

[187] 増設鉄筋コンクリート耐震壁の非線形有限要素解析

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

近年、予想される大地震に備えて既存の鉄筋コンクリート(RC)構造物の耐震診断を行い、その結果、耐震補強が必要となり実施されるケースが多くなってきた。補強方法のなかで最も有効で使用頻度が多いのは、耐震壁を増設する方法である。この耐震壁の増設では既存フレームと増設壁の接合方法が重要なポイントとなり、現時点ではダボ接合方式が有効な手段と考えられる。一方、増設壁の研究は、最近組織的に行われるようになったばかりで、データの蓄積は十分とはいえない。しかもその大部分が実験的研究であり、増設壁の抵抗機構を解析的に検討した例には、黒正等の研究¹⁾があるが、実験に比べるとまだ数少ないのが現状である。

そこで本研究では、ダボ接合部をモデル化した非線形有限要素法により増設耐震壁の解析を行い、設計上大切な要素となるダボ接合部が耐震壁の耐力及び変形性能に与える影響についての検討及びモデル化の検証を行うことにした。

2. 材料特性のモデル化

本解析では2次元平面応力状態を仮定した。

1) コンクリート: 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る。二軸応力下の構成法則には、主軸の回転について修正した、Darwin²⁾等の等価一軸ひずみによる直交異方性モデルを用い、破壊条件はKupfer³⁾等の研究に基づいてモデル化した。最大圧縮応力到達後のひずみ軟化域については、剛性を1/100に低減して解析した後、次のステップで余剰応力を等価節点力として解放して表現する。

2) 鉄 筋: 主筋、せん断補強筋、壁筋、ダボ筋は線材要素とし、応力ひずみ関係はbi-linearとする。

3) 鉄筋とコンクリートの付着: 付着にはボンドリンクを用いる。付着—すべり関係は森田・角⁴⁾による τ - s 基本則を基に、付着破壊後の挙動を考慮して、鉄筋降伏、又は付着破壊後はバネ剛性を零としてさらに付着応力の1/2を解放することにより表現する。

4) コンクリートのひびわれ: ひびわれは直交する2方向バネから成るクラックリンクをコンクリート要素間に予め配置して表現する。ひびわれ発生時には、バネの力を解放し、剛性を零とし、ひびわれが閉じる場合には徐々にバネ剛性を復活させてひびわれ面の局部接触効果を考慮し、ひびわれ面に平行方向のずれが大きい程、剛性が早期に復活し局部接触効果が大きくなることを意図した。⁵⁾

5) 打ち継ぎ部分: 既存部分と増設部分のコンクリート要素間に図1に示すような直交する2方向バネから成る結合要素を介在させ、この結合要素、及びダボ筋(線材なのでダボ力は負担しない)を通じて接合部の応力伝達が行われることを意図した。打ち継ぎ面に垂直方向のバネはクラックリンクと同様とし、増設壁面の節点の主応力が引張強度を越えた場合、ひびわれが生じたものとして鉛直方向のバネ剛性を零としバネの力を解放する。ひびわれが閉じる場合には、ひびわれ幅が0.05mm以下の場合、コンクリートのひびわれと同様に局部接触効果を考慮し剛性を徐々に復活させた。他方、打ち継ぎ面に平行方向のバネ剛性及び破壊条件は、最近の細川、塩原等による垂直応力をパラメータとした増設打ち継ぎ部分実験⁶⁾及び黒正等の解析¹⁾、筆者等の実験^{7) 8)}を基に決定した。

バネ剛性は各ステップでの節点の垂直応力が引張、零付近、圧縮のそれぞれの応力状態に応じて図2に示すような値とし、ひびわれが開口している場合にはダボ筋のみに相当する剛性とした。破壊条件は図3に示すように打ち継ぎ面の節点の垂直応力で決定し、破壊後は打ち継ぎ面に平行方向の剛性を零とし、バネの力を解放し表現する。なお、ひびわれ幅が0.4mm以上、または接合面のコンクリートの圧壊が生じた場合には、バネを切断し、またダボ筋が引張降

