more than two times the column depth was very stable and the orthogonal beams greatly improved the properties of the base.

In addition, the mechanism of stress transfer, failure pattern of base, and bearing strength of concrete are discussed herein.

### 概要

前報に引き続き、柱の応力を支圧力で基礎ばりに伝達する埋込型の中柱柱脚の横型実験の報告である。この実験では、柱の埋込み長さの変化と、直交方向基礎ばりの有無、による柱脚の挙動の変化を調べることを目的とした。

その結果、埋込型柱脚でも固定度は計算値より多少低く、基礎ばりにクラックが発生するとさらに低下すること、埋込長さを柱丈のおよそ2倍以上にすれば、挙動が安定した柱脚になること、また、直交ばりは柱脚の性状を著しく向上させること、などが明らかになった。そのほかに、応力伝達機構や柱脚の破壊形式、コンクリートの支圧強度も検討している。

### 1. 序

前報(その1)<sup>1)</sup>では、柱鉄骨を基礎ばりの中に埋込む形式の柱脚(埋込型柱脚)を対象に、柱の応力を支圧力で伝達する方法の可能性の検討と、柱脚補強形式の有効性の調査を目的として実施した4種類の試験体の実験結果を報告した。

本報告は、前報にひきつづいて、中柱の埋込型柱脚に関して、柱鉄骨の埋込長さによる性状変化と、直交方向基礎ばりの影響を実験で調べたものである。

なお、柱脚には基礎ばり端部の性状が、かなり影響を与えると思われるので、柱—柱脚—基礎ばりを組合せた

実状に近い試験体とした。また、単純な鉄骨造の柱脚を扱っているが、鉄骨鉄筋コンクリート造にも適用できると考えている。

### 2. 試験体

試験体は、建物の中柱と基礎ばりを水平荷重時の反曲点位置から切り出した逆T字型のモデルとして、図-1に形状、寸法を示す。

試験体の部材は、前報<sup>1)</sup>と同じであり、柱は図-2のようなH-250×100×9×19のビルトアップH型鋼、また、基礎ばりは $b \times D = 230 \times 600$ のRCばりとした。実物をほぼ $\frac{1}{4}$ に縮小した断面である。

試験体はS6NO, S2NO, S4MOの3体であるが、前報<sup>1)</sup>のS4NOも含め、試験体の構成、配筋などを表-1に示す。各試験体の相違点は、柱鉄骨の埋込長さ、直交方向基礎ばりおよび水平ハンチの有無であり、それぞれの名称の中に表現されている。

試験体名称は、4文字からなり、頭文字は中柱の柱脚を、また、4番目は柱断面形状を示し、今回は共通である。2番目の数字が柱の基礎ばり中への埋込長さを意味し、6, 4, 2, はそれぞれ、60, 40, 25 cm 埋込まれていることを示す。なお、埋込長さ60 cmとは、柱が基礎ばりの下端面まで貫通していることである。3番目の文字は柱脚の拘束方法の略号で、Nは直交ばりがある形式を、Mはそれがない形式を意味している。

試験体の材料の特性を表-2に示す。

### 3. 加力方法と測定方法

加力方法は図-1の通りで、基礎ばりの端部3点をローラー支持し、柱頭にジャッキで水平力をかけて、柱脚近傍を水平荷重時の応力状態とした。加力方法は前報<sup>1)</sup>と同じである。加力は柱頭で測る全体変形で制御し、原則として柱が降伏したことを確認した後、柱の部材角で0.015, 0.02, 0.0275, 0.035rad.の変形時に正負2サイクルの繰り返し加力を行ない履歴性状を調べた。

全体の変形は、基礎ばり両端の中心を不動点とした治具によって柱頭と柱脚で測定し、また、柱脚部の沈下と拔出し、および、水平移動も測定した。

歪は柱の鉄骨、柱脚部柱型と基礎ばりの中の鉄筋で測定した。特に、今回は柱の埋込部のフランジに図-2のような溝を設け、その中にS.G.を貼付けて柱脚部の曲げモーメントと軸力を

