

面内力および面外力を受ける鉄筋コンクリート板に関する実験的研究(第3報)

——長期または短期許容面外曲げモーメントを受ける場合——

武田 寿一
小 嶋 克 朗

Experimental Study on Reinforced Concrete Wall Subjected to Shear Force Both in Plane and out of Plane (Part 3) —Case of Subjection to Long- or Short-Time Allowable Bending Moment out of Plane—

Toshikazu Takeda
Yoshiro Kobatake

Abstract

The object of this study is to perform structural investigations on cast-in-situ diaphragm walls designed as seismic walls of structures. The walls are subjected to shear forces both in plane and out of plane. Other reports (Part 1 on full-size cast-in-situ diaphragm walls, Part 2 on quarter-size model specimens) have presented the test results of cases of subjection to long-time allowable shearing stress out of plane. This report (Part 3) gives the results of tests on quarter-size model specimens subjected to long- or short-time allowable bending moments out of plane.

From the test results, the shear and bending strengths, and rigidities in plane of walls subjected to uniform loads out of plane become known.

概 要

この研究の目的は、場所打ち鉄筋コンクリート地中壁体の建物地下外壁としての構造的な検討をすることである。土水圧と水平力を負担する地中壁体は、地震時土水圧を無視すれば長期の土水圧（面外力）が作用している状態で地震時の水平力（面内力）を受ける。このような荷重条件での壁の強度と剛性を検討するために一定の面外力が作用している壁体の面内水平加力実験を行った。

この報告は、長期許容面外せん断応力度（ 7 kg/cm^2 ）を受ける場合の前報^{1),2)}（第1報—実大地中壁，第2報—模型供試体）の続報で、長期または短期許容面外曲げモーメントを受ける場合の模型供試体による実験結果の報告である。この報告では面外力の有無，面外力の大きさ，鉄筋比およびシャースパン比などの面内強度と剛性への影響について検討している。

この実験結果から、面外力が作用している壁体の面内せん断力に対する強度と剛性の概略を知ることができた。

1. 序

この研究は、泥水工法によって構築した場所打ち鉄筋コンクリート地中連続壁体を、建物地下外周耐震壁として設計するにあたっての構造的な検討である。通常の地下外壁においても同じであるが、土水圧および水平力を負担する地中壁体は、地震時面外土水圧を無

視すれば、長期荷重としての土水圧（面外力）と短期荷重としての地震時水平力（面内力）両応力を同時に受ける。このような2軸の応力を受ける鉄筋コンクリート板に関する研究は筆者が知るかぎりなされていない。そこで一定な面外力が作用している壁体の面内せん断力に対する強度と剛性を検討する実験的研究を進めている。この報告は、長期許容面外せん断応力度

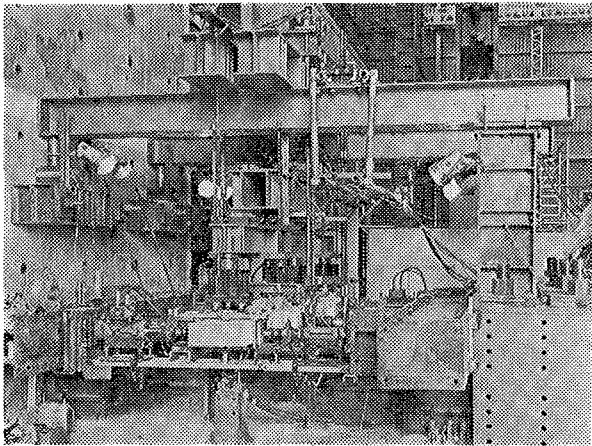


写真-1 面外力を加えた実験状況

(7kg/cm²)を受ける場合の前報^{1),2)}(第1報—実大地中壁体,第2報—模型供試体)の続報である。今回の面外についてのせん断力と曲げモーメントは,前報よりも大きくし,面外曲げモーメントを一応の目安として長期または短期許容面外曲げモーメントに相当させた。この面外荷重を作用させた状態での壁体の面内強度と剛性を,面内荷重のみを加えたものと,鉄筋比とシャースパン比が異なるもので比較検討するとともに,面外力の大小による影響も検討している。

