構造目地を有する鉄筋コンクリート造腰壁付き骨組の 力学的特性に関する研究

そのⅢ—腰壁付き柱の最大荷重の決定過程と腰壁の反力挙動

A STUDY ON CHARACTERISTIC OF REINFORCED CONCRETE SPANDRELS- BEAMS-COLUMNS TYPED FRAMES WITH THE STRUCTURAL SLITS

Part Ⅲ Reaction behavior of spandrels against column deformation

塩屋 晋一*

Shin-ich SHIOYA

This paper focusses seismic behavior of reinforced concrete columns with a gap, called the "Structural Slits" in this paper. The purpose to provide the Structural Slits is to mitigate the undesirable effects of spandrels on reinforced concrete frames, such as shear failure of columns during an earthquake.

The reaction condition of a spandrel in the maximum lateral load of a column Q_{SLU} caused by the crush of concrete at Structural Slits is cleared up by the analysis of a test results and the finite element analysis.

Keywords : reinforced concrete, structural slit, spandrel column, maximum load, reaction of spandrel, finite element analysis

鉄筋コンクリート, 構造目地, 腰壁付き柱, 最大荷重, 腰壁の反力, 有限要素解析

1. 序

本研究は、鉄筋コンクリート造腰壁付き骨組において柱と腰壁の境界に壁厚を局部的に薄くさせる欠損（構造目地）を設け、地震時にこの壁部分（目地部）を破壊（目地破壊）させることにより、腰壁の悪影響¹⁾を回避することを目標とした設計法に関する一連の研究^{2), 3)}である。

腰壁は柱の両側または片側に設けられ、柱の水平挙動を拘束する。ここでは柱に対し、圧縮抵抗する壁を圧縮側腰壁、引張抵抗する壁を引張側腰壁とする。特に問題になる壁は、圧縮側腰壁である。引張側腰壁は、柱との境界に低い荷重レベルで引張ひび割れが発生し、これ以降、柱をほとんど拘束しない。本章の以下では圧縮側腰壁について論じている。

構造目地を設けて梁降伏形の骨組を形成させるための設計法として、基本的につぎのことを目標にする。

中・上層では、柱を破壊させず梁端を曲げ降伏させることから、目地部は主に梁の曲げモーメントにより破壊され、目地破壊が腰壁下端まで進展した後に梁下端主筋を引張降伏させ曲げ降伏させる。これにより梁の曲げ耐力や柱への入力せん断力などの増加を抑制する。それに

対し最下層では、基礎梁の断面を柱に対して大きくし柱脚を曲げ降伏させることから、目地部は主に柱の変形によって破壊され、目地破壊が腰壁下端まで進展した後に柱脚を曲げ降伏させる。これにより、柱への入力せん断力の増加や短柱化による柱のじん性の劣化などを抑制する。前々報²⁾、前報³⁾では中・上層を対象に構造目地を設けた腰壁付き、骨組の力学的特性や梁の曲げ強度式などについて述べた。本論文では最下層を対象にする。

筆者は最下層を対象にした構造目地を設けた腰壁付き柱の加力実験を行っている⁴⁾。これによる柱の水平荷重・層間水平変形の関係（以後、荷重・変形関係）の特徴を図1に示す。構造目地の設置により、じん性に乏しい柱の曲げ破壊やせん断破壊は回避されるとともに、目地破壊に伴って剛性低下や荷重低下が生じる。最大水平荷重は、目地破壊の進展、または目地破壊の進展後の柱脚の曲げ降伏（降伏機構形成^{註1)}）によって決定される。本研究では、目地破壊の進展に伴って荷重低下が生じうるときの柱のせん断力を目地強度、曲げ降伏機構が形成

注1) 実験では柱頭・柱脚降伏形であるが、梁降伏形の骨組では上梁端と柱脚が曲げ降伏し、機構が形成される。

(▽: 目地強度, ○: 降伏強度, ●: 降伏ヒンジ)

図—1 荷重変形関係の特徴

図—2 腰壁付柱の応力・変形状態と記号

されたときの柱のせん断力を降伏強度とする。目地破壊が腰壁下端近傍まで進展した後に柱脚が曲げ降伏するように柱が設計されていると、最大荷重はこれらの強度のうち大きい強度に等しく、設計の際、それぞれの強度と柱の曲げモーメント分布の評価方法が必要になる。

強度式は、各強度時の腰壁付き柱の応力・変形状態がある程度明らかであれば、誘導される。降伏強度時には、実験の破壊状況から「目地破壊が腰壁下端近傍まで進展しているとともに曲げ降伏機構が形成され、柱の変形角が $1/100 \text{ rad.}$ 程度である⁴⁾」と定義できるが、目地強度時には、柱は破壊せず一定の剛性を有していることもあり、破壊状況のみからは定義できない。

図—2に水平荷重・軸力・モーメントが柱頭に作用するときの腰壁付き柱の曲げモーメント・反力状態を示す。柱脚部分が腰壁と基礎梁に支持されていると考えれば、その支持部で生じる力は反力となる。図中の $\equiv$ は柱に生じる曲げモーメントで、---は柱断面中心線上での各高さ位置に関する外力 (P, N, M_{cr}) によるモーメントである。これらの外力によるモーメントに対し腰壁付き柱は、柱頭から腰壁上端までは柱のみで、腰壁上

端から柱脚までは腰壁と柱でそれぞれ抵抗する。ドットの部分は、腰壁の反力によるモーメントに相当し、腰壁が負担するモーメントを意味する。ここでは、腰壁が各高さ位置で負担するモーメントを腰壁の負担モーメント、その分布を腰壁の負担モーメント分布と定義する。