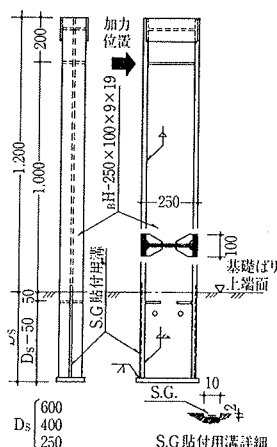


図-2 試験体の鉄骨詳細

	コンクリート	鋼板		鉄筋				
		EP19	EP9	D25	D16	D13	D10	D6
降伏応力度 (ton/cm <sup>2</sup> )	—	3.50	3.96	3.66	4.26	4.70	4.94	3.01
最大強度 (ton/cm <sup>2</sup> )	0.181	5.31	5.43	5.73	6.44	6.42	6.58	5.11
伸び率 (%)	—	24.7	24.0	17.3	14.1	16.0	15.5	20.5

表-2 素材試験結果

求めることにした。

## 4. 実験結果と考察

### 4.1. 実験結果

基礎ばりのクラック発生状況を試験体別に図-3に、荷重(P)と柱頭の変位(δ<sub>v</sub>)の履歴曲線とその包絡線を図-4, 図-5に示す。図-4から求めた減衰定数の結果が図-10である。

図-6は基礎ばり中に埋込まれた柱の深さ方向の歪分布であり、図-7は図-6から計算した軸力と曲げモーメントの分布を、また、図-8は図-7から推定した柱脚の支圧力と摩擦力である。

実験時に確認した耐力を計算値<sup>1)</sup>と比較して表-3に

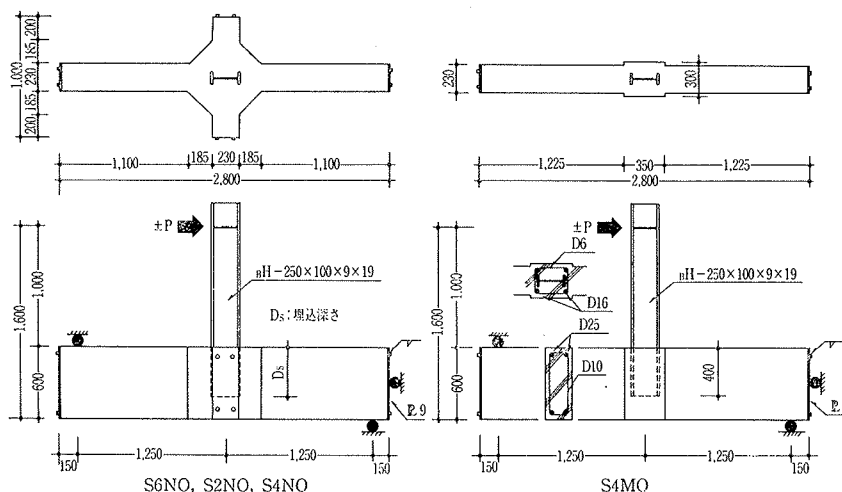


図-1 試験体形状

項目	柱		柱脚(埋込み部)		基礎ばり(直交ばりとも)			備考	
	軸力	鉄骨断面	埋込み長さ	主筋	フープ	RC断面	主筋		スタラップ
試験体名									
S6NO	なし	H-250×100×9×19	60cm	4-D16	2-D6@70 P <sub>w</sub> = 0.30%	23×60cm	上端 2-D25 下端 2-D25	2-D10@100 P <sub>w</sub> = 0.62%	直交方向基礎ばりあり 交差部に水平ハンチあり
S4MO	同上	同上	40	同上	同上 但し、TOP筋 2-D13	同上	同上	同上	直交方向基礎ばりなし 水平ハンチなし
S2NO	同上	同上	25	同上	2-D6@70 P <sub>w</sub> = 0.30%	同上	同上	同上	直交方向基礎ばりあり 交差部に水平ハンチあり
S4NO	同上	同上	40	同上	同上	同上	同上	同上	同上

表-1 試験体一覧表

示し、実験終了後、柱脚の破損したコンクリートを除去した状態を写真-1 に示す。

なお、前報<sup>1)</sup>の S4NO の試験結果を含めて考察を行なうので、各図表には、その結果も併記した。

#### 4.2. 変形

図-5 の  $P-\delta_U$  曲線の初期勾配は全試験体で完全に一致している。しかし、 $P=5$  ton を越えると、まず、S4MO、S2NO の剛性が低下し、さらに、 $P>8$  ton では S2NO の変形が急増し、S4MO を下回った曲線となった。また、S4NO は  $P=16$  ton から S6NO と異なった性状を示すようになったが、この原因は柱の降伏強度の相違によるものと思われる。S4NO の結果を降伏強度の違いで補正すれば、図-5 の  $\times$  印となり、両者はほぼ一致する。したがって、図-5 から、S6NO、S4NO が最もすぐれ、S2NO が劣っていることがわかった。S4MO は中間に位置している。

