

論文 斜め方向に載荷された矩形RC柱の部材性能に関する研究

川村 力^{*1}・谷村 幸裕^{*2}・渡邊 忠朋^{*3}・本間 郁美^{*4}

要旨：矩形RC柱の耐震設計は、慣性力の作用方向として、柱面に対して直角方向について検討を行うのが一般的である。しかし、地震動による慣性力の作用方向は常に柱面に対して直角となるとは限らず、その他の方向についても検討を行う必要がある。本研究は、実物大の矩形RC柱の交番載荷実験を行い、柱面に対して45度方向から載荷された場合の部材性能について検討を行った。その結果、斜め45度方向載荷の場合、曲げ耐力およびせん断耐力は、矩形断面として求めた計算値を上回ることが明らかになった。

キーワード：矩形RC柱、斜め方向載荷、曲げ耐力、せん断耐力、変形性能

1. はじめに

現在の鉄道RCラーメン高架橋の柱部材における耐震設計は、慣性力の作用方向として、柱面に対して直角方向とし（以下、「直角方向載荷」と言う）、水平二方向の慣性力がそれぞれ独立して作用するものとして検討されるのが一般的である。しかし、地震動による慣性力の作用方向は、常に柱面に対して直角とは限らず、その他の方向に作用する場合もある。また、立体ラーメン高架橋を三次元モデルを用いて構造解析を行う場合、地震時応答を適切に算定するためには直角方向載荷以外の柱の部材特性を把握しておく必要がある。直角方向載荷以外のRC柱の部材特性に関する実験的研究^{1),2),3)}はいくつか行われているが、鉄道RCラーメン高架橋柱を対象とした実験は実施されていない。また、既往の実験は縮小試験体を用い、低い軸力レベルで実施されている場合が多く、十分な知見が得られていないのが現状である。

本研究は、実物大RCラーメン高架橋の柱試験体を用いて交番載荷実験を行い、柱面に対して45度方向から載荷された場合（以下、「斜め方向載荷」と言う）の柱の曲げ耐力、せん断耐力、変形性能について検討を行った。

2. 実験の概要

2.1 試験体諸元

図-1(a), (b) および表-1に、試験体の形状と諸元を示す。試験体は、一般的な鉄道RCラーメン高架橋の柱をモデル化した実物大の矩形柱とし、曲げ破壊型（引張鉄筋比0.78%, 帯鉄筋比0.79%）とせん断破壊型（引張鉄筋比1.23%, 帯鉄筋比0.11%）の2体作製した。断面寸法は800mm×800mm, せん断スパンは3000mmとした。また、曲げ破壊型の試験体は、軸力として3.68N/mm²載荷した。

表-1には、過去の実験(T97-1)⁴⁾において、今回実験を行った曲げ破壊型の試験体と形状や諸元が同じもので、柱面と直角方向に正負交番載荷試験を行ったものも示す。

2.2 載荷方法および測定項目

載荷方向は、柱面に対して45度とした。載荷方法は正負交番載荷とし、引張側となる軸方向鉄筋のうち、最外縁となる角部の鉄筋が降伏した時点の載荷点変位 δ_y を基準として、その整数倍ごとに正負各3回繰り返した。