平石・川島⁵⁾は目地部のひずみ分布形状を一義的に仮定して算出される腰壁の水平反力 H_w が最大となったときを目地耐力時とし、このときの柱の水平荷重とその H_w が等しい、として耐力式を提案している。しかし、そこでは柱の荷重・変形関係が目地耐力が持つ力学的意味や、 H_w と柱の水平荷重の関係、柱の曲げモーメント分布などについては検討がなされていない。

本研究では、目地破壊に伴う荷重低下と腰壁の反力挙動の関係や、目地強度時の腰壁の負担モーメント分布 $M_w(y)$ と腰壁高さ位置の柱の水平変位 δ_{cw} を明らかにし、目地強度式をつぎのように誘導する。

目地強度時の腰壁付き柱の応力・変形状態に関する記号を図—2のものとする、腰壁と接する柱の曲げモーメント分布 $M_c(y)$ は図中の (a) 式で表せる。そして、柱のせん断変形を無視し、柱の曲げ剛性を EI とすると、 δ_{cw} は (b) 式で表せる。 $M_w(y)$ と δ_{cw} が Q の関係式で与えられれば、(a) 式を (b) 式に代入し、 Q について整理すると、目地強度式は誘導される。以下に yh が既知の場合の目地強度略算式を示す。

$$Q = \frac{(A_t \cdot s_{LEB} \cdot ds + \delta_w) EI / h_w^2 + B_t \cdot m}{(C_t + D_t \cdot s_{LEB} \cdot ds \cdot EI / h_w^2 \cdot m) yh + E_t \cdot h_w}$$

ここに、 $A_t \sim E_t$; 目地部の圧縮特性タイプによって決まる定数

s_{LEB}, ds, δ_w, m ; 図—12 参照

本論文では、2章で構造目地を設けた腰壁付き柱の水平加力実験結果⁴⁾を述べ、この結果を基に3章で目地破壊に伴う荷重低下と腰壁の反力挙動の関係について考察をする。4章では、弾・塑性有限要素解析による検討を加え、目地強度時の、腰壁の負担モーメント分布と水平荷重の関係、 δ_{cw} に関する目地部のひずみと水平荷重の関係を示す。なお目地強度と降伏強度の具体的な強度式については、次報 (Part IV) で報告する予定である。

2. 構造目地を有する腰壁付き柱の水平加力実験⁴⁾

実験の計画・結果の詳細については、文献4)に記してあるので、本章では実験概要と次章以降での考察に必要な実験結果について述べる。

2.1 実験概要

図—3に試験体の基本形状と加力装置を、表—1と表—2に試験体の諸元と材料特性を、それぞれ示す。図—3のハッチの部分に矩形目地を設けている。図—4と表—3に試験体に設けた矩形目地の圧縮実験結果を示している。加力については、柱頭と柱脚の回転角 (図—3の

図—3 試験体と加力装置

表—1 試験体一覧と諸元値

No.	試験体 名称	目地部の寸法(cm) ts ⁺ , ts ⁻	w	目地貫通 横筋量	壁高 (cm)	柱
1	CS35-1.5	1.5 2.0	4.5	4-4 ^注	35	断面
2	CS55-1.5	1.5 2.0	4.5	6-4 ^注	55	25x25cm
3	CS35-2.0	2.1 2.1	4.0		35	補強筋
4	CS35-2.5	2.7 2.8	5.0		35	3-D13
5	CS35-3.5	3.7 3.6	7.0	無し	35	Pt=0.61%
6	CS45-2.5	2.6 2.5	5.0		45	8-D13
7	CS55-2.0	2.1 2.1	4.0		55	Pg=1.63%
8	CS55-2.5	2.5 2.5	5.0		55	Pw=0.51%

注) ts⁺ : 正加力時に圧壊する目地部の壁厚
 ts⁻ : 負加力時に圧壊する目地部の壁厚
 目地貫通横筋は、ts⁻側の目地のみに配筋

表—2 使用材料の力学的特性

試験体 番号	cOb (kg/cm ²)	cEs (%)	Ec (kg/cm ²)	Fsp (kg/cm ²)
コンクリート				
No. 1, 2	266	0.253	2.21×10 ⁵	19.8
No. 3~5	239	0.282	2.15×10 ⁵	20.7
No. 6~8	265	0.270	2.21×10 ⁵	24.6
鉄筋	試験体 番号	σy (kg/cm ²)	Ob (kg/cm ²)	Es (kg/cm ²)
4φ	No. 1~8	3680	3820	1.79×10 ⁶
D6	No. 1~8	3630	5490	1.68×10 ⁶
D16	No. 1~8	3670	5240	1.82×10 ⁶
D13	No. 1, 2	3920	5942	1.77×10 ⁶
D13	No. 3~8	3670	5372	1.75×10 ⁶

傾斜計) が等しくなるように上下の水平加力差で制御^{注2)}しながら正負の繰返し水平加力(柱層間変形角 $R = \pm 1/100, \pm 1/50 \text{ rad.}$ の 2 cycle)を行っている。柱主筋ひずみをひずみゲージで、目地部を含む腰壁と柱の間の相対水平変形(区間: 100 mm)を変位計でそれぞれ測定している。

