

[104] 鉄筋コンクリート造有開口連層耐震壁の強度と剛性

正会員 ○中 西 三 和 (日本大学理工学部)
 正会員 安 達 洋 (日本大学理工学部)
 正会員 白 井 伸 明 (日本大学理工学部)

1. まえがき

開口を有する鉄筋コンクリート造連層耐震壁(以後、開口壁)に対する従来の研究は、弾性範囲内における開口による負担せん断力の低減率を求める事に主眼が置かれており、破壊に至るまでの開口壁の力学的挙動に関しては未知に等しい。本研究は、同形状・同配筋のもとで開口寸法、開口形状、開口位置を変動した7体の開口壁の破壊実験結果から、連層耐震壁の弾塑性域にわたる強度・剛性に及ぼす開口の影響を検討するものである。

2. 試験体及び実験概要

実験を行った試験体は、3層1スパンの純フレーム及び7体の開口壁である。
 各試験体の開口を除く形状・寸法はすべて共通であり、無開口壁として先に行った76W201を標準試験体としたものである。図1に試験体の共通する形状寸法を、また表1に各試験体の記号並びに開口部の詳細を一覧表として示した。各試験体の主な構造因子は次の通りである。階高(h)×スパン(L) = 600 cm × 1200 cm, 柱・梁断面寸法(Bc,g × Dc,g) = 150 cm × 150 cm, 壁厚(t) = 45 cm (t/Bc = 0.3), 柱主筋量Pg = 2.53% (8-D10), 壁補強筋量Ps = 0.24% (4φ-@120)。

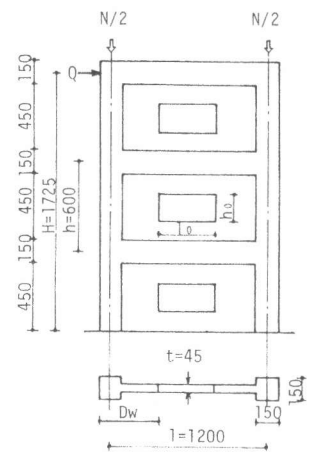


図1 各試験体形状寸法

尚、変動した開口の種類から試験体は次の三つのシリーズに分けられる。

i) 開口寸法(周比)を変動させたシリーズ

開口が壁中央に位置し、その開口寸法(ho × lo)がスパン、階高のそれぞれ1/5 (80WK02: 開口周比 $\xi = \sqrt{h_o l_o} / h l = 0.2$), 1/3 (80WK03: $\xi = 0.33$), 1/2 (80WK05: $\xi = 0.5$) 及び純フレーム(80WK10)の4体の試験体。

ii) 開口幅比を変動させたシリーズ

開口周比($\xi = 0.33$)を一定とし、開口幅比(lo/l)を80WK02と80WK05に同じ、1/5及び1/2とした2体(80WK032, 80WK035)の試験体。

iii) 開口位置を変動させたシリーズ

前シリーズのうち、80WK03, 80WK032における開口を側部中央に偏心させた2体(81WH03, 81WH032)の試験体。

各試験体の開口補強の計算は建築学会鉄筋コンクリート構造計算規準(以後、建築学会規準)に準拠し、設計用せん断力としては同規準における許容せん断力(Q1 = r · t · l · fs)を用いた。

実験は、試験体柱頭部に一定の軸力(N = 13.5 ton)を付加したまま、試験体頂部に正負交番の水平力を加える片持梁形式の加力方法によった。表2には、使用した鉄筋とコンクリートの材料試験結果を示す。

3. 実験結果

標準とした無開口壁76W201を含めた各試験体の破壊状況及び各

表1 試験体開口部分詳細

試験体	he × le (cm × cm)	開口 位置	開口 周比	開口補強筋		
				縦	横	斜め
80WK02	12.0×24.0	中央	0.20	1-6*	1-6*	1-6*
80WK03	20.0×40.0	中央	0.33	1-9*	1-6*	1-6*
80WK032	33.3×24.0	中央	0.33	1-6*	1-9*	1-6*
80WK035	13.3×60.0	中央	0.33	1-6*	1-9*	1-6*
80WK05	30.0×60.0	中央	0.50	1-6*	1-9*	1-6*
81WH03	20.0×40.0	側部	0.33	1-6*	1-9*	1-6*
81WH032	33.3×24.0	側部	0.33	1-6*	1-9*	1-6*