S6NO、S4NO の結果と、柱脚部を柱、はり、パネル部にモデル化して求めた計算値と比較する。図中の計算荷重  $P_c$  (基礎ばりにクラック発生荷重) と  $P_p$  (柱に塑性ヒンジ発生荷重)、あたりで剛性の低下がみられ、計算値と同じ傾向をもつが、変形量は計算値よりかなり大きく、 $P_c$  以下で 1.25 倍また  $P_c < P < P_p$  では 1.5 倍以上である。前報<sup>1)</sup>で述べたように  $P < P_c$  では柱の抜出しが、 $P_c < P < P_p$  では柱脚コンクリートの局所的な破損が影響していると考えられる。

埋込型柱脚の固定度は、上記のモデル化のもとで推定した状態より多少低く、しかも、基礎ばりにクラックが発生するとさらに低下する傾向がある。

#### 4.3. 柱脚の応力伝達

柱から基礎ばりに応力が伝わる機構を柱の基礎ばり中への埋込部で測定した歪で考察する。図-6 に S6NO の柱の両フランジで測った深さ方向の歪分布を示す。この歪を応力に換算し、無次元化すると図-7 となる。モーメントは深くなるにつれて双曲線的に減少し、はりの下端面で 0 に近づく。また、軸

力は全長にわたり引張力となり、上端近くにピークをもった山形の分布である。

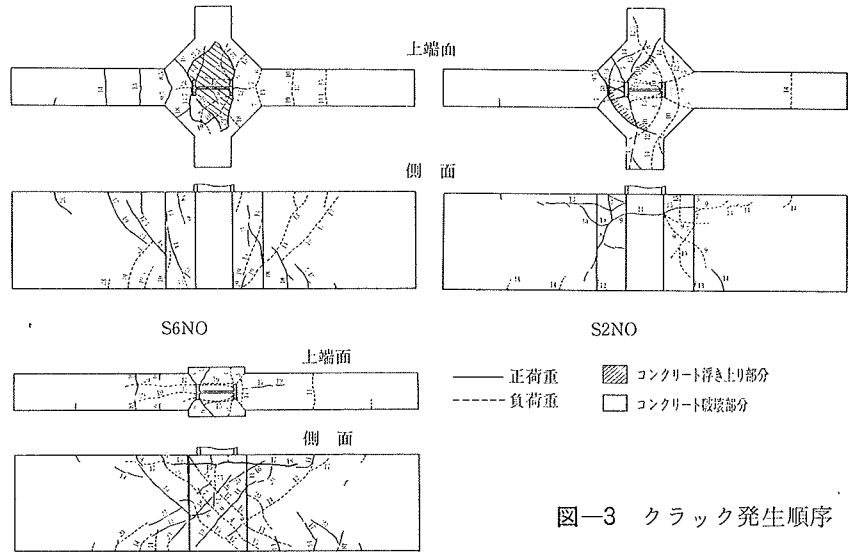


図-3 クラック発生順序

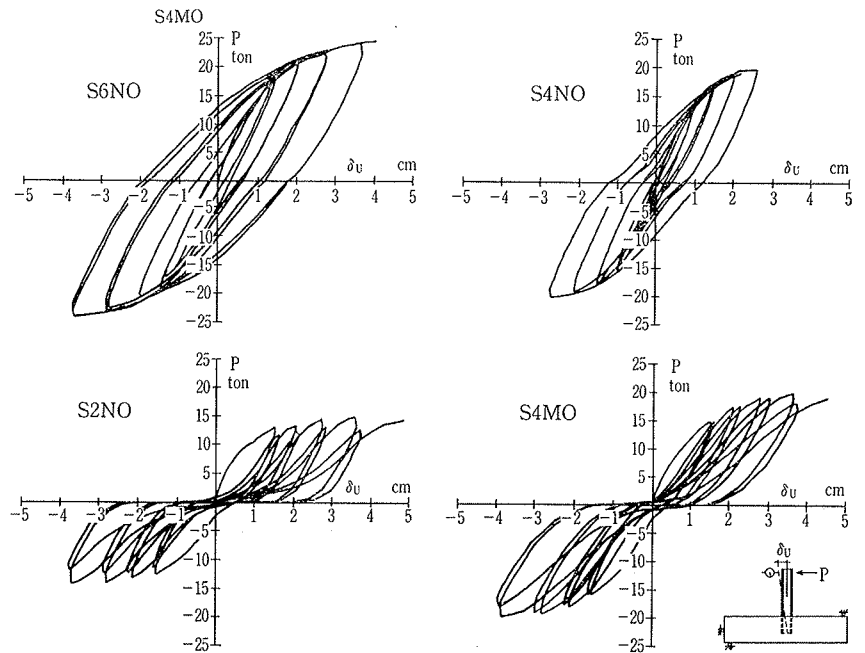


図-4 荷重-変形曲線

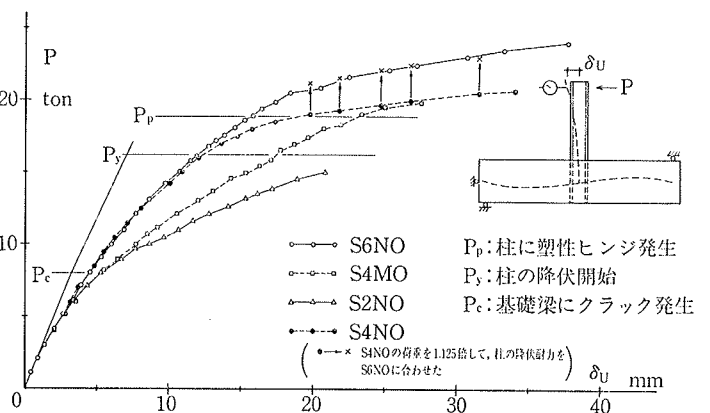


図-5 荷重-変形曲線(包絡線)