注2) 基礎梁の変形や基礎梁を固定する治具に生ずる変形により柱脚には回転が生じる。実験結果の解析を容易にするために柱脚と柱頭の回転角に一定の規則を与えた。

表—3 目地部の圧縮実験結果

対応する 試験体番号	No. 1, No. 2	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6 No. 8	No. 7	
ts (cm)	1.6	2.3	2.1	2.6	3.6	2.6	2.1
W (cm)	4.5	4.5	4.0	5.0	7.0	5.0	4.0
SL σ_b (kg/cm ²)	261	300	270	244	258	281	299
δ B (mm)	.28	.31	.30	.31	.39	.31	.30
SL σ_b /c σ_b	0.98	1.13	1.13	1.02	1.08	1.06	1.13

図—4 目地部の圧縮特性

2.2 実験結果概要

図—5 に正加力時の柱の荷重・変形関係(包絡線)の例を実線で示す。図中に柱主筋の降伏状況、目地部(圧縮側腰壁)の圧壊進展範囲、ひび割れ状況の例を示す。

No. 2 と No. 3 は目地部が比較的小さい荷重レベルで破壊し柱頭・柱脚の曲げ降伏により最大荷重が決定している。No. 5~No. 8 は目地部の圧壊の進展により最大荷重が決定している。全試験体とも目地部の圧壊が腰壁下端近傍まで進展した後に曲げ降伏機構が形成されていた。腰壁の破壊については、図中の No. 3, No. 8 と同様に全試験体とも、圧縮側腰壁では目地部だけが圧壊し、引張側腰壁では目地部と柱の境界に添って生じた縦ひび割れが発生・拡大していた。以降特記しない限り目地破壊は、目地部の圧壊を意味する。

2.3 目地部の水平ひずみ分布形状

図—6 に目地部の水平方向のひずみ分布形状を目地壁厚 t_s (図—4) が変化する場合と腰壁高さ h_w が変化する場合について示す。この分布は、圧縮側腰壁で変位計により測定された水平変形を基にひずみを算出し、腰壁上端の圧縮ひずみで無次元化している。○△□は目地部が圧壊開始した時点、●▲■は圧壊が約 $0.5 h_w$ の高さ位置まで進展した時点の分布である。

目地強度時の分布は、白塗り(○など)と黒塗り(●など)の中間の分布に相当し、目地強度前後のひずみ分布形状は目地破壊の進展に伴い徐々に緩やかな分布に変化している。

図中の破線の分布は、柱の曲げモーメント分布を図—7 に示す 3 種類に仮定したときの柱の曲げ変形分布である。ただし、柱の曲げ剛性は一定としている。柱の曲げモーメント分布と変形分布形状は、 t_s や h_w が小さくなったり、目地破壊が進展したりすると腰壁の反力が減少するため、(c)→(b)→(a) の状態へ推移することになる。また、 t_s が小さくなったり、目地破壊が進展す

図—5 柱の水平荷重・層間変形関係 (正側包絡線)

図—6 目地部の水平ひずみ分布形状

ると柱の水平変位に対し目地部の水平圧縮変形の占める割合が大きくなる⁴⁾ため、目地部のひずみ分布形状も、柱の変形分布形状とほぼ同様に推移するものと考えられる。この傾向は、図—6において t_s 、 h_w が比較的大きい試験体 (No. 5, No. 8) ほど3次分布に近くなっていることで確認できる。

2.4 腰壁の負担モーメント分布

図—8に最大荷重時の、柱の曲げモーメントと外力によるモーメントをNo. 5, No. 8についてそれぞれ示す。図中の—○—は柱の曲げモーメント、—は外力によるモーメントである。柱の曲げモーメントは付録1の算出方法により、外力によるモーメントは水平荷重 (図—3) との釣合いより、それぞれ求めている。目地部で圧壊が生じた以降で両者を比較すると、付録1による柱頭・腰壁上端位置の柱の曲げモーメントは、外力によるモーメントを約±7%以内の誤差で推定していた。また他の試験体も同程度の誤差で推定されていた。図中のドットの部分が腰壁の負担モーメント分布に相当する。柱脚位置

図—7 柱の曲げモーメントと水平変形分布

図—8 柱の曲げモーメントと外力によるモーメント

の負担モーメントを M_{wb} とし $M_{wb}/h-\delta$ 関係を図—5に—○—で示す。 h は柱長さ (単位長さ) である。 M_{wb} は圧縮側腰壁の反力によるモーメントであるため、目地破壊の進展に伴い最大値に達している。図—9に M_{wb} が最大となる前後の時点 (図—5の▽、▼) の $M_w(y)$ の分布形状を M_{wb} で除して示す。分布形状は、目地破壊の進展に伴って腰壁の反力の合力重心位置が腰壁下端方向に移動するため直線的な形状から曲線的な形状に変化する

図—9 目地強度前後の $M_w(y)/M_{wB}$

傾向が若干みられる。

3. 荷重低下と腰壁の反力挙動

荷重・変形関係では目地破壊の進展に伴い、剛性低下や荷重低下などが生じる。最大荷重の直後を含む荷重低下の発生は、剛性低下の程度に左右される。

この章では、目地破壊の進展に伴う荷重低下と腰壁の反力挙動の関係について考察する。

3.1 剛性低下

水平荷重 P を受ける腰壁付柱の応力・変形は、各荷重ステップの柱の瞬間剛性に基づいて重ね合わせの原理^{付録2}により、図—10 のように3種類の応力・変形成分に分解して考えられる。同図の (c), (d) から明らかに、増加荷重 P_w は腰壁の反力による逆向きの水平変形 δ_{TW} を打ち消すために必要な水平荷重と見なせる。目地破壊の進展に伴い δ_{TW} と P_w はともに減少する。よって、目地破壊の進展に伴う柱の剛性低下は腰壁により拘束される変形が最大になった直後に生じる。また、剛性低下の程度は、これ以降の P_c の増加勾配と P_w の減少勾配の和によって決まる。

