

[186] RC 耐震壁の JCI 選定試験体の非線形解析

正会員 ○野 口 博 (千葉大学工学部)

正会員 丸 田 誠 (鹿島建設建築設計本部)

1. はじめに

昭和58年10月に、日本コンクリート工学協会（JCI）の鉄筋コンクリート（RC）構造のせん断強度研究委員会（委員長：岡村 甫）主催の第2回RC構造のせん断問題に対する解析的研究に関するコロキウムが開催され、解析モデル検証用として委員会で選定された試験体が紹介された。¹⁾これらの試験体の選定主旨は、岡村委員長による序文に詳述されているように、マクロ及びミクロ理論による解析モデルの検証が出来る最小限の実験データを選んだことにある。対象部材としては、はり、柱、柱・はり接合部、スラブ、耐震壁の5つが選ばれ、コロキウムの論文応募者に関連する実験データが送付され、解析が依頼された。その解析結果は、コロキウム論文集²⁾に収められ、それらの相互比較についてのコメントが各試験体選定担当者により実験データ集¹⁾の中で述べられている。今後も多数の解析データが報告され、同一の試験体の解析という同じ土俵の上での解析モデル相互の比較検討が活発に行われていくことを期待したい。

筆者等もスラブを除く4種類の部材の解析を行い、コロキウムで報告した²⁾が、時間及び頁数の制限から、解析結果については荷重-変形曲線、諸現象発生荷重及び破壊経過についての簡単な検討しか行えなかった。そこで本研究では、菅野が選定を担当したRC耐震壁試験体の解析結果について、その後の再解析も含めて、主に破壊経過に重点を置いて実験結果と比較検討を行うことにした。なお、はり、柱、及び柱・はり接合部の解析結果についても、同様の主旨により別報³⁾⁴⁾で報告する。

2. 解析モデル

本解析で使用した解析モデルの概要は、文献⁵⁾⁶⁾に述べてあるので省略する。本解析モデルでは、既にはり、柱、柱・はり接合部、耐震壁等のせん断解析を行い、⁵⁾⁷⁾⁸⁾最近では地震時の正負繰返し載荷時の柱・はり接合部の解析も行っている。²⁾⁵⁾

3. 解析対象とした試験体の概要とモデル化

解析対象とした試験体は、前述のように菅野が選定を担当したRC耐震壁のミクロ理論用¹⁾のうち、基本試験体2体、補足試験体2体の合計4体と、関連する他の試験体1体の計5体である。#1グループは、青山等による1層、I型断面片持ばかり型繰返し加力試験体で、#1は基本試験体であり、押し引き同時加力でせん断破壊の追跡を解析検討項目とする。#1'は押しのみを想定し、#1との比較から加力方法の影響を検討する。#1''は柱断面が小さい実験試験体で、#1との比較から付帯ラーメンの拘束効果を検討する。#1'''は#1''が押し引き同時加力なのにに対し、押しのみの加力を想定した選定外の試験体であるが、#1、#1' と同様に加力方法の影響を検討するために解析を行った。#2は秋野、杉田、稻田等による1層ボックス型断面片持ばかり型繰返し加力試験体で、押しのみの加力によるボックス型断面壁のせん断破壊の追跡を検討項目としている。なお、#1は実大の約1/3のスケールで、せん断スパン比0.55、壁筋比0.85%である。また#2はせん断スパン比0.8、壁筋比1.2%のボックス壁で、フランジ壁、ウェブ壁共に長さ150cmである。解析における要素分割図を#1、#2について、図1、図2に示す。コンクリート要素には6節点線形ひずみ三角形要素を用い、鉄筋は線材要素とした。壁筋の間隔はコンクリート要素に合わせるため、実配筋よりやや粗いが壁筋量は一致させた。#1''、#1'''は#1と同一の分割とし、柱の寸法を1/2とした。#2はボックス壁なので、フランジ部分をウェブ平面上に展開し、横方向は自由に滑り、縦方向を拘束するバネ要素