柱の応力は柱とコンクリートが接触するところに働く支圧力(q)と、柱フランジ外部に働く支圧力と直角方向の摩擦力(4N<sub>F</sub>)で基礎ばりに伝わり、また、軸力は摩擦力によって生じると仮定して、図-7からq、4N<sub>F</sub>の分布を求め図-8とした。歪の測定間隔が7cmと小さいために、測定歪のわずかのバラツキがq、4N<sub>F</sub>に大きな影響を与えるので、それらの適正分布をとらえたり、定量的に把握することはむずかしい。しかし、定性的には次のことが言える。

まず、基礎ばり上端面近くに大きな支圧力が発生し、しかも、急激に減少して約10cmの深さで0になること、それより深い所では逆向きの支圧力となり、力も多少大きくなるが、上端に比べるとはるかに小さい。摩擦力は上端近くに支圧力ほどの集中性はないが、支圧力とほぼ相似的な分布である。

支圧力に対する摩擦力の比、すなわち、摩擦係数は上端を除き、約0.8と読みとれる。また、この段階では柱のモーメントの約60%を支圧力が、残りの40%を摩擦力がはりに伝達している。なお、図-8の支圧力と摩擦力は外力とほぼ釣り合った状態である。

4.4. 履歴性状

図-4の履歴曲線によると、S6NOが最もすぐれており、純鉄骨構造に匹敵するような完全紡錘型のループとなっている。また、S4NOも紡錘型で安定し

た履歴曲線であるが、S6NOに比べると少々見劣りがする。

S2NO, S4MOではスリップ現象の著しい逆S字型のループを描き、上記の2体の試験体との差は顕著である。ただし、同一変形振幅での繰り返し加力による荷重低下の状況や、変形の増加にともなう荷重上昇などの点で、S4MOがS2NOより良好である。

図-10の減衰定数(he)で定量的な比較を行なう。部材角R=0.015までは各試験体とも大きな差はないが、それ以上の変形では相違は明らかである。

すなわち、S6NOではRとheはほぼ比例関係にあり、R=0.0275でhe=0.20、R=0.035でhe=0.25である。ところが、S4MOとS2NOでは変形が増加してもheは一定値を保持する状態で、R=0.0275で0.075、R=0.035で0.085となった。S6NOの40%以下であり、エネルギー吸収性は大変劣る。