共通事項 柱: 筋筋 4φ-a60, 筋筋比 0.28%
 柱: 筋筋 4φ-a60, 筋筋比 0.20%

表2 材料試験結果

試験体	鉄筋				コンクリート	
	降伏強度				圧縮 強度	弾性係数 ×10 ⁴
4φ	6φ	9φ	D10			
76W201	4830	---	---	3214	312	2.45
80WK02	2865	3683	3141	3521	280	2.18
80WK03	1987	2802	3344	3486	244	2.32
80WK032	1987	2802	3344	3486	211	1.85
80WK035	1987	2802	3344	3486	206	2.13
80WK05	2865	3683	3141	3521	249	2.08
81WH03	2473	5889	3608	3803	261	2.50
81WH032	2473	5889	3608	3803	240	2.59
81WK10	2473	5889	3608	3803	176	1.59

単位 (Kg/cm²)

リーズの荷重-水平変位曲線の正側包絡線を図2, 図3に示した。これら実験結果の破壊形式, 強度, 変形性能を整理すると概ね以下のように分類できる。

- i) 壁全体が片持梁的に挙動し, 柱脚主筋の曲げ降伏(YC)のうち, そで壁及び圧縮側脚部の圧壊(CW2)により耐力を失うもので, 76W201の挙動に近似し, 変形性能も良好(80WK02)
- ii) 開口隅角部の圧壊(CW1), そで壁の圧壊(CW2)のうち柱のせん断破壊(SC)により急激な耐力低下を起こす。(80WK03)
- iii) 開口縁梁主筋の降伏(YG)あるいは梁のせん断破壊(SG)が顕著で, 繰り返し加力により開口隅角部の圧壊が徐々にそで壁全体に進展し終局に至る。梁のせん断破壊が顕著な試験体では, その時点で最大耐力となりある程度の耐力低下を起こすが, 以後の変形能力が比較的良好であり, そで壁付柱と梁により構成される骨組的な挙動を示す。(80WK05, 80WK032, 80WK035, 81WH03及び81WH032の負側加力)

IV) 開口が偏在する試験体で, そで壁が圧縮となる方向の加力を受ける場合, 引張側柱脚主筋の降伏がみられるものの, 開口縁におけるそで壁の圧壊が比較の変形の小さいうちに起こり耐力低下するもので, i)と類似した破壊過程ではあるが変形能力の点でおちる。(81WH03及び81WH032の正側加力)

以上, 分類した破壊形式と図3の包絡線から, 開口が最大耐力, 変形性能に及ぼす影響を考えた場合, 次の様な傾向がみられる。

- 1) 開口周比(ξ)を小から大へ変化させた場合, 耐力は低下するが, $\xi=0.5$ に至っては骨組の挙動を示し最大耐力以後の変形性能は向上する。
- 2) 同じ開口周比の試験体でも, その形状により耐力は異なる。
- 3) 開口が偏在する場合, 加力計画により耐力, 破壊形式に差異がみられる。
- 4) 破壊の順序により, その変形性能は変化する。

4. 開口壁の強度と剛性

一般的に連層の開口壁が外力を受けた場合, その変形量(δ)は図4に示されるように, 部材の上下方向への変形を含む片持梁としての曲げ変形(δ_B)と, せん断力によるフレーム変形(δ_F)の和として考えられる。前章に述べた実験においても, δ_B と δ_F の変形成分の分離を試みている。また, いずれの挙動が支配的であるかが, その開口壁の強度・変形性能に大きな影響を与える事が実験結果からも明らかとなった。本章では, この考えに基づき開口壁の強度と剛性に対し一休壁として扱う場合(CASE1), 骨組として扱う場合(CASE2)の二つの方法により検討し, 前章の実験結果と比較するものである。