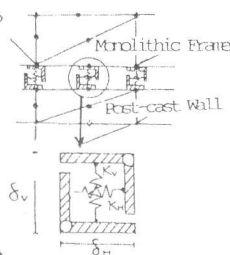


図1 結合要素
(打ち継ぎ面)

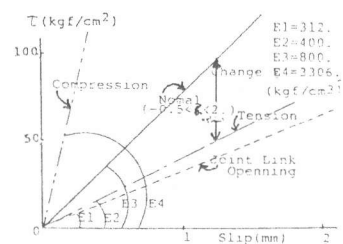


図2 打ち継ぎ面での
結合要素のバネ剛性

伏した場合には、バネ剛性を1/100に低減させた。

3. 解析モデル

解析対象とした試験体は、増設耐震壁4体(CW1~4)、一体打ち試験体2体(PW1~2)、さらに参考にフレームのみの1体(FR)の計7体である。

CW1, CW4(柱主筋比約1.5%、ダボ筋比約1%)は、1982年筆者等が行った実験⁹⁾と対応させた解析モデルで、CW1はダボ筋にケミカルアンカーを用いたせん断破壊型の試験体であり、CW4はメカニカルアンカーを用いた打ち継ぎ面破壊とせん断破壊が同時に起こる試験体である。CW4における打ち継ぎ面の水平破壊条件は図3の黒正モデル¹⁾と一致させた。

CW2(柱主筋比約0.75%、ダボ筋比約1%)、PW1(柱主筋比約1.5%)、PW2(柱主筋比約0.75%)は1981年東大青山研で行われた実験¹⁰⁾に対応する解析モデルで、CW2はダボ筋にケミカルアンカーを用いた曲げ破壊型の試験体であり、PW1はせん断破壊型、PW2は上部スリップ破壊型の試験体である。

CW3(柱主筋比約1.5%、ダボ筋比0.1%)は打ち継ぎ面で水平方向の力は負担せず、自由に滑り、垂直方向の力のみを壁に伝達する理想モデルである。試験体の詳細図を図4に示し、各材料定数を表1に示す。CW3, FRの材料定数はCW1に一致させた。

試験体の要素分割図を図5に示す。鉄筋の要素分割では、鉄筋比を一致させ、なるべく実際の配筋に近づくことを配慮した。コンクリートの要素分割は、打ち継ぎ面を考慮し、ひびわれパターンの実験結果より決定した。一体打ち耐震壁の要素分割図は図5とは多少異なっており、壁筋が通し配筋となっている。

付着特性は、筆者等の研究⁵⁾等を基に表2に示すようにモデル化し、ダボ筋の既存フレーム内の付着特性は筆者等が行った引抜き試験から決定した。

4. 破壊経過

解析結果は、CW3, FR(解析のみ)以外是对应する実験結果と比較検討する。

载荷はまず各柱に12tfずつの軸力を与え一定とし、はり部分に押し引き水平力を漸次増加し、単調载荷を行った。表3に諸現象発生荷重を示す。解析では初期の荷重増分が大きいいため多少の差はあるが実験結果とほぼ対応している。