2. 実験の概要

2.1. 供試体

供試体は,15cm(壁厚)×37.5cm(壁全せい)の短形断面の壁ばりで,供試体の配筋を図-1に,形状寸法を図-2に示す。供試体は面内力のみを加えてそれぞれせん断破壊(CD・S型),曲げ破壊(CD・B型)および曲げせん断的に破壊(CC型)するよう設計した3種3体,さらにこれらのおおのに面外力を加えるもの計8体の合計11体である。比較ファクターとしては,面外

供試体の分類	供試体の記号	面外荷重			面内荷重の加え方	シャースパン比	鉄筋比			コンクリート強度
		有無	全荷重 P _o	せん断力 Q _o			せん断応力度 τ _o	主筋量 P _g	面内引張 P _{1x}	
曲げせん断 (CC型)	CC-0	無	—	—	正負	1.06	1.41	0.51	0.94	220
	CC-2	有	—	—	正負	—	—	—	—	225
	CC-2-a	有	12.4	4.5	12.3	一方	—	—	—	230
せん断 (CDS型)	CD-S-0	無	—	—	一方	1.06	1.92	0.80	1.31	220
	CD-S-2	有	16.5	6.0	16.7	—	—	—	—	230
曲げ (CDB型)	CD-B-0	無	—	—	正負	2.12	—	—	—	240
	CD-B-2	有	9.1	3.3	9.2	—	—	—	—	240
	CD-B-3	有	14.4	5.3	14.6	—	—	—	—	240

[注] (1)あばら筋比はすべて同じで,面内0.43%,面外0.17%。(2)P_g=As/bD,As=全主筋断面積。(3)P_{1x}=As₁/bD,As₁=端部曲げ補強筋断面積。(4)P_{1y}=As₂/b'd',As₂=全引張鉄筋断面積。

表-1 供試体一覧

力の有無とその大きさ[供試体記号の数字0が面外力を加えないもの,2(3)は長期(短期)許容面外曲げモーメントを加えるもの],鉄筋比,シャースパン比お

よび面内力の加え方[一方向(記号a)または正負を繰返し]である。以上まとめて表-1に示す。

2.2. 使用材料

鉄筋はD16, D13, D10およびD6を使用した,その性質を表-2に示す。D6以外は加工した試験片による結果である。

コンクリートとしては,生コンクリートを使用した,その調査条件は,設計強度210kg/cm²,スランブ18cm,骨材粒径25mm以下である。実験時材令は58日~118日であるが,そのときのコンクリート圧縮強度を表-1に示す。

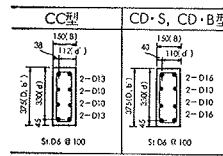
2.3. 供試体の製作と養生

コンクリートは壁面を平にしないで,立てた状態とし,棒状バイブレーターを用いて振動打ちしている。

養生としては,コンクリートを打設した後3日間散水したが,それ以後は空气中に放置している。

2.4. 加力方法

実験状況を写真-1(面外力を加えるもの)および写真-2(面内力のみを加えるもの)に,また載荷要領を図-2(面内力)および図-3(面外力)にそれぞれ示すが,面内力および面外力とも前報と全く同じ要領である。この実験における荷重(面内と面外)と応力・変形との関係を図-4に示す。



公称	有効断面積	降伏点	引張強度	伸び	ヤング係数
D16	1.83	4.48	6.32	21.6	2.11
D13	1.16	4.42	6.16	23.5	2.12
D10	0.65	4.48	5.95	20.1	2.12
D6	(0.32)	3.57	4.86	16.3	(1.76)