3.2 腰壁によって拘束される柱変形

a. 誘導方法

圧縮側腰壁の反力により拘束される柱頭の水平変形 δ_{TW} を以下の仮定に基づき誘導する。

i) 柱にはひび割れ以外の破壊は生じないものとする。

図—10 腰壁付柱の応力・変形および外力の分解

ii) 柱の上下端の支持条件については、柱脚は固定端とし、柱頭は回転のみ完全拘束されているものとする。

iii) 柱の変形については、曲げ変形のみ考慮する。

腰壁の反力による変形を求めることと、ii) の仮定より柱頭では水平反力が生じないことから、柱頭から腰壁上端までの柱部分にはせん断変形は生じない。

iv) 腰壁の負担モーメント分布を (2) 式とする。これは、柱頭の回転拘束が解除された柱に腰壁の反力が作用したときの柱の曲げモーメント分布に相当する。なお、(2) 式の分布形状の妥当性は、次章で示される。

$$M_w(y) = M_{wB} \cdot (1 - y/h_w)^n \quad (2)$$

ここに、

M_{wB} : 柱脚位置の腰壁の負担モーメント

n : モーメント分布形状の次数 ($n > 0$)

y : 柱脚を原点とする。 ($0 \leq y \leq h_w$)

h_w : 腰壁高さ

v) モーメント-曲率関係は付図—2 に示すように区分的に線形関係が成立するものとする。付録2の重ね合わせの原理に基づく、拘束される変形を算出する際の柱の剛性は、図—10(a) の応力状態での柱各部分の瞬間剛性とすればよい。すなわち、ひび割れが生じていない部分 ($-M_c \leq M \leq M_c$) の剛性は EI_1 で、ひび割れが生じる部分 ($M < -M_c$, $M_c < M$) の剛性は EI_2 となる。このことから、水平荷重の増加が少なく曲げひび割れ状況が変化しない間では、柱の瞬間曲げ剛性分布は変化しないことになる。柱の瞬間曲げ剛性は材軸方向により異なるため $EI(y)$ として表す。

b. 最大に拘束される柱変形

柱頭の回転拘束を解除した片持ち柱に (2) 式の曲げモーメントが生じているときの柱頭の水平変形と回転角を δ_T , θ_T , またその柱の柱頭に単位モーメントが作用しているときの柱頭の水平変形と回転角を $\bar{\delta}_T$, $\bar{\theta}_T$ とすると、 δ_{TW} は、柱頭と柱脚の回転角が等しいときの柱の水平変位として、仮想仕事法により (3) 式で表せる。

$$\begin{aligned} \delta_{TW} &= \delta_T - \bar{\delta}_T \times (\theta_T / \bar{\theta}_T) \\ &= M_{wB} \left\{ \int_{h_w}^0 \frac{(1 - y/h_w)^n}{EI(y)} \cdot (h - y) \cdot dy \right. \\ &\quad \left. - \int_h^0 \frac{h - y}{EI(y)} dy \times \frac{\int_{h_w}^0 \frac{(1 - y/h_w)^n}{EI(y)} dy}{\int_h^0 \frac{-1}{EI(y)} dy} \right\} \quad (3) \end{aligned}$$

(3) 式において試験体寸法以外の変数は M_{wB} , $EI(y)$, n で、目地破壊の進展に伴いつぎのように変動する。

M_{wB} は目地破壊の進展に伴って最大に達する (図—5)。 n は単調増加の状態^{註3)}にあるが、 M_{wB} が最大となる前後ではほぼ一定であるとみなせる (図—9)。 $EI(y)$ は、

P_w があまり増加せず柱の水平荷重の増加も小さくなるため、ほぼ一定であると考えられる（誘導仮定 v ）。 M_{wb} が最大となる前後では、(3)式の右辺の $| |$ が一定となるので M_{wb} が最大となるときに δ_{TW} が極大になる。一方、 M_{wb} が最大となった以降では、 M_{wb} が減少傾向であることや、 n が単調増加するとともに $0 \leq (1 - y/h_w) \leq 1$ であるために $(1 - y/h_w)^n$ が減少することなどを考慮すると、 δ_{TW} が極大になる状態は考えにくい。

よって、 M_{wb} が最大になるときに δ_{TW} も最大になる。すなわち、 M_{wb} が最大になるときに腰壁が柱の変形を最大に拘束することになり、これ以降、剛性低下が顕著になる。

3.3 荷重低下と目地強度

荷重低下は、剛性低下の程度が比較的大きい場合に生じ、 M_{wb} が最大になった直後で $\frac{\partial}{\partial \delta}(P_c)$ と $\frac{\partial}{\partial \delta}(P_w)$ の和が負になったときに生じる（図—11）。水平荷重 P を分解する方法として図—10のような分け方もあるが、 P_w を腰壁の反力で表す方法はつぎの2種類ある。

水平荷重と鉛直軸力が作用しているときの柱の反力や腰壁の反力を図—2の記号で表すと、柱脚位置の水平力の釣合いや柱脚に関するモーメントの釣合いにより、 P は以下の式で表される。ただし、(4.2)式では N と δ によるモーメントは無視している。

$$P = H_{CB} + H_w \dots \dots \dots (4.1)$$

$$P = (M_{CT} + M_{CB})/h + M_{wb}/h \dots \dots \dots (4.2)$$

両式において右辺の第一項は P_c を、第二項は P_w を意味する。ここでは、 M_{wb} の挙動と荷重低下の関係を明らかにする必要がある、(4.2)式の分け方が適している。