4-1 ひび割れ強度

柱脚に生ずる曲げひび割れ強度及びそで壁に生ずるせん断ひ

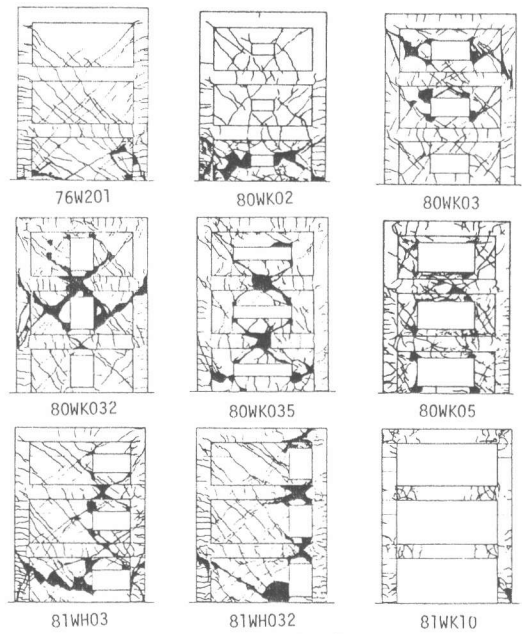


図2 最終破壊状況

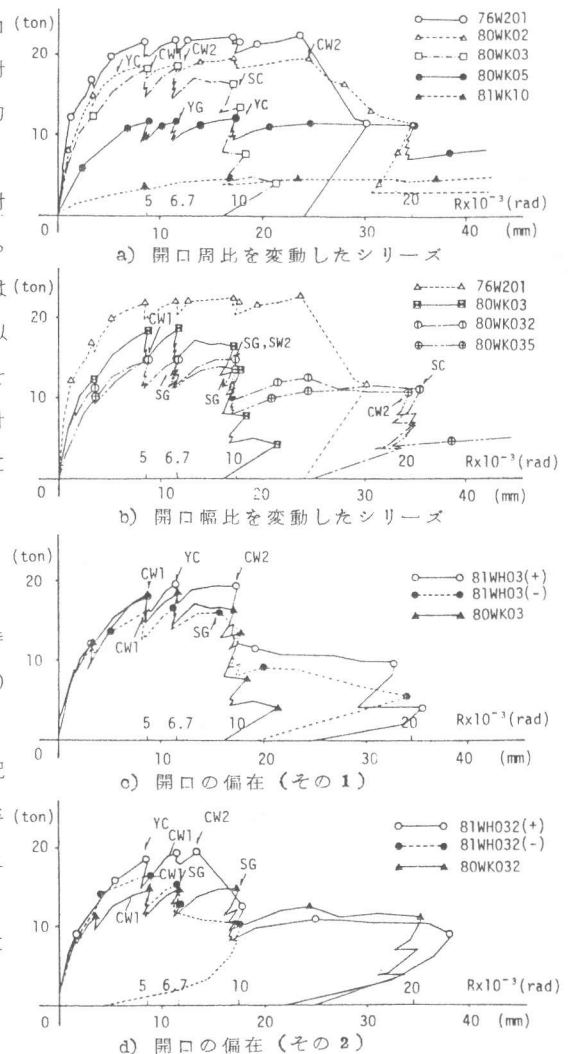


図3 荷重-水平変位曲線の正側包絡線

び割れ強度を以下の諸式により検討した。

i) 曲げひび割れ強度 (Q_{BC})

$$\text{CASE 1: } cQ_{BC1} = (1.8\sqrt{F_c} \cdot Z_e + N \cdot Z_e / A_c) / H \quad (1)$$

ただし, Z_e, A_c: 開口部を除く実断面に対する断面係数及び断面積

CASE 2: cQ_{BC2}: 曲げ変形, せん断変形を考慮した剛域ラーメンによる解法。
剛域長さは, 開口縁より材せい (d) の 0.25 d 入った位置として計算

ii) せん断ひび割れ強度 (Q_{SC})

$$cQ_{SC1} = r \cdot t \cdot L \cdot f_s \quad (\text{建築学会規準式}) \quad (2)$$

表 3 にひび割れ発生強度実験値と計算値を比較示した。曲げひび割れ強度はいずれの式に対しても実験値は小さめな値を与えている。また, せん断ひび割れ発生時の開口を除く実断面に対する平均せん断応力度 (τ_{SC}) はコンクリート強度 (F_c) に対し 0.03 F_c ~ 0.1 F_c の範囲にあり, 建築学会規準の短期許容せん断応力度 (f_s) 以下のものが含まれる。