増設耐震壁CW1~3の破壊性状が把握しやすい荷重時の変形状態を図6に示す。

CW1では斜めひびわれが他のひびわれに比べ卓越しており、左柱頭右柱脚部の圧壊がみられ、せん断破壊型となり実験とかなり良い対応を示している。

CW2は、実験結果と同様に曲げ破壊型となり、左柱脚部より曲げひびわれが進展し、右柱脚の圧壊が顕著

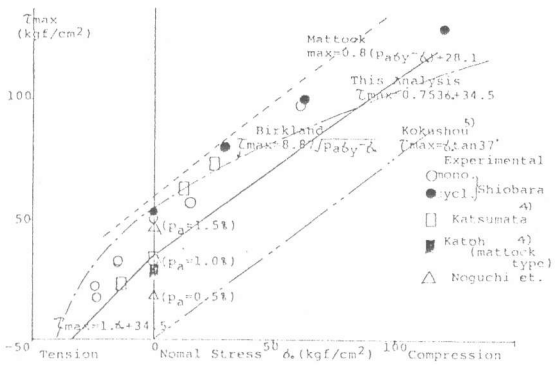


図3 打ち継ぎ面の水平破壊条件

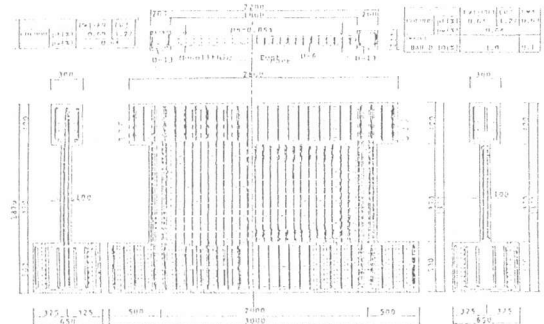


図4 試験体配筋図

表1 材料定数(解析)

		CW1	CW2	PW1	PW2
Concrete (wall)	$E_c (\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2)$	2.35	2.09	2.36	2.36
	$f_c (\text{kgf/cm}^2)$	268	301	297	287
	$f_t (\text{kgf/cm}^2)$	22.7	23.7	23.6	23.6
	$\epsilon_{cu} (\%)$	0.177	0.182	0.182	0.180
Concrete (frame)	$E_c (\times 10^5 \text{ kgf/cm}^2)$	2.12	2.35		
	$f_c (\text{kgf/cm}^2)$	247	287		
	$f_t (\text{kgf/cm}^2)$	20.9	21.7		
	$\epsilon_{cu} (\%)$	0.174	0.180		
Wall bar and Tie (D6)	$E_{st} (\times 10^6 \text{ kgf/cm}^2)$	1.97		2.10	
	$f_y (\text{kgf/cm}^2)$	3270	3990	3620	3990
Joint bar (D10)	$E_{st} (\times 10^6 \text{ kgf/cm}^2)$	1.91		2.10	
	$f_y (\text{kgf/cm}^2)$	4310		3520	
Main bar (D13)	$E_{st} (\times 10^6 \text{ kgf/cm}^2)$	2.16		2.10	
	$f_y (\text{kgf/cm}^2)$	3250		3680	

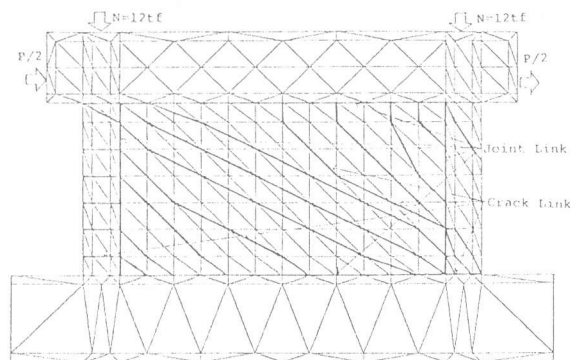


図5 要素分割図

表2 付着特性(解析)

$E (\text{kgf/cm}^2)$	$AR (\text{kgf/cm}^3)$	$\gamma (\text{kgf/cm}^2)$	$\tau_{max} (\text{kgf/cm}^2)$	Kind of Bond-links
8000	400	20 999	60 999	Normal
100000	100000	9999	9999	Anchor
4000 8000	200 400	18 999	50 999	Dowel Bar

である。また打ち継ぎ面のずれ開き共に大きい。

理想モデルの CW3 では柱と壁の間の開きがかなり大きく、斜めひびわれ、曲げひびわれ共開口は顕著ではない。壁自体あまり変形せず、圧縮ブレースとして働いているように思われる。左柱頭右柱脚及びそこに接する壁部分の圧壊がかなり顕著となり終局に至っている。CW4 は打ち継ぎ面の水平方向の剛性を失ってから CW1 と同様な挙動を示しておりせん断破壊型となっている。一体打ちである PW1 では斜めひびわれの開口が大きく、鉄筋が降伏し、斜めひびわれ付近の圧壊がかなり顕著となり実験とよく一致している。PW2 は実験では上部スリップ破壊をしたのに対し、解析では壁上部圧壊もみられたが、斜めひびわれが進展し終局に至っている。FR では柱の曲げが顕著となり終局となっている。