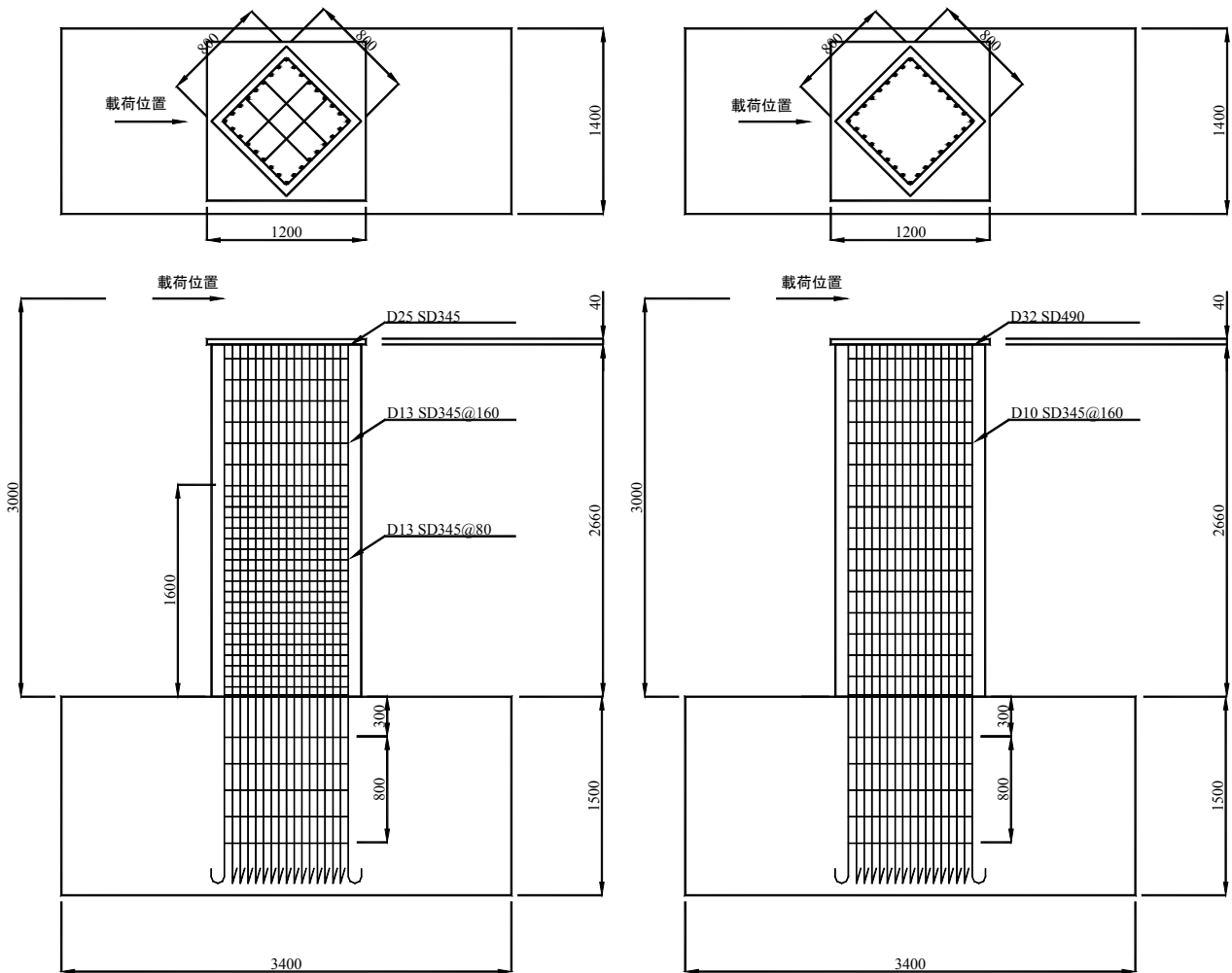
測定項目は、載荷点位置の水平変位、柱基部の軸方向鉄筋の抜け出し、軸方向鉄筋および帯鉄筋のひずみ、ひび割れ状況である。ここで、

*1 (財)鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 研究員 工修 (正会員)

*2 (財)鉄道総合技術研究所 コンクリート構造 主任研究員 博(工) (正会員)

*3 北武コンサルタント株式会社 博(工) (正会員)

*4 北武コンサルタント株式会社 (正会員)



(a) 曲げ破壊型 (No. 1)

(b) せん断破壊型 (No. 2)

図-1 試験体形状 (単位: mm)

表-1 試験体諸元

試験体	軸方向鉄筋		帯鉄筋			せん断 スパン (mm)	引張鉄筋比 (%)	帯鉄筋比 (%)	軸力 (N/mm ²)
	種類	径-本数	種類	径-組数-間隔(mm)					
T97-1	SD345	D25-9本	SD345	D13-2組 80ctc		3000	0.78	0.79	3.68
No.1	SD345	D25-9本	SD345	D13-2組 80ctc		3000	0.78	0.79	3.68
No.2	SD490	D32-9本	SD345	D10-1組 160ctc		3000	1.23	0.11	0.00

表-1 に示す引張鉄筋比は、直角方向載荷の場合の最外縁引張鉄筋 (本実験の場合9本) を、部材幅(800mm)と有効高さ(728mm)で除して求めた。表-2 にコンクリートと鉄筋の材料試験結果を示す。