図—5に $P_c - \delta$ 関係を破線で示す。図中の $-----$ は $P_w - \delta$ 関係に等しい。 M_{CB} 、 M_{CT} は付録1)の算出方法で求め、 δ は実測値としている。

No.3～No.8で、 P_w が最大となった直後に剛性低下が顕著に生じていることが確認できる。

図—11に P_c 、 $P_w - \delta$ 関係の特徴を示す。 $P_c - \delta$ 関係については、柱があまり破壊しない範囲を対象にする場

図—11 P_c 、 $P_w - \delta$ 関係の特徴

注3) 目地部の破壊にともなう、腰壁の反力の合力重心も下端方向に移動する。この時、腰壁の負担モーメント分布は(2)式において n が増加した場合の分布へと変化する。

表—4 各種強度の実験値

試験 体 番 号	実 験 値							
	目地強度		降伏強度(柱脚)				最大水平荷重	
	荷重	変形	引張鉄筋降伏	中間鉄筋降伏	引張鉄筋降伏	中間鉄筋降伏	荷重	変形
	ton	rad. $\times 10^{-3}$	ton	rad. $\times 10^{-3}$	ton	rad. $\times 10^{-3}$	ton	rad. $\times 10^{-3}$
No.1	註1		14.8	8.1	註2		15.9	20.0
1	註1		-15.8	-7.0	註2		-15.9	-7.5
No.2	13.5	2.2	15.4	7.6	註2		15.9	20.0
2	註1		-15.4	-10.0	註2		-15.6	-20.1
No.3	13.5	5.7	14.1	8.8	14.3	12.3	14.3	9.5
3	註1		-12.9	-8.4	註3		-12.9	-6.9
No.4	14.6	7.8	14.5	9.3	13.3	13.0	14.6	7.8
4	註1		-15.3	-9.0	註3		-15.3	-9.5
No.5	16.2	9.3	15.0	13.3	14.1	20.0	16.2	9.3
5	15.5	-9.5	-15.6	-10.7	-13.6	-11.3	-15.5	-9.5
No.6	15.2	6.4	14.5	9.7	13.7	15.4	15.2	6.4
6	15.4	-5.8	-15.0	-8.8	助トナリにより中		-15.4	-5.8
No.7	13.7	3.4	13.7	8.3	13.1	13.8	13.7	3.4
7	15.1	-4.8	-14.0	-10.0	註3		-15.1	-4.8
No.8	15.7	4.3	15.2	9.1	13.5	13.0	15.7	4.3
8	15.2	-3.9	-15.4	-8.3	註3		-15.2	-3.9

注1；柱中間筋の歪を測定していなかったため M_{wb} を精度よく評価できなかった。注2；柱中間筋の歪を測定しなかった。注3；+2サイクルの残留歪みが大きかった。
；目地部の破壊に伴って決定した最大荷重

合、 P_c は δ の増加に伴ってほぼ単調増加するものと考えられる。 $P_w - \delta$ 関係については、 P_w は、A点(P_w の最大点)直後では徐々に減少し、B点以降、減少勾配がほぼ一定の状態に減少する。よって、目地破壊の進展に伴う荷重低下は、B点までに生じなければ、以後、生じないことになる。そこで、目地破壊に伴って荷重低下が生じる可能性があるときの柱の水平せん断力を目地強度 Q_{SLU} とする。目地強度時は、B点のときとほぼ一致することになる。目地強度時の腰壁の反力状態は、柱脚位置の腰壁の負担モーメント M_{wb} が最大となった直後でその減少勾配がほぼ一定となったときの状態である。

図—5においてNo.5～No.8の最大荷重は M_{wb}/h の減少勾配がほぼ一定となる時点で生じており、B点と一致している。No.2については M_{wb} が不明であるが、初期に発生している荷重低下時に目地破壊が急激に進展していることから、目地強度時に荷重低下が生じたものと判断できる。No.3については目地強度時に荷重低下が生じなかったものとして説明できる。本章の定義による目地強度の実験値を表—4に示している。柱頭・柱脚の曲げ降伏以外の破壊が柱に生じなければ、最大荷重は目地強度と降伏強度のうち大きい強度に等しいことが確認できる。

4. 腰壁の終局モーメント分布と目地部の終局ひずみ比

目地強度時の圧縮側腰壁の負担モーメント分布を腰壁の終局モーメント分布とする。この分布を m ($= s_{L\sigma B}$ ・

$c = s_L \sigma_B \cdot t_s \cdot h_w$, $m = s_L \sigma_B \cdot t_s \cdot h_w^2 (= 2 \cdot c \cdot h_w/2)$
 δ_{CW} ; (b)のA点の柱水平変位, δ_w ; (b)のC点の水平変位
 δ_{SL} ; (b)のB-C点間の水平圧縮変形
 d_s ; 壁の水平方向の破壊区間、目地部のみが破壊する場合は(c)の d_1 で、壁に破壊が広がる場合は d_2 とする。
 $s_L \varepsilon_B$; (c)の最大圧縮強度時の圧縮変形 δ_B を d_s で除した破壊歪

図—12 4章で用いる記号

$t_s \cdot h_w^2$ で除した分布を $m_{SLU}(y)$ とし、柱脚位置の値を m_{SLU} とする。本章では、目地強度時までは柱の破壊による急激な剛性低下は生じないものとし、また目地部の圧縮特性も一種類として論を展開する。図—12に本章で用いる記号を示す。