5. 荷重-変形関係

荷重-変形関係の解析結果を、柱筋比が約0.75%の PW2, CW2について図7に、柱筋比約1.5%の試験体について図8に示す。実験については、4サイクルの正負繰返し载荷を受けた場合の正の包絡線を図に示す。また、CW1 と同タイプの試験体(東大の実験)の実験結果を CW1'として図8に示す。CW1では初期剛性から、モデル化を試みた打ち継ぎ面の破壊が顕著である $P=55tf$ 付近までの実験との対応は良好であるが、それ以後はあまり良好とはいえない。この理由としては、CW1 はせん断破壊型であるため壁面の斜めひびわれ発生後、壁筋が降伏し終局に至るはずであるが解析では壁筋の降伏が多少遅れるため剛性低下が顕著には生じないこと、及び、壁面のひびわれ面での壁筋の付着特性のモデル化の問題などが考えられる。

CW2 では実験結果とほぼ一致し良い対応が得られた。

CW3 では、柱と壁のすべり、開きがかなり顕著なのに対し、斜めひびわれの開口は顕著ではなく、増設壁の中では剛性、耐力共に小さいが、変形性能はかなり良好である。

CW4 は $P=50tf$ まで実験結果とかなり良い対応を示

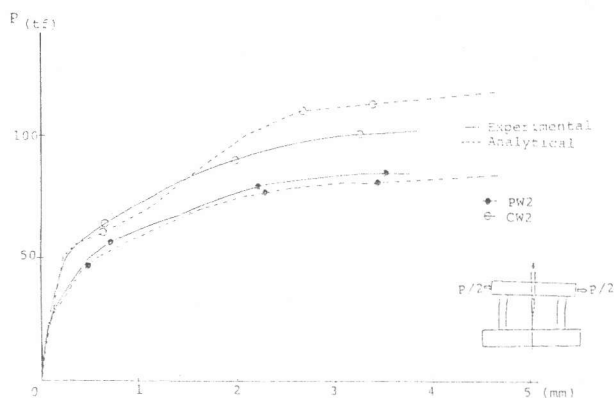


図7 荷重-変形曲線(PW2,CW2)

表3 諸現象発生荷重

	CW1	CW2	CW3	CW4	PW1	PW2	FR
Flexural Crack	20 (20)	40 (30)	20	30 (32)	20 (30)	10 (30)	5
Shear Crack	36 (30)	30 (30)	30	40 (50)	50 (50)	50 (50)	5

() Test Result Unit(tf)

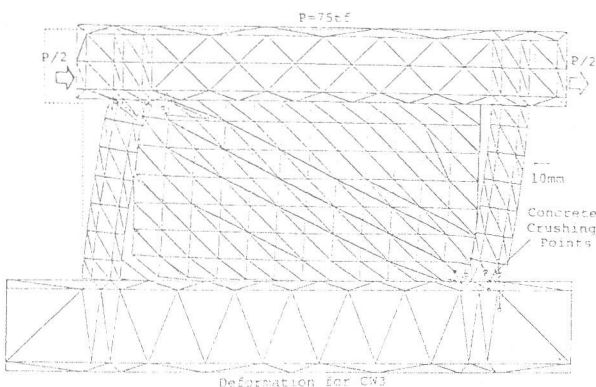
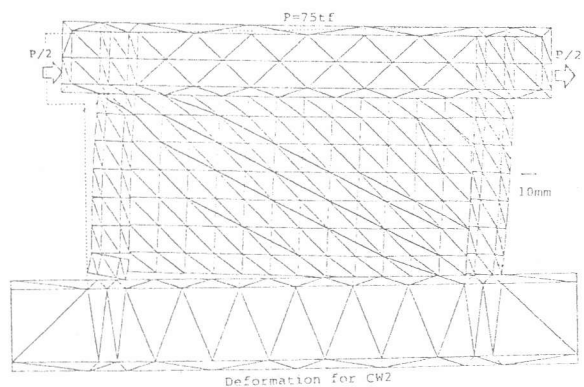
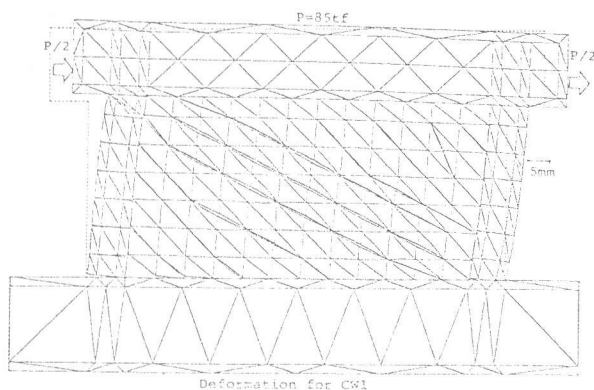