以上のことより、柱の埋込長さと同交ばりの有無によ

項目	計算耐力 (TON)						実験確認耐力 (TON), 破壊箇所				
	柱の耐力		基礎ばりの耐力		柱脚の耐力		実験途中		実験終了時		
	降伏	塑性ヒンジ	上端面クラック	下端面クラック	降伏	支圧力	上端面クラック	下端面クラック	最終耐力	破壊箇所	
試験体名											
S6NO	16.2	18.9	8.16	14.8	31.0	7.24	32.6	+8.5 -7.1	+14.1 -14.1	25.8	柱に塑性ヒンジ発生 柱脚コンクリートの表面の浮き上り
S4MO	16.2	18.9	7.43	12.1	31.0	3.21	14.5	+6.0 -5.0	+12.1 -13.1	20.0	柱脚パネル部の破壊 柱脚コンクリートの破壊
S2NO	16.2	18.9	8.16	14.8	31.0	1.25	5.66	+7.0 -6.0	+13.0 -12.0	15.1	柱脚コンクリートの破壊
S4NO	14.5	16.8	7.92	14.4	33.2	2.93	13.6	+8.5 -9.0	+16.5 -15.0	22.4	柱に塑性ヒンジ発生 柱脚コンクリートの表面の浮き上り

表-3 各種耐力



写真-1 破壊状況

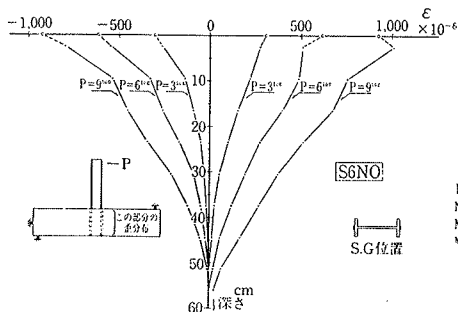


図-6 基礎ばり中の柱の歪分布

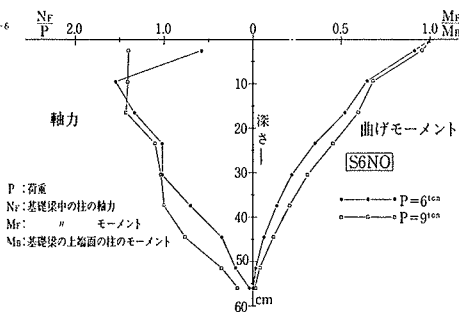


図-7 基礎ばり中の柱の応力

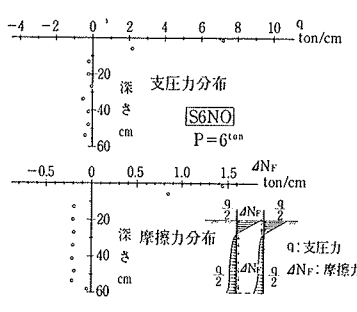


図-8 柱脚部の支圧力と摩擦力

る履歴性状の相違は著しいことがわらう。

#### 4.5. 耐力と破壊形式

基礎ばりのクラック発生荷重や柱の降伏荷重は計算値とほぼ一致する。また、前報<sup>1)</sup>と同様に柱のせん断力を考慮しないで、図-9(I), (II)の仮定支圧力分布 ( $\alpha = 1.0, \beta = 1.0$ )のもとで求めた設計耐力, 支圧耐力を表-3に示しているが、全体的に安全側の評価をしているので、柱脚設計の目安になると思われる。

鉄筋の効果を無視すれば、柱脚の耐力に影響する要素<sup>1)</sup>として、支圧力の分布, コンクリートの支圧強度, 有効支圧面の数, 有効埋込長さなどがある。完全塑性状態を考慮して矩形分布とすれば、図-9はすべての要素を含んでおり、 $\alpha$ は支圧力の基準強度  $F_c$  に対する比率を、 $\beta$ は埋込長さに対する有効長の割合を、また、図-9(II), (III)はそれぞれ有効支圧面が2面と1面の状態である。

まず、柱脚の最終状態として図-9(III)で  $\beta = 1.0$ を想定し、実験で得た最大荷重から  $\alpha$ を求めると、S2NOで5.33, S4MOで2.76, S6NOで1.58, S4NOで3.18であった。