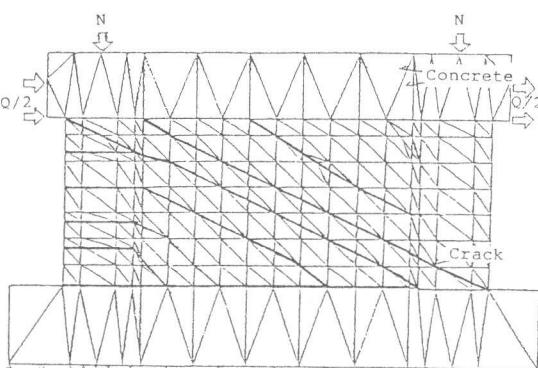


図1 要素分割 (#1)

でウェブ部分と結ぶことにより平面応力解析を行った。

ひびわれはクラックリンクをコンクリート要素間に予め配置し、ひびわれ面の節点の主応力が引張強度を越えた場合、剛性を零とし、節点に解放力を作用させるモデルにより表現し、ひびわれパターンは実験結果を参考にして、図1、図2の太線のように決めた。

付着はボンドリンクにより表現し、そのバネ剛性は耐震壁の開口補強の解析におけるモデル化と解析結果の検討⁹⁾に基づいて、壁や柱のひびわれ面近傍の付着劣化を考慮し、さらにその劣化程度は①柱内、②基礎、はりと壁面との境の曲げひびわれ面、③壁面内の順に顕著になるものと考え、部位別に表1に示すように決めた。

解析で用いたコンクリート及び鉄筋の材料定数を表2に示す。

4. 破壊経過

諸現象発生荷重の解析結果を実験結果と対比させて表3に示す。また、#1グループと#2の最大荷重付近のひびわれ進展、開口状況、コンクリートの応力-ひずみ曲線下降領域(・印)と圧壊域(○印)及び変形状態を図3～図5に示す。以下に、破壊経過を各試験体毎に①ひびわれ、②鉄筋の降伏、③コンクリートの圧壊、④耐力の順に述べる。

1) #1: ①解析では荷重Q=40tfの時、左柱根元に曲げひびわれが発生し、50tfで壁左側部分にせん断ひびわれが発生した。発生箇所は実験とよく対応しているが、発生荷重は解析の方がやや高い。その後のせん断ひびわれの進展も実験よりやや遅く、70tfでせん断ひびわれの進展が著しく、剛性低下を生じている。

②壁筋は、縦筋が120tf、横筋が135tfからせん断ひびわれ部分及び壁脚部で降伏し始める。実験では、140tf前後で縦横筋とも降伏し、ほぼ解析と対応している。柱主筋の降伏は150tfで左柱柱脚部にみられ、実験の120～161tfよりやや遅れている。

③圧壊は、解析では応力-ひずみ曲線の下降部分領域が120tfから右柱脚部に生じてくるが、実験で確認出来る程度(終局ひずみ付近と思われる)になるのは耐力付近で、実験の161tfにはほぼ対応すると思われる。

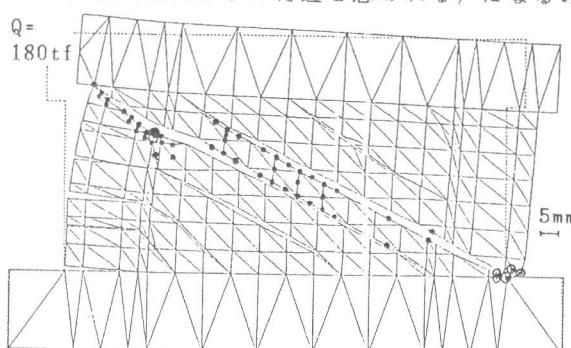


図3 変形状態と圧壊状況(#1)
(・:ひずみ軟化域○: 圧壊)