図6 変形図

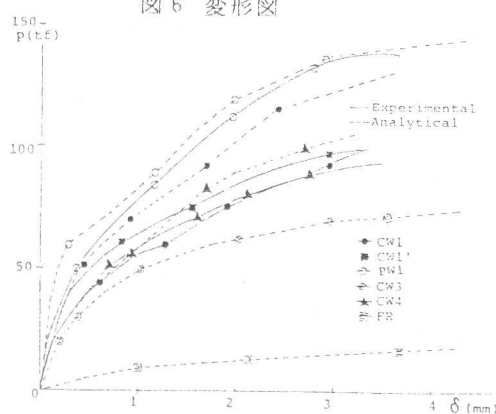


図8 荷重-変形曲線(PW1,CW1,CW3,CW4,FR)

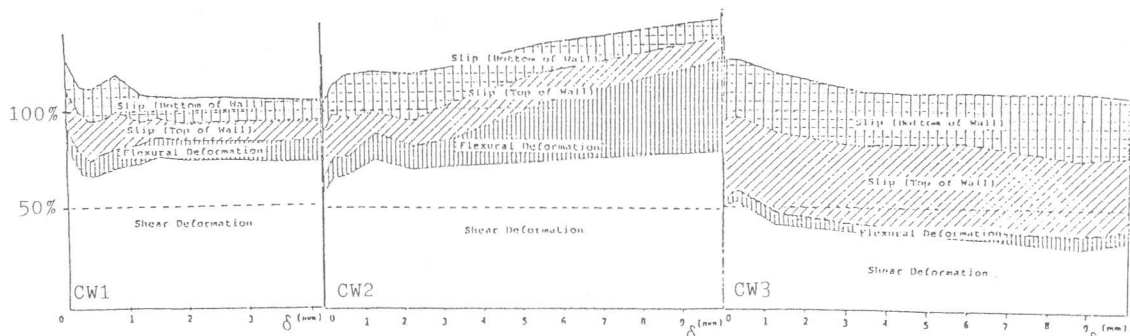


図9 曲げ変形、せん断変形、壁とはり、基礎との滑り変形量の水平変位量に対する割合の変化しているが、それ以後解析の剛性低下の方が実験よりやや遅く生じて差がみられる。

PW1 では低荷重で実験結果と多少の差はあるが、斜めひびわれがほぼ全数開口する $P=60\text{tf}$ 付近から良好な対応を示す。

PW2 は $P=90\text{tf}$ 付近まで良好な対応を示すがそれ以後は多少の差が生じている。これは実験と解析で破壊モードがやや異なることによるものと思われる。

FR は剛性、耐力共にかなり低めだが、良好な変形性能を示している。

6. 各変形量の割合

図9に CW1~3 の解析結果における、水平変位に対する、柱の伸び縮みによる曲げ変形、壁体の対角線伸び縮みによるせん断変形、壁とはり、及び基礎との滑りによる変形量の割合を縦軸に、水平変位を横軸に示す。曲げ破壊型の CW2 では、水平変位が増大するに従い曲げ変形の割合がかなり増大している。また CW3 では、上下各すべり変形の割合が CW1、CW2 に比べてかなり大きく、終局までその割合が変わらない。この傾向は実験結果とも概ね対応している。

7. 打ち継ぎ面での水平すべり分布

図10に CW1~4の解析結果における、上下はりとの打ち継ぎ面におけるすべり分布を示す。曲げ破壊型の CW2 で、 $P=40\text{tf}$ では CW1 と同様だが、 $P=80\text{tf}$ ではすべり量が増大し、CW4 よりも多くなることが特徴的であり、試験体の破壊形式がすべり量にかなり影響を及ぼすことがわかる。