表-2 材料試験結果

試験体	軸方向鉄筋 の降伏強度 (N/mm ²)	帯鉄筋の 降伏強度 (N/mm ²)	コンクリートの 圧縮強度 (N/mm ²)
T97-1	371.4	373.0	30.0
No.1	375.0	375.0	23.2
No.2	520.0	370.0	22.8

3. 実験結果

3.1 破壊状況

図-2 (a), (b) に, 最大荷重時におけるひび割れ状況を示す。図-3 (a), (b) に, 荷重変位曲線を示す。ここで, 図-3 (a) に示す荷重は, 軸力による付加モーメントの影響を考慮するため, 水平ジャッキによる載荷荷重に軸力による偏心モーメントをせん断スパン(3.0m)で割り戻した値を加えた。

曲げ破壊型の試験体(No.1)では, $3\delta_y$ で圧縮側の角のコンクリートが圧壊し(②), $5\delta_y$ で最外縁の軸方向鉄筋が座屈(③), その後は荷重の増加は緩やかになり $7\delta_y$ で最大荷重に達した。

その後, $7\delta_y$ で最外縁から2,3番目の軸方向鉄筋が座屈(④), $8\delta_y$ の2回目の載荷で最外縁の軸方向鉄筋が破断(⑤), 3回目の載荷で基部から240mmの位置にある3段目の帯鉄筋が破断, $9\delta_y$ で最外縁から2番目の軸方向鉄筋が破断(⑥)したところで載荷終了とした。従って, No.1は最外縁および最外縁から2,3番目の軸方向鉄筋が座屈したことにより荷重低下し, 曲げ破壊したものと考えられる。なお, ひび割れの進展状況は, 最外縁の角から水平方向に曲げひび割れが進展しており, 直角方向載荷の場合に見られるひび割れの進展状況²⁾との違いは見られなかった。