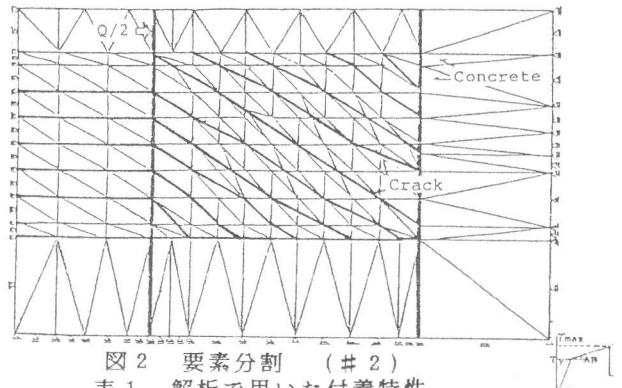


図2 要素分割 (#2)
表1 解析で用いた付着特性

部位	$E(kgf/cm^2)$	$AB(xEkgf/cm^2)$	$\bar{t}_y(kgf/cm^2)$	$t_{max}^{max}(kgf/cm^2)$
1 壁面内の壁筋でひびわれていない部分	5000	0.05	20 20	60 60
2 基礎、はりと壁面との境の曲げひびわれ面	10000	1.0	9999 9999	9999 9999
3 壁面内の壁筋のひびわれ面	1	1.0	99 99	99 99
4 柱主筋、帶筋でひびわれていない部分	8000	0.05 1.0	20 999 20	60 999 60
5 基礎、はりと壁面との境の曲げひびわれ面	5000	0.05 1.0	8 999 1.0	25 999 999
6 柱主筋、帶筋のひびわれ面	8000	0.05 1.0	12 600	36 600

表2 解析で用いた材料特性 Unit (kgf/cm²)

Concrete	#1	#1'	#1"	#1'''	#2
	$E_c = 2.34 \times 10^5$				$E_c = 2.29 \times 10^5$
Reinforcement	$F_c = -297$				$F_c = -305$
	$F_t = 23.6$				$F_t = 27.6$
Reinforcement	#1	#1'	#1"	#1'''	#2
	D6	D10	D13		D6
	$E_s = 2.10 \times 10^6$				$E_s = 1.87 \times 10^6$
	$\sigma_y = 3690$	$\sigma_y = 3530$	$\sigma_y = 3680$		$\sigma_y = 3840$

表3 諸現象発生荷重:() 内は実験値 (tf)

項目	試験体名	#1	#1'	#1"	#1'''	#2
曲げひびわれ発生荷重(tf)	40(30)	40	30(20)	30	30(25)	
斜めひびわれ発生荷重(tf)	50(30)	50	50(50)	50	30(25)	
フランジ板筋降伏荷重(tf)	-	-	-	-	-	120(101)
ウェブ横筋降伏荷重(tf)	135(140)	90	90(-)	80	110(126)	
ウェブ縦筋降伏荷重(tf)	120(138)	135	130(-)	110	100(110)	
圧壊開始荷重(tf)	120(161)	150	105(115)	120	120(138)	
主筋引張降伏荷重(tf)	150(120)	150	145(115)	140	-	
最大荷重(tf)	180(161)	195	150(141)	160	140(138)	

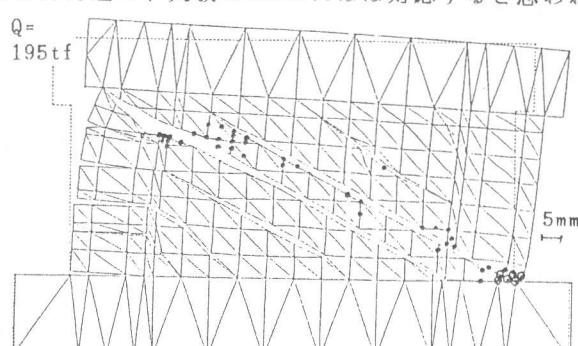


図4 変形状態と圧壊状況(#1')
(・:ひずみ軟化域○: 圧壊)