しかし、各試験体の破壊パターンによって  $\alpha, \beta$ などが変化するので、試験体別に検討する。S2NOの柱脚コンクリートには繰り返し加力による柱側面の劣化と、柱フランジ前面で支圧力による圧壊が認められ、写真-1のように柱の全周でかぶりコンクリートの破壊が起こった。S6NO, S4NOではウェブ面近くのコンクリートの破壊は認められたが、フランジ圧縮面は健全であった。この試験体では柱の降伏で最大荷重がきまった。S4MO

には直交ばりがなく、柱脚柱型の幅が柱幅に比べて小さいために、柱型側面のコンクリートが横方向に押し出され分離するとともに、フランジ前面では支圧力におされてはりの主筋に沿った割裂クラック(図-3)が進行し、最終的にはコンクリートが浮き上り、写真-1のように脱落した。なお、主筋に沿ったクラックには引張側主筋の引き抜きによるボンド破壊も考えられ、またパネル部の破壊も早期に確認された。全体的にみて、柱脚では鉄筋のコンクリートのかぶり部分が破損し、変形が増加してそのまま柱脚の破壊に到る傾向があった。

したがって、最大耐力を推定するモデルとして、S6NOでは図-9(II)で  $\beta = 1.0$ が、S2NOとS4MOでは(III)で  $\beta = 1.0 - (\text{かぶり厚}/\text{埋込長さ})$ が適当であろう。この考え方をコンクリートが支圧破壊したS2NOにあてはめると、前述の  $\alpha$ はさらに大きくなる。また、図-8のような上端近くでの三角形分布を仮定すれば、局部的な強度はもっと大きいと予想される。

ただし、支圧強度が十分に発揮されるのは、まわりの拘束が大きい場合で、柱脚の直交ばりや水平ハンチが有効な役割を果たしていることがわかる。

また、S6NOのように柱の降伏が柱脚の破損に先行する場合には、性状を悪化させることにはならないが、基礎ばりの降伏が早期に起こる場合にはコンクリートの支圧強度を低下させるとと思われる。柱と基礎ばりの耐力比を検討する必要がある。

#### 5. まとめ

埋込型の中柱柱脚の実験結果をまとめて簡条書で示す。

- (1) 柱脚の固定度は、柱、基礎ばり、パネル部に置換したモデルによる計算値より多少低く、基礎ばりにクラックが発生するとさらに低下する。
- (2) 柱の応力を伝達する支圧力と摩擦力の分布を実測した例を図-8に示す。また、柱脚のコンクリートは  $F_c$  よりかなり大きな支圧強度をもつことがわかった。
- (3) 柱脚は埋込長さ、有効支圧面、周囲の拘束などの影響をうけ、柱脚のかぶりコンクリートの破損に特徴がある独特の破壊パターンを示す。
- (4) 柱の埋込長さを大きくすれば、剛性、耐力、履歴性状などが良好な柱脚となる。そのための必要埋込長さは柱丈のおよそ2倍と考えられる。
- (5) 直交ばりや水平ハンチによる側面からの拘束は柱脚の性状を著しく向上させる。

#### 参考文献

- 1) 武田, 高橋: S造とSRC造の建物の柱脚の実験的研究(その1), 大林組技術研究所報, No. 21, (1980), pp. 14~18

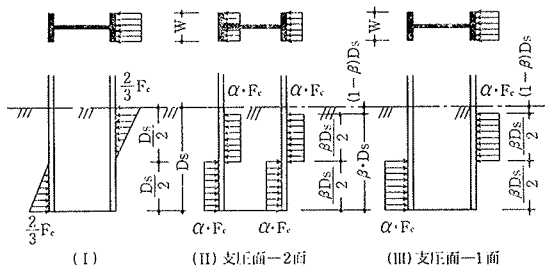


図-9 支圧力分布の仮定

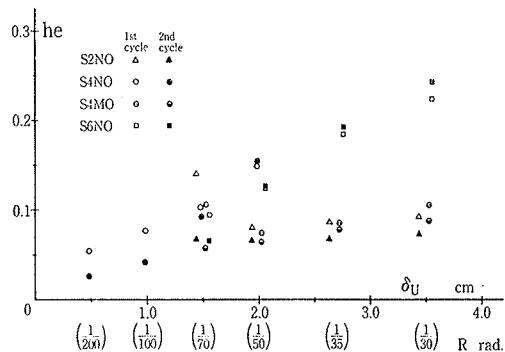


図-10 減衰定数