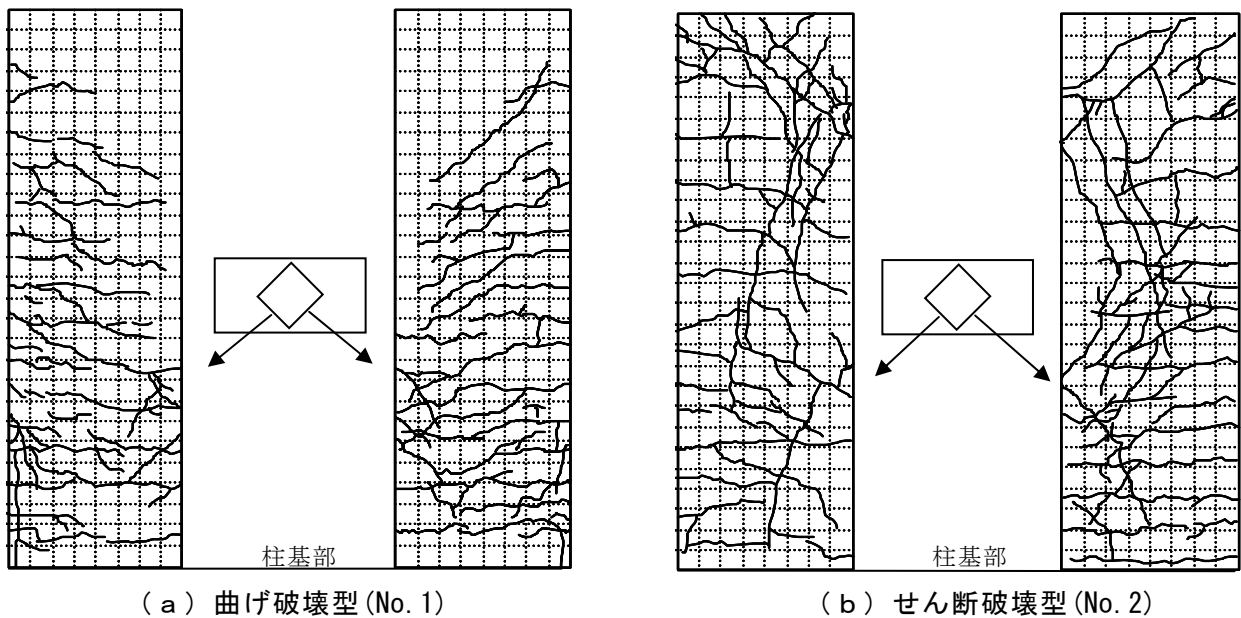


図-2 最大荷重時のひび割れ状況

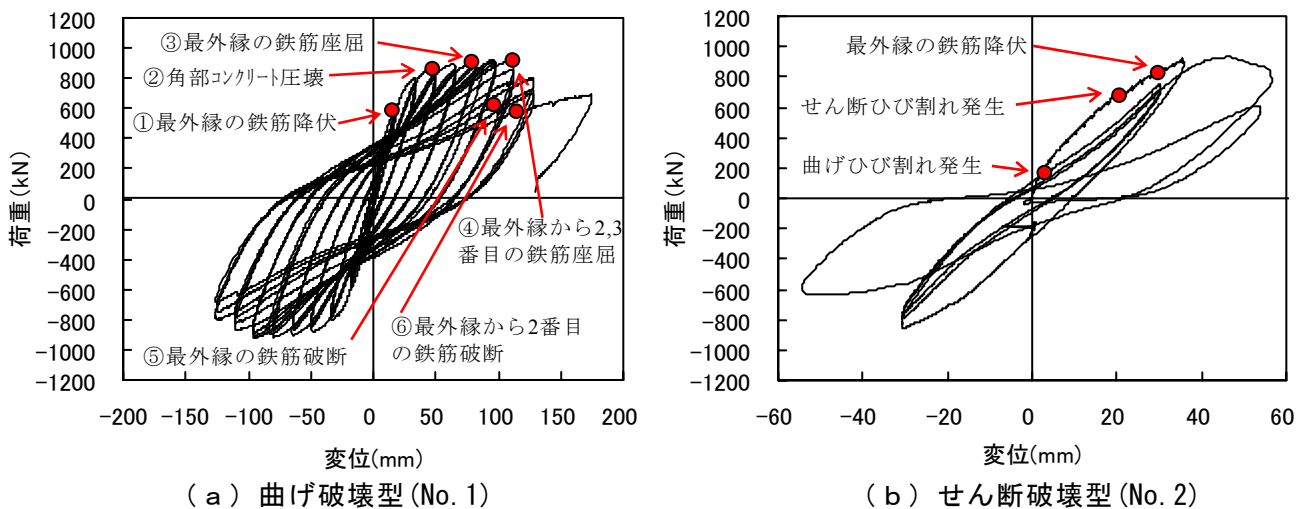


図-3 荷重-変位曲線

せん断破壊型の試験体(No.2)では、 $1\delta_y$ で柱下端の荷重方向に対する最外縁付近にひび割れが生じ、その後下端から上端に向かって斜めひび割れが生じるが、圧縮側まで進展せず、 $2\delta_y$ で荷重の増加とともに斜めひび割れが進展し荷重が低下した。従って、No.2は最終的にせん断破壊したものと考えられる。

3.2 曲げ耐力および変形性能に関する考察

(1) 荷重-変位の関係

図-4に、曲げ破壊型試験体(No.1)における荷重変位曲線の正荷荷時の包絡線を示す。図には、直角方向載荷の場合の包絡線(T97-1)も記入している。図-4より、降伏剛性についてはほとんど差が見られない。Y点(最外縁の鉄筋が降伏する点)については直角方向載荷の場合が降伏変位、降伏荷重がそれぞれ24.3mm, 761.7kNであり、斜め方向載荷の場合は16.5mm, 589.9kNであった。どちらも3割程度斜め方向載荷の場合のほうが小さい。これは斜め方向載荷の場合、最外縁の鉄筋が直角方向載荷に比べて同一変位に対するひずみが大きいために、早い段階で降伏するためと考えられる。ここで、斜め方向載荷の場合におけるY点は、最外縁1本の鉄筋が降伏した点としたが、どの位置の鉄筋が降伏した時点をY点とするかによって降伏荷