圧壊は、その後は中央のせん断ひびわれに沿って顕著に現れ、耐力付近では図3にみられるように壁中央部分の斜めストラットはほぼ全体に渡って圧壊しており、実験で壁中央部分のコンクリートに圧壊が生じて破壊したのと対応する。周辺フレームでは左柱柱脚の圧壊が生じているが、全体としては壁部分に比べると圧壊は顕著ではなく、実験の傾向と対応している。

④解析で変形が急増し、耐力と考えられる180tfは、実験値161tfよりやや高めである。

2) #1': ①押しのみの加力による#1'では、曲げ及びせん断ひびわれ発生荷重は押し引き加力の#1とほぼ同じであるが、その後のひびわれの進展、開口は、左柱柱頭と右柱柱脚を結ぶ右下がりの対角線の左下部分で顕著で、応力の流れも対角線上の圧縮ストラット付近に集中しているのに対し、#1では対角線上方のせん断ひびわれの開口が顕著で、応力の流れは対角線から上方に幅広く流れている。

③圧壊状況も図4から壁左上部と右柱柱脚部に顕著で#1とは差がみられる。

④耐力は195tfで、押しのみの加力では押し引き(180tf)より高めになることがわかる。

3) #1": ①せん断ひびわれの進展は#1よりもやや早く、60tfで顕著である。

③圧壊も105tfで早めに生じ、その後、圧壊は壁中央のせん断ひびわれにはさまれる圧縮ストラット上と左柱柱頭、右柱柱脚及びその近辺の壁で顕著となる。実験で壁板中央のせん断圧縮破壊と共に壁脚部にスリップ状破壊が生じ、柱にも圧壊が生じたのと比べると、スリップ状破壊の再現がやや不十分ではあるが、傾向としてはほぼ対応する。

④解析の耐力150tfは、実験での141tfにほぼ一致する。

4) #1'''：①、③押しのみの加力による#1'''では、ひびわれ進展、開口及び圧壊は、対角線上及びそのやや左下で顕著で、押し引きの#1"の場合の対角線上方とは差がみられるのは、#1と#1'の場合と同様である。

④耐力は160tfで、この場合も、押し引きの#1"(150tf)に比べるとやや高めとなる。

5) #2: ①、②50tfでせん断ひびわれの進展が顕著となり、ウェブの縦筋降伏が100tf(実験110tf)、横筋降伏が110tf(126tf)で生じ、実験とほぼ対応する。

③その後、ウェブの圧縮側脚部の圧壊が120tfから生じ始め、耐力付近ではウェブの圧縮側脚部全体にせん断圧壊が生じ、一部圧縮フランジにも圧壊が生じている。展開モデルを用いているために、圧縮フランジの圧壊がやや少ないと思われるが、実験でウェブ壁に多数のせん断ひびわれが生じた後、ウェブ脚部のせん断圧縮により最大耐力に達したのとほぼ対応する。

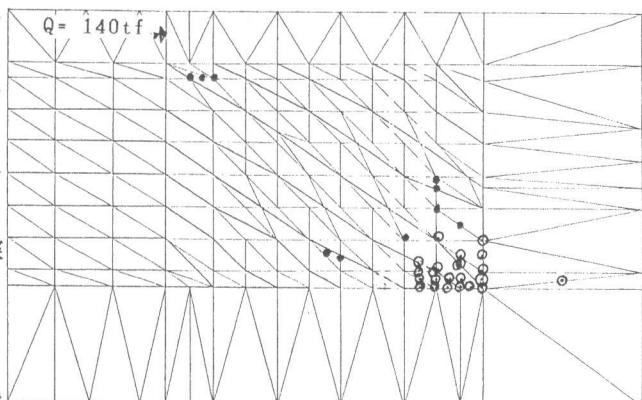


図5 圧壊状況(#2)(+:ひびみ軟化域○: 圧壊)