[注] 有効断面積=素材の降伏応力(引張)÷加工材の降伏応力度

図-1 配筋

表-2 鉄筋の性質

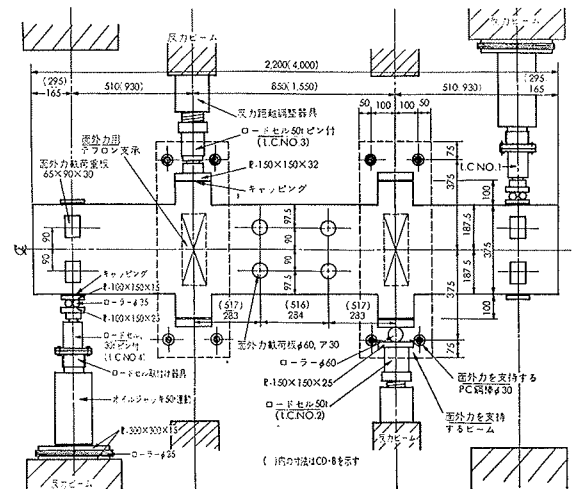


図-2 供試体の形状・寸法と面内力の載荷要領

面内力のみを加えるものの面内荷重の加え方は,正負の繰返しで長期許容面内曲げモーメント(CD・S-0

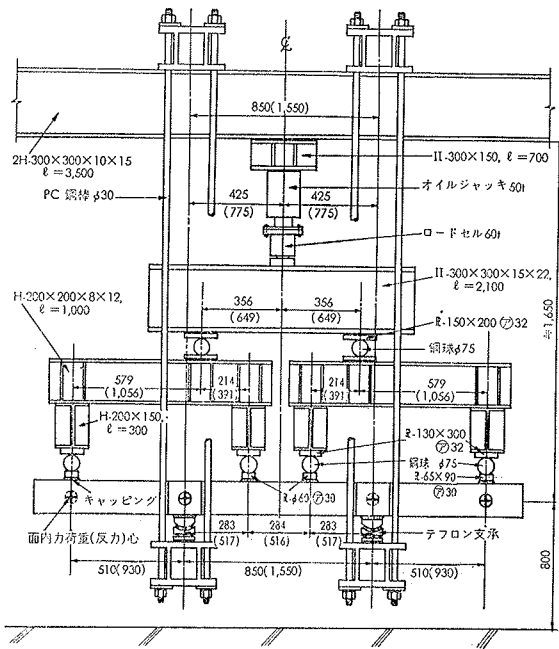


図-3 面外力の載荷要領

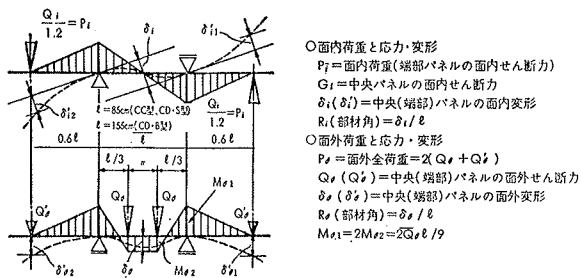


図-4 荷重と応力・変形

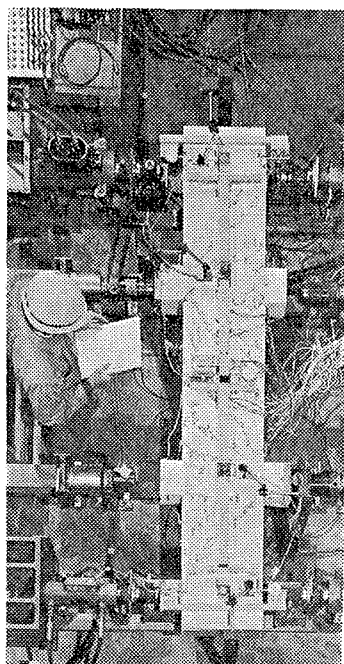


写真-2 面内実験状況

では短期許容せん断応力度と長期許容面内せん断力)に相当する荷重で1回, 同短期許容応力と面内降伏時の変位 δ_y で2回, $2\delta_y$ と $3\delta_y$ で1回 (CD・S-0 は δ_y で1回のみ) 繰り返した後, CC-0 は第8正, CD・B-0 は第7正, および CO・S-0 は第6正でそれぞれ最大荷重まで加力している。

面外力を加えるものは, まず所定 (表-1 に示す) の面外

力を加えその荷重を一定に保持しながら, 面内荷重を前記と同じ要領で加力している。

2.5. 変形および歪の測定

変形としては, 測定治具 (写真-2 参照) を用いて面内変形を, また試験床を不動点として面外変形を, それぞれ変位1/200mmを1 μ の歪で検出する変位計によって測定したが, その測定位置を図-4 に示す。

歪としては, 主筋およびあばら筋に W. S. G. を貼付けて測定している。

3. 実験結果とその検討

3.1. 実験経過

中央パネル部のひび割れ発生と破壊状況の例を写真-3 に示す。●印は面外荷重の載荷板の位置を, また点の連続は面外荷重のみを加えたときのひび割れを, それぞれ示す。

3.1.1. 面内力のみを加えたもの 加力すると, まず曲げひび割れが, 次いでせん断初ひび割れが発生する。さらに載荷すると, CC-0とCD・S-0は主筋が降伏した後せん断破壊し, CD・B-0は曲げ破壊した。せん断破壊したCC-0とCD・S-0を比較すると, 前者は曲げひび割れ幅が3~5mm開いておりせん断圧縮破壊的の後者は曲げひび割れ幅が非常に小さくせん断分離破壊的である。