4.1 $m_{WB}-\xi_{SL}$ 関係と目地強度

前章では $M_{WB}-\delta$ (柱頭の水平変位) 関係で目地強度を定義したが、 δ が柱頭から腰壁上端までの区間(開口区間)で生ずる柱変形と、腰壁上端から柱脚までの区間で生ずる柱変形からなるため、 δ の変化傾向は、開口区間の柱の長さや応力状態によって異なる。本章では、腰壁上端位置の柱の水平変形と密接に関係する圧縮側腰壁の目地部水平変形 δ_{SL} で、目地強度時を判断することにする。図—13に実験による $m_{WB}-\xi_{SL}$ 関係を示す。これは $M_{WB}-\delta_{SL}$ 関係を無次元量で表している。同関係で判断される目地強度時と最大荷重時は一致している。

4.2 終局モーメント分布のパラメータ

$m_{SLU}(y)$ は、目地部のひずみ分布が既知であると、目地部の圧縮特性を仮定することにより算出できる。2.3節で述べたように目地強度前後の目地部のひずみ分布形状は徐々に変化し、ほぼ一定の形状であると見なせる。すると、 $m_{SLU}(y)$ は目地部のひずみ分布形状と圧縮特性から算出される結果で推定できる。ここでは、目

図—13 $m_{WB}-\xi_{SL}$ 関係と最大荷重時

地部の圧縮特性を一種類としているため、 $m_{SLU}(y)$ は主に目地部のひずみ分布形状の影響を受ける。このひずみ分布形状は、柱の変位と目地部で生じる変形の関係(2.3節)から、腰壁と接する柱の境界の柱変位分布形状と密接に関係する。

柱の変位は、柱の曲げモーメント分布が既知であると、柱断面の剛性を仮定することにより算出できる。ここでは、柱は破壊しない範囲を対象にしているため、柱の変位分布形状は主に柱の曲げモーメント分布形状に影響を受けることになる(2.3節)。図—9に示したように $m_{SLU}(y)$ の分布形状は目地強度前後ではほぼ一定の形状であるから、目地強度時の柱の変位分布形状は、モーメント分布形状を表す h_w/yh , $Q_{SLU} \cdot yh/m_{SLU} \cdot m$ に主に影響を受けることになる。よって、 $m_{SLU}(y)$ は(5.1)式のように関数記号で表せる。この右辺の m_{SLU} は $m_{SLU}(y)$ に関係する項であるから、(5.1)式は(5.2)式のように表せる。すなわち、 $m_{SLU}(y)$ に影響を与える主なパラメータは h_w/yh , $Q_{SLU} \cdot yh/m$ となる。

$$m_{SLU}(y) = F(h_w/yh, Q_{SLU} \cdot yh/m_{SLU} \cdot m) \quad (5.1)$$

$$m_{SLU}(y) = G(h_w/yh, Q_{SLU} \cdot yh/m) \dots \dots \dots (5.2)$$

4.3 目地部の終局ひずみ比とパラメータ

腰壁の破壊は、実験では目地部に限定されていたが、目地の形状・寸法によっては目地部以外の壁部分にも広がる(図—12(b), (c))。この破壊する範囲の壁部分も目地部に含めて、破壊する目地部と破壊しない壁部分(弾性の壁)に腰壁を分けると、柱の水平変位 δ_{CW} は腰壁上端位置の、 δ_{SL} と壁の弾性水平変位 δ_w の和で推定できる。

目地強度時の ξ_{SL} を ξ_{SLU} とすると、このときの δ_{SL} は $\xi_{SLU} \cdot s_L \varepsilon_B \cdot d_s$ で表せる。本論では、 ξ_{SLU} を目地部の終局ひずみ比とする。 ξ_{SLU} は(5.1)式の $m_{SLU}(y)$ と同様に、 h_w/yh , $Q_{SLU} \cdot yh/m_{SLU} \cdot m$ の影響を受けることになるが、 $m_{SLU}(y)$ が(5.2)式で表されるので h_w/yh , $Q_{SLU} \cdot yh/m$ が主なパラメータとなる。

4.4 有限要素法解析

a. 解析目的

$m_{SLU}(y)$ または ξ_{SLU} と h_w/yh , $Q_{SLU} \cdot yh/m$ の関係を明らかにする。

b. 解析仮定

解析には弾・塑性有限要素法解析プログラムを使用する。プログラムの検証と諸仮定については文献6)で述べてあるので、以下には仮定の特徴を記す。

解析は平面応力問題とした。コンクリートの要素は8節点アイソパラメトリック平面要素で要素内積分点を9点とし、コンクリートのひび割れは要素全体に分散させる方法でモデル化した。鉄筋要素は線材要素とし、柱の主筋と帯筋のみを試験体の鉄筋量に合わせて解析モデルに配置した。コンクリートと鉄筋の相互作用については、

図-14 仮定した材料特性

図-15 解析モデルと要素分割

ひび割れ発生以降のコンクリートの引張剛性効果のみで考慮した。

図-14 に実験値を参考にして仮定した材料特性を示す。目地強度時までに柱には、ひび割れ以外の破壊は生じないことを前提にしていることから、柱の主筋と帯筋は降伏しないものとした。

c. 解析モデルと加力

図-15 に解析モデルと要素分割の一例を示す。解析モデルについては、柱と基礎梁および圧縮側腰壁からなる形状とした。柱と基礎梁の断面および壁厚の寸法は試験体と同じ値とし、目地部の幅(d_s に等しい)は壁厚(t_w)の2/3とした。柱の反曲点位置については、目地部のひ

表-5 解析モデルの種類と寸法

h_w/yh	1, 0.5, 0						
$h_w(\text{cm})$	25	35	45	55	65	75	85
$t_s(\text{cm})$	3.5	1.5 2.0 2.5 3.0 3.5	1.5 2.5 3.5	2.6 3.5	3.5	3.5 4.5	3.5 4.5