重、降伏変位は異なる。しかし、図-4より、勾配変更点で見ると斜め方向載荷と直角方向載荷の場合で大きな差はないと考えられる。

M点(荷重低下が顕著となる前の点)につい

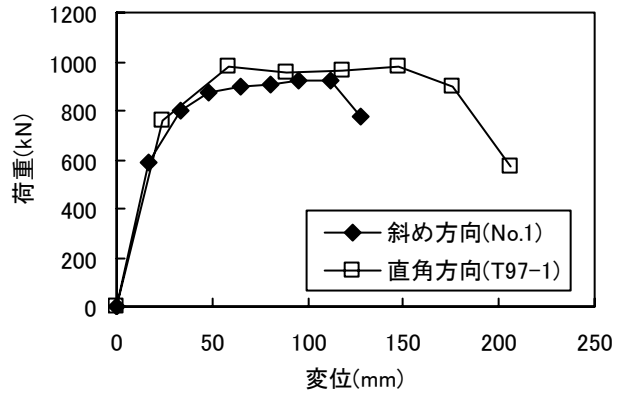


図-4 荷重変位の比較

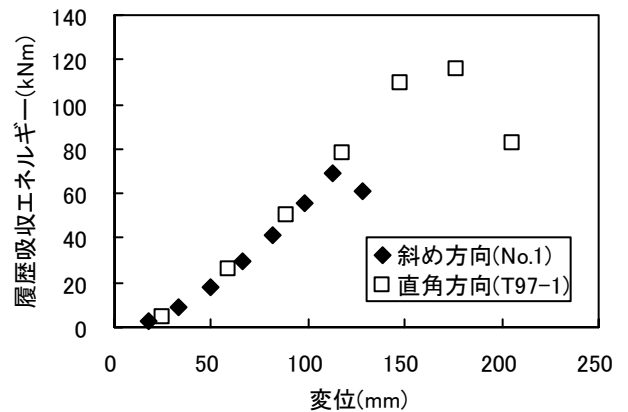
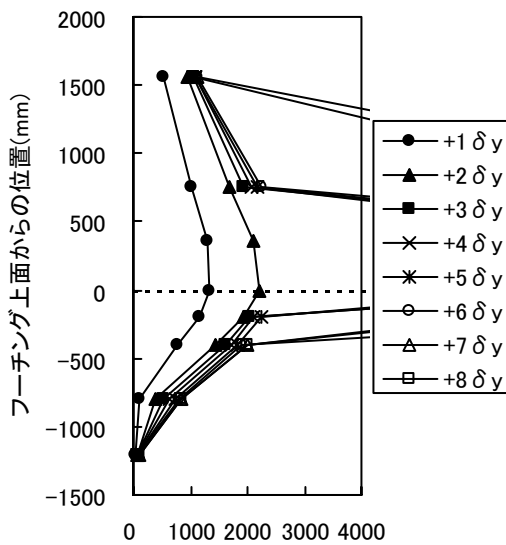
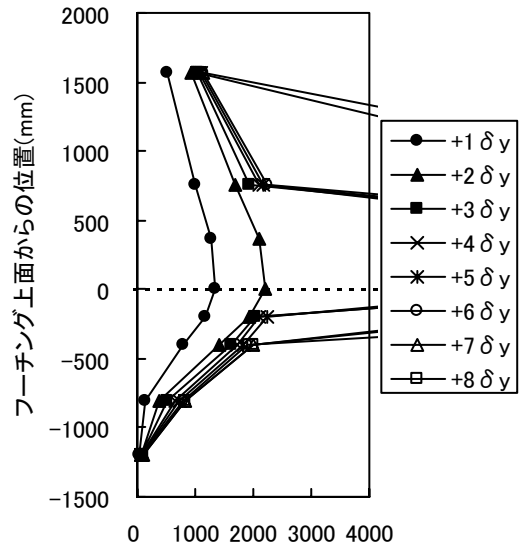


図-5 履歴吸収エネルギーの比較



(a) 直角方向載荷(T97-1)



(b) 斜め方向載荷(No.1)

図-6 軸方向鉄筋のひずみ分布

ては、直角方向載荷の場合の荷重、変位がそれぞれ975.9kN、147.3mmであるのに対し、斜め方向載荷の場合は918.7kN、95.5mmであり、荷重で1割程度、変位で3割程度斜め方向載荷の場合が小さい。これは最外縁の鉄筋が早期に降伏するのに加えて、コンクリート強度の差が影響しているものと考えられる。