3.1.2. 面外力を加えたもの 面外荷重を加えると面外曲げひび割れ (写真-3 参照) が発生する。この状態で面内荷重を加えると, 前記面外曲げひび割れが壁厚方向に伸びる形式で面内曲げひび割れが, 次いでせん断初ひび割れがそれぞれ発生する。さらに載荷すると, 面外力に関してまず引張側の, 次いで圧縮側の最端部主筋が降伏する。これまでの経過は面外力の大小にあまり関係がない。しかし最終破壊では, 長期許容面外曲げモーメント (以下面外力が小さいと記す) を加えたものは, 面内力のみを加えたものと同じパターンで, CC型・CD・S型は面内にせん断破壊し, CD・B型は面内に曲げ破壊した。一方短期許容面外曲げモーメント (以下面外力が大きいと記す) を加えたものは, 3種4体とも面外荷重の載荷板と同支点とを結ぶ位置で面外にせん断破壊した。これは面内曲げひび割れ幅が開いて, 面外荷重を伝達する有効コンクリート断面積が小さくなったためと考えられる。

3.2. 荷重~変形曲線

荷重 (中央パネルのせん断力) と変形との関係の例を図-5 (面内変形) および図-6 (面外変形) に示す。せん断力 Q_i と Q_e および δ_i と δ_e は図-4 に示した値である。また中央パネルの各段階での面内変形および

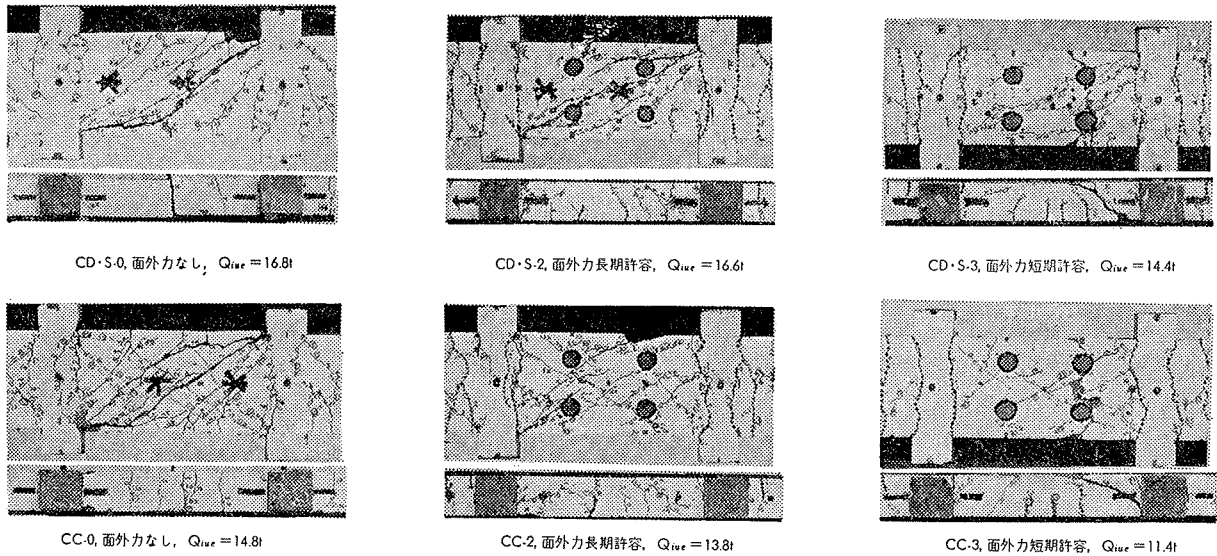


写真-3 ひび割れ発生と破壊状況

面外変形を部材角(図-4参照)で表-3に示す。Rice (Roce)は面内せん断初ひび割れ時, R_{ie}(Roue)は最大荷重時のそれぞれ面内(面外)部材角である。またR_{oe}は所定の面外荷重を加えたときの面外部材角である。

3.2.1. 面内変形性状 (1)初期変形——面内荷重を加え始めた初期の剛性は、面外力の有無とその大小による顕著な差異は認められない。しかし面外力を加えたものは加えないものと比較して、低い荷重で面内曲