ずみ分布形状と同様に目地強度前後ではあまり変化しないものと考えて、一定とした。

解析については、 h_w と t_s の寸法を表-5のようにし、それぞれの組み合わせに対し h_w/yh を1, 0.5, 0の3種類とし、51 case 行った。

加力については、柱軸力を一定($N=25 \text{ ton}$)とし、目地破壊に伴い荷重低下が生じる場合があるので、水平力の制御は反曲点の水平変位を増分させる方法(変位増分法)によって行った。なお、 $h_w/yh=0$ の加力は柱頭にモーメントを加えた。

4.5 解析結果

a. m_{wb} , H_w/c , P/c , $Mt/m-\xi_{SL}$ 関係

図-16 に解析による m_{wb} , H_w/c , P/c , $Mt/m-\xi_{SL}$ の関係を2シリーズについて示す。シリーズIでは $h_w/yh=1, 0.5, 0$ の結果を、シリーズIIでは $h_w/yh=1$ の結果をそれぞれ示している。図中の○は目地強度時で、この m_{SLU} は m_{wb} の最大値に対し3~5%小さくなる程度であった。

目地破壊によって最大荷重が決定したシリーズI-aでは、目地強度時と最大荷重時が一致している。

目地強度は、 h_w/yh の減少に伴って小さくなり、 $h_w/yh=0$ では零となる。すなわち、目地強度は腰壁上端位置の柱の作用せん断力と作用モーメントの割合によって変化し、特にモーメントだけが作用する場合でも目地破壊が進展し、目地強度に達することになる。

腰壁の水平反力(H_w/c)の最大値とそのときの水平荷重(P/c)の値を比較すると、両者にはかなり差が生じる場合が多く、序で述べた平石らの仮定と異なっている。

b. $m_{SLU}(y)-h_w/yh$, $Q_{SLU} \cdot yh/m$ の関係式

図-17 に解析による $m_{SLU}-h_w/yh$, $Q_{SLU} \cdot yh/m$ の関係を示す。解析結果は、縦軸の値を m_{SLU} 、横軸の値を $Q_{SLU} \cdot yh/m$ とし、 h_w/yh の種類ごとに白塗の記号で示している。解析では h_w , yh , t_s の絶対値を変化させているにもかかわらず、 m_{SLU} は h_w/yh の種類ごとに、 $Q_{SLU} \cdot yh/m$ に伴って連続的に変化しており、 h_w/yh と $Q_{SLU} \cdot yh/m$ を m_{SLU} の

図-16 解析による m_{wb} , H_w/c , P/c , $Ht/m-\xi_{SL}$

図-17 m_{SLU} - h_w/yh , $Q_{SLU} \cdot yh/m$ 関係

主パラメータとしてよいことが確認できる。

m_{SLU} は $Q_{SLU} \cdot yh/m = 1 \sim 1.5$ より大きい範囲では h_w/yh の種類ごとに一定値に収束する傾向を示している。この傾向は、 $Q_{SLU} \cdot yh/m$ が大きくなると、柱の曲げモーメントに対する腰壁の終局モーメントの割合も小さくなり、目地部のひずみ分布形状に関係する柱のモーメント分布形状が、 $Q_{SLU} \cdot yh/m$ の影響を受けにくくなるためと考えられる。図中の実線は解析値について求めた近似式（図中の（6）式）によるもので、 $Q_{SLU} \cdot yh/m \geq 1.2$ で $Q_{SLU} \cdot yh/m$ に影響を受けないものとして一定としている。●は実験値で、表-6 に実験値と（6）式による計算値を比較して示す。両者はよい対応を示している。

図-18 に解析による代表的な終局モーメント分布の形状を破線で、実験結果を白塗の記号でそれぞれ示す。解析の分布は図-17 中の A, B, C の分布の形状で、 h_w/yh と $Q_{SLU} \cdot yh/m$ の値によって若干異なるが、実験

表-6 m_{SLU} , ξ_{SLU} の実験値と計算値

試験体番号	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8
$Q_{SLU} \cdot yh/m$	0.99	0.90	0.78	0.62	0.44	0.49
h_w/yh	0.63	0.58	0.56	0.75	0.90	0.83
m_{SLU} 実験	0.51	0.50	0.43	0.37	0.32	0.35
m_{SLU} (6)式	0.50	0.47	0.44	0.41	0.36	0.37
ξ_{SLU} 実験	4.0	4.0	4.3	4.5	4.0	5.1
ξ_{SLU} (8)式	3.9	4.1	4.4	4.5	4.6	4.6

図-18 $m_{SLU}(y)$ の分布形状 図-19 ξ_{SLU} - h_w/yh , $Q_{SLU} \cdot yh/m$ 関係

の分布について求めた図中の近似式（実線）に近づいている。よって、 $m_{SLU}(y)$ はつぎのように表される。

$$m_{SLU}(y) = m_{SLU} \left(1 - \frac{y}{h_w}\right)^{1.3} \quad \dots\dots\dots (7)$$