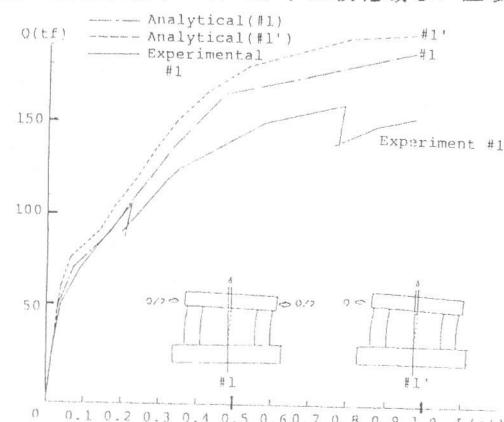


図6 荷重-変形曲線 (#1, #1')

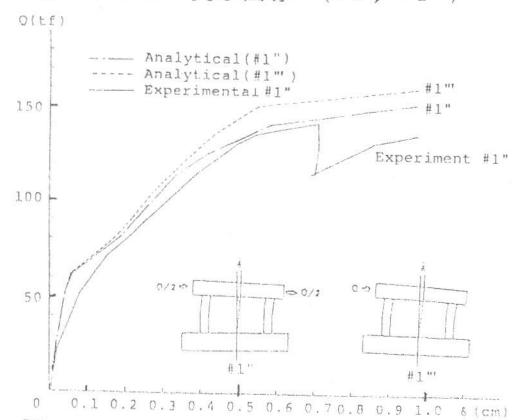


図7 荷重-変形曲線 (#1", #1''')

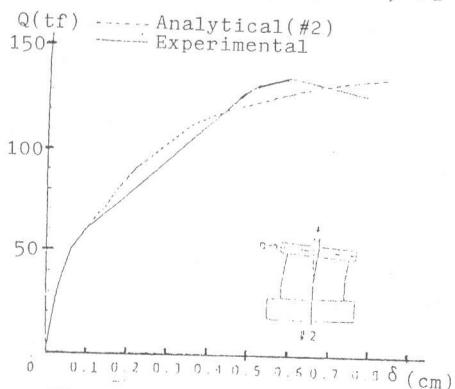


図8 荷重-変形曲線 (#2)

④耐力は140tfで、実験値138.3tfにほぼ一致する。

5. 荷重-変形曲線

各試験体の荷重-変形曲線の解析結果を実験結果と対比させて図6～図8に示し、以下で検討を行う。

1) #1: 解析でのせん断ひびわれの進展が実験よりやや遅れたことは、荷重-変形曲線にはそれほど影響を与えることなく、せん断ひびわれの進展がほぼ終了する100tf前後までは解析と実験の対応は良好である。その後、壁筋の降伏と柱主筋の降伏がほぼ同時期に徐々に生じる125～150tfで、実験での剛性低下の方が先行し、解析では165tfで顕著な剛性低下を示す。耐力は実験よりやや高めになっている。圧壊状況は前述のように解析と実験ではほぼ対応しているので、剛性低下の時期の差は、柱主筋の降伏時期の差に起因するものと思われる。

2) #1': 押しのみの加力では、せん断ひびわれ発生(50tf)以後の剛性低下が、押し引き加力の#1よりやや遅れ、さらに圧壊開始荷重も#1より遅れたために、荷重-変形曲線は#1のやや上方に位置し、耐力は195tfとなり、押し引き加力の180tfよりやや高めである。

3) #1'': 初期の曲げひびわれ発生後の剛性低下が実験の方がやや大きいことを除けば、耐力まで荷重-変形曲線は全般的によく一致しているといえる。また柱の太い#1の解析と比べると、解析同志の比較でも最大耐力の減少(180→150tf)が認められ、周辺フレームの壁拘束の減少が耐震壁のせん断強度を減少させていることがわかる。この傾向は、実験でも定量的な違いはややあるが、やはり認められる。

4) #1'': 押しのみの加力では、せん断ひびわれの進展時期(60～90tf)から押し引き加力の#1''より剛性がやや高めで、壁筋の降伏時期がやや早めでも、圧壊の開始時期が120tfと、#1''の105tfより遅れたために、高荷重での剛性低下が遅れ、耐力は160tfで、押し引き加力の150tfよりやや高い。