N点（降伏荷重まで低下した点）については、今回の実験では降伏荷重まで低下する前に鉄筋が破断し終了しているため不明であるが、斜め方向載荷の場合では最大荷重以降の耐力低下が大きく、直角方向載荷の場合に比べて変形性能が小さくなる結果となった。斜め方向載荷の場合においても、軸方向鉄筋の座屈後、破断に至るという直角方向載荷と同様な破壊形態であったが、今回の実験では直角方向載荷に比べて斜め方向載荷の繰り返し回数多いため、軸方向鉄筋が早期に低サイクル疲労破壊し耐力が低下したものと考えられる。

図-5 に変位と履歴吸収エネルギーの関係を示す。これより、履歴吸収エネルギーは、斜め方向載荷の場合についても最大荷重となるまでは直角方向載荷の場合とほとんど変わらないことがわかる。

(2) 軸方向鉄筋のひずみ分布

図-6 (a), (b) に、各載荷ステップにおける最外縁の軸方向鉄筋のひずみ分布を示す。図より、フーチング上面から360mmの位置のひずみを見ると、直角方向載荷では $2\delta_y$ （水平変位=24.3×2=48.6mm）で 2000×10^{-6} 程度であるが、斜め方向載荷で同程度の水平変位の場合（ $3\delta_y=16.5 \times 3=49.5\text{mm}$ ）では 4000×10^{-6} 以上となっている。このことから、斜め方向載荷では、同一の水平変位に対して直角方向載荷よりひずみが大きく、このため最外縁の鉄筋が早期に降伏、破断に至るものと考えられる。また、直角方向載荷と斜め方向載荷のどちらの場合も、フーチング上面から760mmの位置までひずみが大きくなっており、塑性ヒンジ領域は同程度であるものと考えられる。

表-3 曲げ耐力の実験値と計算値の比較

試験体	実験値	計算値		$M_{\text{exp}}/M_{\text{cal1}}$	$M_{\text{exp}}/M_{\text{cal2}}$
	M_{exp} (kN・m)	M_{cal1} (kN・m)	M_{cal2} (kN・m)		
T97-1	2,928	2,499	—	1.17	—
No.1	2,761	2,388	2,064	1.16	1.34

(3) 曲げ耐力

表-3 に、直角方向載荷および斜め方向載荷の場合の曲げ耐力の実験値 M_{exp} と、直角方向載荷として求めた曲げ耐力 M_{cal1} および斜め方向載荷として求めた曲げ耐力 M_{cal2} を示す。ここで、コンクリートの圧縮強度および鉄筋の降伏強度は、表-2 に示す材料試験結果を用いた。斜め方向載荷の場合の実験値と矩形断面の計算値の比は1.16であり、斜め方向載荷の場合の曲げ耐力は、直角方向載荷として計算した曲げ耐力より大きい値を有している。また、 $M_{\text{exp}}/M_{\text{cal2}}$ の値が1.34と計算値が3割程度大きくなっている。これは、直角方向載荷の場合においても計算値が実験値を2割程度過小評価する傾向⁴⁾があるのに加え、斜め方向載荷の曲げ耐力の計算値 M_{cal2} は、角部コンクリートの圧縮ひずみが0.0035に達した場合としているが、実際の曲げ耐力はそれよりも大きく、また、直角方向に比べて圧壊する角部コンクリートの面積が小さいことなどが影響しているものと考えられる。

3.3 せん断耐力に関する考察

せん断破壊型の試験体(No.2)について、既往のせん断耐力算定式⁵⁾によるせん断耐力 V_y との比較検討を行う。

$$V_y = V_c + V_s \quad (1)$$

ここに、 V_c : せん断補強鋼材を用いない棒部材のせん断耐力⁶⁾ (N)

$$V_c = (0.75 + 1.4d/a) \cdot f_{vc} \cdot \beta_d \cdot \beta_p \cdot b_w \cdot d \quad (2)$$

$$f_{vc} = 0.2 \sqrt[3]{f_c} \text{ ただし, } f_{vc} \leq 0.72 \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

$$\beta_d = \sqrt[4]{1/d} \quad (d: \text{m}), \quad \beta_p = \sqrt[3]{100p_v}$$

a : せん断スパン(mm), d : 有効高さ(mm)

b_w : 柱幅 (mm), $p_v = A_s / (b_w \cdot d)$

A_s : 引張側鋼材の断面積 (mm²)

f_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)