4-2 終局強度

CASE 1 (以後, 特記なき変数名は参考文献参照)

i) 曲げ終局強度 (Q_{mu})

$$cQ_{mu1} = \{ 0.9 a_t \sigma_y D + 0.4 a_s \sigma_{sy} D + 0.5 N D (1 - \frac{N}{bDF_c}) \} / H \quad (3)$$

a_s: 開口部を除く壁縦筋断面積

ii) せん断終局強度 (Q_{su})

$$cQ_{su1} = r \{ 0.0679 P_{te}^{0.23} (F_c + 180) / \sqrt{M/QD} + 0.12 + 2.7 \sqrt{P_s \cdot \sigma_{sy} + 0.1 \sigma_o} \} b c \cdot j \quad (4)$$

r = 1 - ξ (建築学会規準, 開口周比による強度低減率)

図 5 に, 無開口壁の耐力 (Q₀) と純フレームの耐力 (Q_F) より, 各試験体の開口による低減率を次式で求め開口周比との関係を示した。

$$\gamma = (Q - Q_F) / (Q_0 - Q_F) \quad (5)$$

(5)式より求まる実験値強度低減率は規準式における r に比較的適合している。

CASE 2

i) 崩壊機構を仮定した仮想仕事法による終局強度の計算 (cQ_{mu2}, cQ_{mu3})

図 6 に仮定した 2 種類の崩壊機構を示した。機構 1 は材軸を柱梁中心線とし, 柱脚の曲げ終局モーメントの計算には梁のせん断力による軸力の影響を考慮した場合であり, 機構 2 は材軸を各々のそで壁柱の圧縮縁より 0.2 Dw の位置とし, 軸力による仕事を外部仕事として考慮する。この場合, そで壁柱の曲げ終局モーメントは N = 0 として計算する。解析上の他の共通した仮定としては, 1) 降伏ヒンジは柱・梁とも開口縁とする。2) 梁の終局モーメントはそで壁付柱に対する既往の曲げ終局強度式と後述する矩形断面に対する荒川 min 式を修正したせん断終局強度のうち小さい値により決定した。

ii) せん断終局強度

荒川 min 式を修正した次式によりそで壁付柱のせん断耐力を求め, その 2 枚の耐力を骨組のせん断終局強度とする。

$$cQ_{su2} = \{ 0.053 P_t^{0.23} (180 + F_c) / (M/QDw + 0.12) + 2.7 \sqrt{P_w \cdot \sigma_{wy} + 0.1 \sigma_o} \} b c \cdot j \quad (6)$$

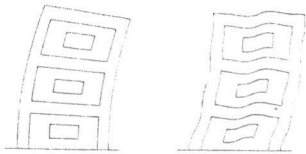


図 4 有開口耐震壁の変形
A: 曲げ変形 B: フレーム変形

表 3 ひび割れ発生強度実験値及び計算値

試験体	曲げひび割れ荷重			せん断ひび割れ荷重	
	TQBC	cQBC1	cQBC2	TQSC	cQSC
80WK02	3.0	9.8 (0.31)	6.0 (0.50)	7.5	6.1 (1.23)
80WK03	6.0	8.5 (0.71)	4.9 (1.22)	3.0	4.4 (0.75)
80WK032	4.0	8.4 (0.48)	4.9 (0.82)	5.0	3.8 (1.58)
80WK035	1.0	8.1 (0.12)	4.5 (0.22)	2.0	3.8 (0.53)
80WK05	1.0	10.00 (0.10)	3.4 (0.29)	6.9	3.1 (2.23)
81WH03	+	8.5 (0.35)	5.1 (0.59)	3.0	4.1 (0.73)
	-	6.7 (0.15)	4.8 (0.13)	6.0	1.46
81WH032	+	8.0 (1.11)	5.4 (1.48)	7.0	4.0 (1.75)
	-	6.6 (0.91)	5.6 (1.07)	8.7	2.18

単位 (ton)