5) #2: ウエブのせん断ひびわ進展が顕著となる50～60tfまでは実験とよく一致する。その後、90tfまでは解析の剛性の方がやや高めであるが、100～110tfでの壁筋の降伏開始と120tfでの圧壊開始により解析では剛性低下が徐々に現れ、実験では壁筋降伏と圧壊の進行がやや遅れたために剛性低下時期に差が生じている。耐力は140tfで、実験での138.3tfにほぼ一致するが、耐力時の変形は解析の方がやや大きめとなっている。

6. 解析方法及び解析結果の考察

JCI第2回せん断解析コロキウムでの耐震壁選定試験体の解析応募結果についての菅野のコメント¹⁾を参考にして解析方法及び解析結果の考察を行い、結びに代える。

1) ひびわれの発生域及びひびわれ間隔は、耐震壁では壁板の応力状態が一様に近いので、分布ひびわれモデルの方が扱いやすいが、本研究では、ひびわれ進展及び開口の程度が視覚的に把えやすいこと、せん断が卓越する部材での最終的に数少ないひびわれの開口、あるいは斜めひびわれ群に鋭角に交わる線上のせん断すべり破壊を表現しやすいため、また、はり、柱、柱・はり接合部等の一般部材の研究レベルの問題を同一の解析プログラムで解くことを目標にすることから離散ひびわれモデルを用いている。そのため、耐震壁の解析としては若干不利でも、ひびわれ進展状況については独自の把え方をしている。

2) 圧壊時期及び位置等の破壊状況については第4章で述べたように概ね実験結果と対応する。せん断すべり破壊位置は圧壊状況から大凡推測出来るが、変形モードの追跡については今後検討したい。

3) 諸現象発生荷重について実験結果と比較検討を詳細に行ったが、解析では単調載荷であるのに対し、実験では正負繰返し加力である点が、破壊モードによっては、比較的付着の影響を受けにくい耐震壁でも問題となると思われる。この点についても、今後解析的研究が必要であると考えている。

4) 最大耐力時の変形が、解析の手法上把握しにくい点については、その判定条件を今後検討したい。

5) 押し引き加力と片押し加力の違いが耐力及び変形性能に与える影響については、はりについての黒正¹⁰⁾や Fergusonの研究結果及び ASCEの Review¹¹⁾と対応するが、今後定量的な検討も進めていきたい。

参考文献 1) JCI-R.C構造のせん断強度研究委員会、「解析モデル検証用試験体の実験データ集」、第2回せん断コロキウム、JCI-C6、1983年10月。

2) JCI-R.C構造のせん断強度研究委員会、「第2回せん断コロキウム論文集」、JCI-C5、1983年10月。

3) 野口 博、増田昭浩、「R.Cはり・柱のJCI選定試験体の非線形解析」、JCI第6回年次講演会、1984年6月。

4) 野口 博、寺崎 浩、「R.C柱・はり接合部のJCI選定試験体の非線形解析」、JCI第6回年次講演会、1984年6月。

5) 野口 博、長沼一洋、「R.C柱・はり接合部の復元力特性の非線形有限要素解析」、第6回日本地盤工学会講論文集、昭和57年12月。

6) Noguchi, H., "Non-linear Finite Element Analysis of RC Bent-Column Joints," Final Reports of IARSE Colloquium on Advanced Mechanics of Reinforced Concrete, Delft, June 1981.

7) 野口 博、丸田 誠、「R.Cばかりのせん断抵抗機構の非線形有限要素解析」、RC構造のせん断解析コロキウム論文集、JCI-C1、昭和57年6月。

8) 野口 博、飯塚信一、「R.C短柱の力学的挙動に及ぼす付着特性の影響に関する非線形解析」、日本建築学会大会、昭和58年9月。

9) 野口 博、丸田 誠、「R.C開口耐震壁の開口補強に関する非線形解析」、日本建築学会大会、昭和58年9月。

10) 武蔵 清、「構造物の強度と変形」、丸善、1965。

11) ASCE-ACI Task Committee, "The Shear Strength of RC Structures," Journal of Structural Div., ASCE, June 1973.