げ初ひび割れが発生し剛性が低下している。

(2)せん断初ひび割れ変形——面内力のみを加えたもののRiceは、0.89(CD・S-0), 1.6(CC-0), 4.4(CD・B-0) $\times 10^{-3}rad$ である。面外力の有無で比較すると、CC型では顕著な差はないが、CD・S型とCD・B型の面外力を加えたものの変形が大きい(1.7~2.0倍)。なお面外力の大小による差は不明確である。

(3)最大荷重時の変形——面内力のみを加えたもののR_{ie}は、6.6(CD・S-0), 19.5(CC-0), 36.8(CD・B-0) $\times 10^{-3}rad$ である。面外力の有無で比較すると、CD・S型では不明確であるが、CC型およびCD・B型の面外力を加えたものの部材角は、加えないものよりも小さい。この減少の割合は面外力が小さいもの41~53%, 大きいもの79~88%である。面外力の大小で比較すると、CC型, CD・S型およびCD・B型3種とも面外

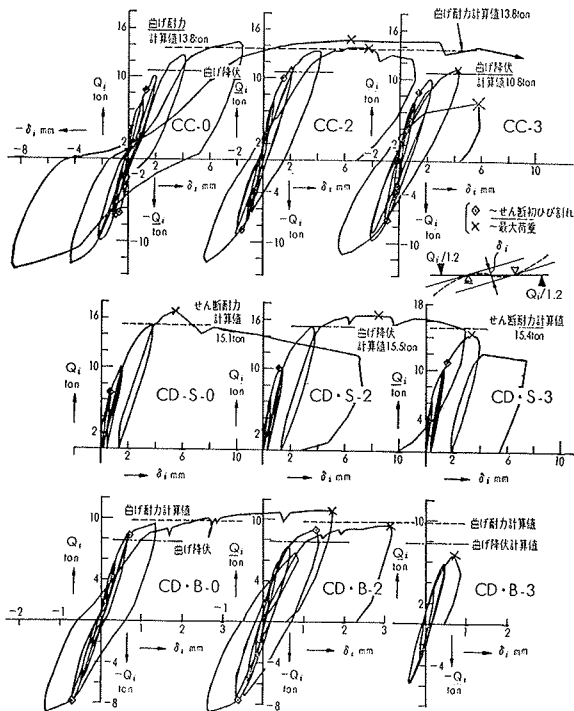


図-5 荷重～面内変形曲線

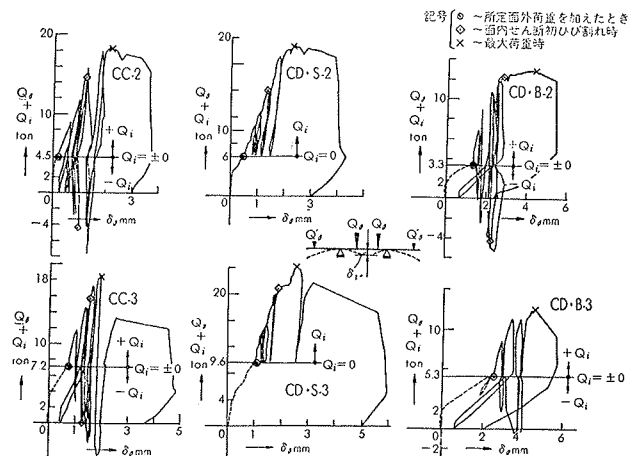


図-6 荷重～面外変形曲線

力が大きいものの部材角が小さいものよりも45~77%小さく、特にCD・B型のものが顕著である。次にCC型において面内荷重を正負に繰り返したものと一方向に繰り返したものを比較すると、前者の部材角が後者よりも約20%小さい。

3.2.2. 面内変形状 面内荷重を繰り返し載荷すると、面外荷重を一定に保持しているにもかかわらず、面内荷重の増大に伴って面外変形も徐々に増大する。この状況は、面内荷重を除荷しても面外変形が戻らず面内各荷重回での面外残留変形が累積される形式である。最大荷重時の面外部材角は、CC型、CD・S型およびCD・B型3種とも面外力の大小（破壊状況の違い）に関係なくほぼ同じで、 5.0×10^{-3} rad. 前後である。