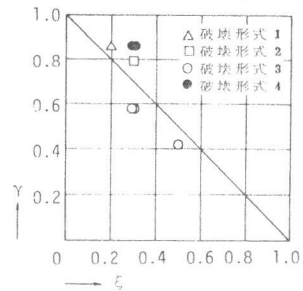


図 5 開口による強度低減率と開口周比の比較

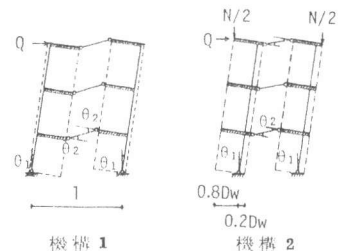


図 6 崩壊機構

表 4 最大耐力時計算値と実験値の比較

試験体	実験値	CASE 1			CASE 2		破壊過程
		TQ _u	(3)式 cQ _{mu1}	(4)式 cQ _{su1}	(6)式 cQ _{su2}	機構 1 cQ _{mu2}	
80WK02	13.5	19.9 (0.98)	19.0 (1.03)	22.1 (0.88)	21.3 (0.32)	18.8 (1.04)	YC, CW2
	-19.2	— (0.96)	— (1.01)	— (0.87)	— (0.90)	— (1.02)	
80WK03	18.3	19.4 (0.94)	14.4 (1.27)	18.2 (1.01)	17.1 (1.07)	15.8 (1.16)	CW1 CW2
	-17.8	— (0.92)	— (1.24)	— (0.98)	— (1.04)	— (1.13)	
80WK05	11.9	19.7 (0.60)	10.5 (1.13)	17.2 (0.69)	12.9 (0.92)	12.3 (0.97)	YG, SG
	-12.1	— (0.61)	— (1.15)	— (0.70)	— (0.94)	— (0.98)	
80WK032	14.6	19.5 (0.75)	13.5 (1.08)	18.8 (0.78)	14.5 (1.01)	13.3 (1.10)	SG, CW2
	-14.4	— (0.74)	— (1.07)	— (0.77)	— (0.99)	— (1.08)	
80WK035	14.6	19.4 (0.75)	13.4 (1.09)	15.2 (0.96)	16.4 (0.89)	15.0 (0.97)	SG, CW2
	-14.7	— (0.76)	— (1.10)	— (0.97)	— (0.90)	— (0.98)	
81WH03	19.2	20.9 (0.92)	15.1 (1.27)	18.9 (1.02)	19.4 (0.99)	17.6 (1.09)	YC, CW2 SG, CW1
	-16.2	— (0.78)	— (1.07)	— (0.86)	17.1 (0.95)	16.2 (1.00)	
81WH032	19.5	21.0 (0.93)	14.6 (1.34)	19.6 (0.99)	17.4 (1.12)	15.7 (1.24)	YC, CW2 SG, CW1
	-16.3	— (0.78)	— (1.17)	— (0.83)	14.3 (1.14)	12.4 (1.31)	

単位 (ton)

ただし、 $1 \leq M/QDw \leq 3$

Pw : be を幅として置換した壁筋・帯筋の等価なせん断補強筋比

be : 柱・そで壁全断面積を矩形断面に置換した場合の等価な断面の幅

以上の諸式により求まる計算値を実験値最大耐力と比較し表4に示した。同表に各試験体の破壊過程も付記した。無開口壁に対する修正大野・荒川式に規準式による強度低減率をかけた(4)式がいずれの試験体においても比較的適合性が良く、開口壁の耐力のみを推定しようとする場合、一つの有効な手段であろう。他の諸式に対しては、それぞれ破壊モードとの関係で実験値と計算値を比較すると非常に良く一致している。耐力の推定値により開口壁の変形性能をも評価しようとする場合には、その破壊のメカニズムを考慮した計算式を用いる必要がある。

4-3 初期剛性

$$\text{CASE1} ; c\delta_1 = c\delta_B + c\delta_F = QH^3 / 3E I_e + \kappa QH / \beta GA \quad (7)$$

ただし、 I_e : 開口を除く実断面に対する断面2次モーメント

β : 開口によるせん断剛性低下率 $\beta = 1 - 1.25 \xi$

図7に開口によるせん断剛性低下率実験値と開口周比の関係を既往の推定式と比較し示した。実験値は他の推定式に比べ小さな値となっている。

CASE2 : $c\delta_2$: 曲げ変形・せん断変形を考慮した剛域ラーメンによる解法

実験値および計算値を表5に示した。開口周比が $\xi = 0.33$ 以下の試験体及び開口幅比が0.2の試験体ではCASE1が、他の試験体ではCASE2の結果が一致している。

4-4 変形性能

表5に各試験体の最大耐力時の部材角及びその時の弾性剛性に対する剛性低下率並びに限界変形時部材角及び剛性低下率を示した。また、図8に開口周比を変動したシリーズの全変形に対する曲げ変形の割合を示した。無開口壁と同様の挙動を示した80WK02、骨組的挙動を示した80WK05では最大耐力時の部材角が $R \approx 1.0 \times 10^{-3}$ radであるのに対し、他の試験体では $R \approx 6.7 \times 10^{-3}$ rad前後で最大耐力に達している。しかし、以後の繰り返して最大耐力の75%程度の耐力低下を起し限界変形に至っても安定した変形性能を示し終局時に $R \approx 2.0 \times 10^{-3}$ radに達する試験体もあり破壊過程が大きな影響を及ぼす事がわかる。また、図8に示されるように80WK02を除き、曲げ変形の割合は変形の増大に伴い減少する傾向にある。