ここに、

$$m_{SLU} = \left(0.43 + 0.12 \frac{h_w}{yh}\right) \sqrt{\frac{Q_{SLU} \cdot yh}{\xi_{SLU} \cdot t_s \cdot h_w^2}}$$

c. ξ_{SLU} - h_w/yh , $Q_{SLU} \cdot yh/m$ の関係式

図-19 に解析による ξ_{SLU} - h_w/yh , $Q_{SLU} \cdot yh/m$ の関係を示す。縦軸の値を ξ_{SLU} とし図-17 と同様に示している。図中の実線は $Q_{SLU} \cdot yh/m \leq 1.2$ で解析値について求めた近似式（図中の式）によるもので、 $Q_{SLU} \cdot yh/m \geq 1.2$ では一定としている。●は実験値で、表-6 に実験値と計算値を比較して示す。両者はよい対応を示している。以下に ξ_{SLU} の式を示す。

$$\xi_{SLU} = \left(1.7 \frac{h_w}{yh} - 2.9\right) \frac{Q_{SLU} \cdot yh}{\xi_{SLU} \cdot t_s \cdot h_w^2} - 2 \frac{h_w}{yh} + 7 \quad \dots\dots\dots (8)$$

5. まとめ

構造目地を有する腰壁付き柱が水平荷重を受ける場合の、目地破壊に起因する最大荷重の決定過程と腰壁の反力挙動について検討した。その結果を以下にまとめる。

- (1) 腰壁が柱脚位置で負担するモーメント M_{WB} —腰壁上端位置の目地部の水平変形 δ_{SL} の関係において、 M_{WB} が最大点を過ぎその減少勾配がほぼ一定となったときに、柱の荷重-変形関係で目地破壊に伴う荷重低下が生じうる。このときの柱の水平せん断力を目地強度と定義した。
- (2) 柱の最大水平荷重は、目地強度と降伏強度のうち大きい強度に等しいことを確認した。
- (3) 目地強度時の、腰壁の終局モーメント分布または目地部の終局ひずみ比と柱の水平荷重の関係を、それぞれ（7）式、（8）式で示した。

謝 辞

本論文をまとめる際に、九州芸術工科大学・大久保全陸教授に懇切丁寧なご助言を頂きました。また、同大学学部生・鈴木就生君、浦本洋一郎君には図面作成を協力して頂きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会：1968年十勝沖地震災害調査報告など
- 2) 大久保全陸，塩屋晋一：構造目地を有する鉄筋コンクリート造腰壁付き骨組の力学的特性に関する研究・そのⅠ-腰壁付き梁・柱十字形骨組の加力実験について，日本建築学会構造系論文報告集，No. 380，pp. 10～21，昭和62年10月
- 3) 塩屋晋一：構造目地を有する鉄筋コンクリート造腰壁付き骨組の力学的特性に関する研究・そのⅡ-腰壁付き梁の力学的特性と曲げ強度評価式，日本建築学会構造系論文報告集，No. 416，pp. 91～104，1990年10月
- 4) 塩屋晋一，藤村雅彦ほか：構造目地を有する腰壁付き柱の力学的特性に関する実験的研究（その1，2，3），日本建築学会九州支部研究報告集，pp. 293～304，1991年3月
- 5) 平石久廣，川島俊一，佐藤彰芳：鉄筋コンクリート造腰壁付き柱に設けたスリットの効果に関する研究，日本建築学会構造系論文報告集，No. 326，pp. 83～92，昭和61年4月
- 6) 大久保全陸，瀧瀬 潤：曲げ降伏後の梁伸び現象が梁降伏形 R/C 骨組の変形挙動に及ぼす影響，日本建築学会九州支部研究報告集，pp. 265～268，1992年3月

付録1 柱の曲げモーメントの算出方法

付図-1にモーメントを受ける柱断面の応力状態とひずみ分布および記号を示す。鉄筋の引張力 T_s ， T'_s ，圧縮力 C_s については，測定される柱主筋のひずみと鉄筋の応力・ひずみ関係から算出する。コンクリートの圧縮応力の重心位置 G_c については，鉄筋のひずみで直線補間される曲げ圧縮域のひずみ分布とコンクリートの応力・ひずみ関係から算出する。そして，腰壁と接する範囲の柱の断面軸力については，壁の影響を無視し，作用軸力 N とする。曲げモーメントは， G_c に関するこれら断面内力のモーメントの和として算出する。応力・ひずみ関係については，材料試験結果を基に，鉄筋をバイリニア型，コンクリートを梅村博士の e 関数と仮定する。コンクリートの引張応力については無視する。

付録2 瞬間剛性に基づく重ね合わせの原理

一般に柱の曲げモーメント-曲率関係 ($M-\phi$) やせん断力-せん断ひずみの関係は，折れ線で近似され，非弾性範囲でも区

付図-1 柱断面の応力とひずみおよび記号

付図-2 柱の応力・変形の分解

分的に線形関係が仮定される。弾性範囲で用いられる線形関係に基づく重ね合わせの原理は，非弾性範囲で付図-2のように修正適用できる。すなわち， M_0 が作用しているときの柱の応力・変形は，任意に分解される作用力による応力・変形のうち，ある作用力による応力・変形を $M-\phi$ 関係で M_0 が対応する区分の $M-\phi$ 関係式 ((9) 式) により，その他の作用力による応力・変形をその区分の瞬間剛性 ($E I_2$) によりそれぞれ求め，これらの応力・変形を加算したものに等しいことになる。本文中の図-10の場合， δ は実際に生じる変形， δ_{TW} は生じない変形なので，付図-2において $M_0 = \bar{M}_1$ ， $\bar{M}_2 = -\bar{M}_3$ とし $\bar{M}_1$ による変形を (9) 式で求めると $\phi_0 = \phi_1$ となるのと同様に，図-10の (c) (d) の柱の各高さ位置の剛性は，同図 (a) の柱の各高さ位置の瞬間剛性と考えればよい。

(1992年3月10日原稿受理，1992年8月4日採用決定)