V_s : せん断補強鋼材により受持たれるせん断耐力 (N)

$$V_s = A_w f_{wy} (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / s_s \cdot z \quad (3)$$

A_w : 区間 s_s におけるせん断補強鉄筋の総断面積 (mm^2)

f_{wy} : せん断補強鉄筋の降伏強度

α_s : せん断補強鉄筋が部材軸となす角度

s_s : せん断補強鉄筋の配置間隔 (mm)

z : $d/1.15$

表-4 および図-7 に、せん断耐力の実験値 V_{exp} と、計算値および比を示す。なお、せん断耐力の計算は、直角方向載荷の場合と同様とし、引張側鉄筋の断面積 A_s を最外縁の鉄筋として求めた値 V_{cal1} および、中立軸よりも引張側の鉄筋を式(4)⁷⁾で考慮して求めた値 V_{cal2} を示した。

$$A_s = \sum_{i=1}^n A_{si} \frac{d_i}{d} \quad (4)$$

ここに、 A_s : 引張側鉄筋の断面積

d : 有効高さ

d_i : 側方鉄筋の圧縮縁からの距離

A_{si} : d_i の位置にある側方鉄筋の断面積

これより、実験値 V_{exp} は V_{cal1} および V_{cal2} をいずれも上回っている。実験値と計算値の比でみると V_{exp}/V_{cal1} で 1.49、 V_{exp}/V_{cal2} で 1.31 であり、斜め方向載荷の場合のせん断耐力は、直角方向載荷の場合よりも大きい結果となった。

4. まとめ

実物大の矩形 RC 柱の正負交番載荷実験を行い、柱面から斜め45度に載荷（斜め方向載荷）された場合について検討を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 斜め方向載荷の場合、降伏剛性については直角方向載荷の場合と比べて大きな差はなかった。
- (2) 斜め方向載荷の場合の曲げ耐力は、直角方向載荷で計算した曲げ耐力より大きい結果となった。
- (3) 斜め方向載荷の場合のせん断耐力は、直

表-4 せん断耐力の実験値と計算値の比較

試験体	実験値	計算値		V_{exp}/V_{cal1}	V_{exp}/V_{cal2}
	V_{exp} (kN)	V_{cal1} (kN)	V_{cal2} (kN)		
No.2	930.2	626.0	710.2	1.49	1.31

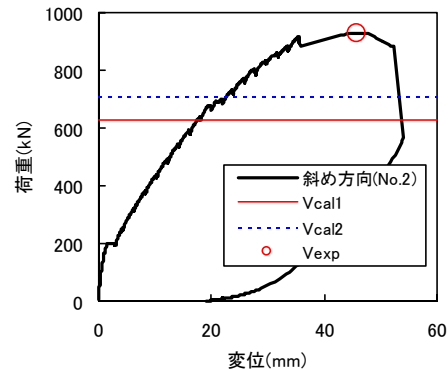


図-7 荷重-変位の関係

角方向載荷として計算したせん断耐力より大きい結果となった。

参考文献

- 1) 滝口克己ほか：鉄筋コンクリート柱の二軸曲げ実験，日本建築学会論文報告集，第229号，1975,3
- 2) 鈴木紀雄ほか：2軸曲げと軸力を受ける鉄筋コンクリート柱の挙動，コンクリート工学年次講演会講演論文集，pp453-456，1982.
- 3) 西田秀明ほか：正方形断面を有するRC柱を斜め載荷した場合の動的耐力・変形特性，第4回地震時保有耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp215-220，2000.12
- 4) 渡邊忠朋ほか：鉄筋コンクリート部材の損傷状況を考慮した変形性能算定手法，土木学会論文集，No.683/V-52，pp31-45，2001.8
- 5) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物），丸善，2004.4
- 6) 二羽淳一郎ほか：せん断補強鉄筋を用いないRC梁のせん断強度式の再評価，土木学会論文集，No.372/V-5，pp167-176，1986.8
- 7) 寺田年夫，斉藤啓一：少数本のくいを用いたフーチングのせん断補強に関する実験的研究，鉄道総研報告，1988.7