5. あとがき

以上、連層耐震壁における開口が強度・剛性に及ぼす影響を一体壁として扱う場合および骨組として扱う場合について検討した。この結果、開口形状による破壊機構の変化に伴う強度・変形性能の推移が明らかとなった。本研究は、昭和55、56年度文部省科学研究費補助金(代表・佐藤稔雄教授)によって実施されたものである。本報をまとめるにあたり終始御指導頂いた日本大学教授佐藤稔雄博士、小野新助教授、協力頂いた大学院生西岡優君はじめ卒研生諸氏に感謝致します。

参考文献

1. 佐藤・小野他“鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性性状に関する研究(その12)(その13)” 建築学会大会(九州) 昭和56年9月
2. 佐藤・小野他“鉄筋コンクリート造耐震壁の弾塑性性状に関する研究(第1報)(第2報)” 日本大学理工学研究所報 昭和55年7月
3. 日本建築学会“鉄筋コンクリート構造計算規準・同解説” 1979年
4. 日本特殊建築安全センター“既往の鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準 付解説” 昭和52年
5. 坂・静雄“地形耐震時の横力負担と開口の影響” 日本建築学会論文報告集第30号 昭和18年9月
6. 武藤 浩“耐震設計シリーズ1-耐震設計法” 丸善
7. 富井 政英“耐震壁の開口の影響による負担せん断力の低減率(有開口耐震壁のせん断抵抗に関する研究:第3報)” 日本建築学会論文報告集第67号 昭和36年2月

表5 諸強度時変位及び剛性低下率(α)

試験体	初期変位(mm)		せん断ひび割れ時変位		最大荷重時変位		終局時変位	
	T δ	C δ_1	C δ_2	R δ	R δ	R δ	R δ	
76W201	0.05	0.06	—	0.34 -0.32	0.37 —	10.00 -9.80	0.06 -0.06	10.00 -9.80
80WK02	0.06	0.08	0.10	0.67 -0.30	0.39 —	10.02 -10.03	0.07 -0.07	16.23 -14.23
80WK03	0.10	0.11	0.14	0.22 -0.17	0.47 —	6.53 -6.84	0.10 -0.09	7.68 -9.29
80WK032	0.11	0.12	0.16	0.60 -0.43	0.63 —	10.07 -6.74	0.09 -0.18	10.07 -9.98
80WK035	0.14	0.15	0.14	0.24 -0.28	0.67 —	6.74 -6.78	0.14 -0.18	9.17 -10.32
80WK05	0.27	0.12	0.25	1.84 -1.21	0.59 —	10.08 -10.01	0.18 -0.19	14.16 -19.96
81WH03	0.07	0.09	0.08	0.15 -0.64	0.81 —	8.83 -8.09	0.09 -0.08	8.83 -8.09
81WH032	0.10	0.09	0.08	0.65 -1.06	0.65 —	6.79 -5.25	0.17 -0.18	7.95 -6.74

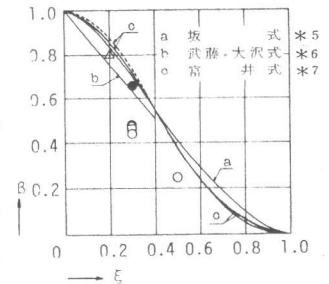


図7 開口によるせん断剛性低下率と開口周比の比較

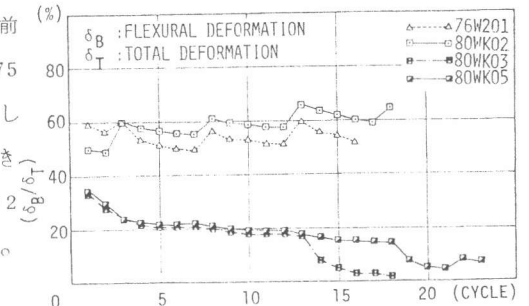


図8 全体変形に対する曲げ変形の割合