3.3. セン断初ひび割れ強度

中央パネルにせん断初ひび割れ（断面中心線上を45度に近い角度で単独に発生する斜め初ひび割れと定義）が発生したときの中央パネルのせん断力 Q_{ice} そのときのせん断応力度 $\tau_{ice}(Q_{ice}/b_i)$ 、および荒川式による計算値 τ_{ic} を表-3に示す。なお $a/d=2.12$ で面外力が大きいCD・B-3では発生していない。

面内力のみを加えたものの τ_{ice} は、15.9(CD・S-0)および19.4(CC-0, CD・B-0とも) kg/cm^2 で、計算値と比較的よく一致している。面外力の有無で比較す

ると、面外力を加えたものの強度が、加えないものと同等または高くなっており、特にCD・S型のものが顕著である。また面外力の大小で比較すると、CC型では面外力の大きいものの強度が小さいものよりもやや低いが、CD・S型では反対にやや高く、面外力の大小による差は不明確である。次にCC型で面内荷重を正負に繰り返したものと一方向のものとを比較すると、前者の強度がやや高いが差はごく僅かである。

3.4. 降伏荷重

最外端の主筋が降伏した時の中央パネルの面内せん断力 Q_{iye1} 、 Q_{iye2} およびe-函数法で計算した面内降伏せん断力 Q_{iy} とをそれぞれ表-3に示す。 Q_{iye1} は面外力に関して引張側の、また Q_{iye2} は圧縮側の鉄筋が降伏する荷重である。

面内力のみを加えたものの降伏荷重は、8.5~15.1tで計算値とよく一致している。面外力の有無とその大ききで比較すると、面外力を加えるものは加えないものよりも、面外力が大きいものは小さいものよりも、それぞれ降伏荷重が低い。その低下の割合は、曲げの影響が大きいもの程（CD・B型、CC型、CD・S型の順序）大きくなっている。

3.5. 最大荷重

最大荷重時の中央パネルの面内せん断力 Q_{iue} 、その

供試体の記号	面外力の大きさ	面内せん断初ひび割れ			面内降伏荷重			面内最大荷重				面内変形		面外変形			
		実験	計算	計算	実験	計算	計算	実験	計算	実験	計算	R_{ice}	R_{iue}	R_{oe}	R_{ce}	R_{se}	
		ton	kg/cm^2		ton			ton				$\times 10^{-3}$ rad.		$\times 10^{-3}$ rad.			
CC-0	0	8.4 - 6.8	19.4 [1]	16.1 [1.21]	10.7 [1]	11.6 [0.88]	10.8 [0.99]	14.8 [1]	13.8 [1.07]	34.1 [1]	32.1 [1.06]	1.6 [1]	19.5 [1]	/	/	/	面内せん断片縮圧
CC-2	長期許容	10.0 - 8.8	23.1 [1.19]	(16.2)	9.4 [0.88]	11.6 [1.08]	(10.8)	13.8 [0.93]	(13.8)	31.8 [0.93]	(32.4)	11.8 [1.13]	9.2 [0.47]	0.59	2.9	5.2	面内せん断
CC-2-a	"	9.2 [1.09]	21.2 [1.09]	(16.3)	9.9 [0.93]	11.5 [1.07]	(10.8)	14.4 [0.97]	(13.8)	33.2 [0.97]	(32.7)	2.0 [1.25]	11.5 [0.59]	0.87	2.3	3.4	"
CC-3	短期許容	8.4 - 7.2	19.4 [1.00]	(16.2)	6.4 [0.60]	10.1 [0.94]	(10.8)	(11.4) [0.77]	(13.8)	(26.3) [0.77]	(32.4)	1.7 [1.06]	5.1 [0.26]	1.9	3.6	4.6	面外せん断
CC-3-a	"	8.2 [0.98]	18.9 [0.98]	(16.3)	7.1 [0.66]	10.3 [0.96]	(10.8)	(12.6) [0.85]	(13.8)	(29.1) [0.85]	(32.7)	1.3 [0.81]	6.1 [0.31]	1.8	3.6	4.8	"
CD・S-0	0	6.9 [1]	15.9 [1]	16.1 [0.99]	15.1 [1]	15.5 [0.97]	15.8 [1]	18.6 [0.90]	18.6 [1]	38.8 [1]	34.9 [1.11]	0.89 [1]	6.6 [1]	/	/	/	面内せん断分離
CD・S-2	長期許容	10.0 [1.45]	23.1 [1.45]	(16.3)	13.2 [0.87]	15.5 [1.03]	(15.5)	16.6 [0.99]	(18.6)	38.3 [0.99]	(35.5)	1.5 [1.69]	10.0 [1.52]	1.3	3.3	5.7	面内せん断
CD・S-3	短期許容	10.8 [1.56]	24.9 [1.56]	(16.3)	11.0 [0.73]	14.1 [0.93]	(15.5)	(14.4) [0.86]	(18.6)	(33.2) [0.86]	(35.5)	1.9 [2.13]	4.1 [0.62]	2.7	4.0	5.9	面外せん断
CD・B-0	0	8.4 - 7.9	19.4 [1]	16.5 [1.18]	8.5 [1]	7.9 [1.08]	7.9 [1]	10.9 [1]	9.8 [1.11]	25.1 [1]	36.1 [0.70]	4.4 [1]	36.8 [1]	/	/	/	面内曲げ
CD・B-2	長期許容	9.0 - 7.7	20.8 [1.07]	(16.5)	5.4 [0.64]	7.8 [0.92]	(7.9)	9.5 [0.87]	(9.8)	21.9 [0.87]	(36.1)	8.6 [1.95]	20.3 [0.55]	1.7	3.3	5.8	"
CD・B-3	短期許容	non "	— [—]	(16.5)	3.6 [0.42]	non [—]	(7.9)	(6.7) [0.61]	(9.8)	(15.5) [0.61]	(36.1)	— [—]	4.6 [0.12]	3.4	—	6.0	面外せん断