8. 結 び

増設耐震壁の打ち継ぎ部分のモデル化を試みた解析例は今までに殆どなかったが、本研究では最近のダボ接合部実験データを基にして詳細なモデル化を試み、増設耐震壁の非線形解析の結果と実験結果の比較を行った結果、この打ち継ぎ面のモデル化の検証ができ、ダボ接合部が増設壁の耐力と変形性能に与える影響や破壊経過等についてのより細かな検討が可能となった。

その結果、打ち継ぎ面のダボ方向の破壊経過が全体の耐震壁の挙動に大きな影響を与えること、また耐震壁の破壊形式が決まってくるとダボ方向の部分的な破壊は全体の挙動にあまり影響を与えなくなること、ダボ筋は打ち継ぎ面の特に壁と柱の開きを抑え、増設壁が既存フレームと一体になるのに有効で、ダボ作用のみならず、引張にも有効となることがわかった。

しかし、第6章でも述べた様に壁筋の降伏が遅れること等、付着特性等の与え方などにまだ問題が多く、また靱性面からの検討も必要となってくる。今後も研究を進め、これらの問題を解明したいと考えている。

なお、数値計算には東大大型計算機センター S 8 1 0 を用いた。

- 参考文献 1) 黒正清治、林野雄、横 正則、「後打ち鉄筋コンクリート耐震壁の性状に及ぼす接合部の影響に関する研究」、日本建築学会関東支部研究報告集、昭和53年。
2) Darwin, D. and Pecknold, D. A., "Nonlinear Biaxial Stress Strain Law for Concrete," ASCE, Vol.108, No.EM2, April 1977.
3) Kupfer, H.B. and Gerstle, K.H., "Behavior of Concrete under Biaxial Stresses," ASCE, Vol.104, No.EM4, Aug. 1973.
4) 森田司郎、角 徹三、「繰返し荷重下における鉄筋とコンクリート間の付着特性に関する研究」、日本建築学会論文報告集、第229号、昭和50年3月。
5) 野口 博、長沼一洋、「繰返し荷重を受けるRC部材のせん断解析モデル」、「繰返し荷重を受けるRC柱・はり接合部の非線形解析」、第2回せん断解析コロキウム論文集、JCI-C5、1983年10月。

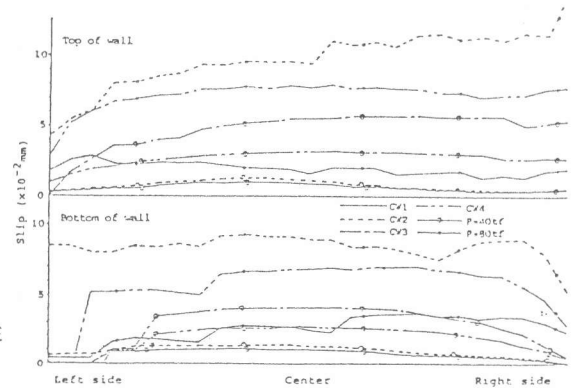


図10 打ち継ぎ面の滑り（解析）

- 6) 細川洋治、塩原 等、青山博之他、「鉄筋コンクリート造梁・骨組境界面の直接せん断伝達機構」、JCI第5回年次講演会、1984年6月。
7) 野口 博、落合正雄、堀川孝助、「鉄筋コンクリート耐震壁のひびわれ面のせん断伝達機構に関する研究」、JCI第3回年次講演会、1981年6月。
8) 野口 博、丹羽 亮、竹内正博他、「樹脂アンカーを用いた増設RC耐震壁のダボ接合部のせん断実験」、「増設RC耐震壁の耐力と変形性能に与える樹脂アンカーのディテールの効果に関する実験的研究」、日本建築学会大会、昭和58年9月。
9) 藤原英雄、青山博之、加藤大介、「増設RC耐震壁の強度と変形性能の評価に関する実験的研究」、日本建築学会大会、昭和58年9月。