[注] 実験値の項での [] は同じシリーズの比を、計算値の項での [] は実験値/計算値を、また計算値の項での () は面外力を無視していることをそれぞれ示す。

表-3 実験結果一覧

ときのせん断応力度 $\tau_{iue} (=Q_{iue}/bj)$, 荒川式による計算値 τ_{iu} , および e -函数法で求めた曲げ耐力 Q_{iu} をそれぞれ表-3 に示す。

面内力のみを加えたものについて, Q_{iue}/Q_{iu} をみると, CC-0 は 1.07, CD・S-0 は 0.90, CD・B-0 は 1.11 である。せん断破壊したものも曲げ耐力以上または近い耐力に達しているが, その最大せん断応力度も 34.1 と 38.8 kg/cm² で, 計算値とよく一致している。

面外力の有無とその大小で比較すると, 面外力を加えたものは加えないものよりも, 面外力が大きいものは小さいものよりも, それぞれ最大荷重が低下している。この低下の割合は, 面外力が小さくて面内にせん断破壊したものはごく僅か(1~7%)で, 面外力が大きくて面外にせん断破壊した曲げ型の CD・B-3 が最も大きい(39%), 面外力が大きいせん断型または面外力が小さい曲げ型がこの中間(13~23%)である。次に CC 型で面内荷重を正負に繰り返したものと一方向のものとを比較すると, 前者の強度がやや(4~8%)低い。

4. まとめ

面内力と面外力を受ける RC 板の強度と剛性を検討するために, 一定な面外力を加えた壁ばりおよび面内力のみを加えた壁ばり両者の面内曲げせん断実験を行い比較検討した。今回の実験結果をまとめると次のよ

うである。

1) 面外力が小さいものは, 面内力のみを加えたものと同じく, 面内に曲げまたはせん断破壊するが, 面外力が大きいものは, 面外にせん断破壊する。

2) 面外力を加えたものの最大荷重時面内変形は, 鉄筋比が大で面内にせん断破壊したもの(CD・S-2)を除いて, 面内力のみを加えたものと比較して小さく, 面外力が大きいものは, 小さいものよりも小さい。また面外変形は面内荷重の増大に伴って進行する。

3) 面外力を加えたものの面内せん断初ひび割れ強度は, 面内力のみを加えたものと比較して, 同等または高くなるが, 面内最大強度は反対に低くなる。この強度低下は, せん断型ではごく僅かで次いで曲げせん断型, 曲げ型の順に大きくなる。また面外力が大きいものは小さいものよりも面内最大強度が低い。

4) 面内荷重を一方向に繰り返したものは, 正負に繰り返したものと比較して, 破壊のパターンは同じであるが, 最大荷重時面内変形が大きく, また面内せん断初ひび割れ強度および面内最大強度がやや高い。

参考文献

- 1) 武田, 小嶋: 同題目(第1報)大林組技術研究所報, No. 8 (1974)
- 2) 武田, 小嶋: 同題目(第2報)同上