

論文 破壊力学に基づく耐震壁のせん断耐力解析

松岡 茂*1・益田彰久*2・土井至朗*3

要旨：鉄筋コンクリート部材及び壁部材で発生するせん断破壊を解析することを目的に破壊力学に基づく解析モデルを作成した。この解析モデルでは、ひび割れ面で生じる引張応力の軟化とせん断剛性をひび割れ開口幅の関数としてモデル化した。さらに、大型供試体を用いた実験結果を提案した解析モデルで計算し、その適用性について検討を行った。

キーワード：引張軟化曲線、分布ひび割れモデル、せん断、破壊力学

1. はじめに

コンクリートのひび割れ発生・進展を追跡する手法として破壊力学が有効であることが知られており、破壊力学の考え方に基づいてRC部材の解析が行われている。鉄筋コンクリート部材の代表的な破壊形態の一つであるせん断破壊については、ひび割れ面でのせん断伝達と引張剛性の軟化を考慮する必要があることが報告されている[1]。そこで、鉄筋コンクリートのせん断破壊を追跡することを目的として、ひび割れ面でのせん断伝達と引張応力の軟化を考慮した解析モデルを作成した。この解析モデルでは、ひび割れ面でのせん断伝達はひび割れ開口幅に依存するものと仮定した。この解析モデルを用いて、せん断破壊により最終変位が決定される耐震壁の解析を行った。

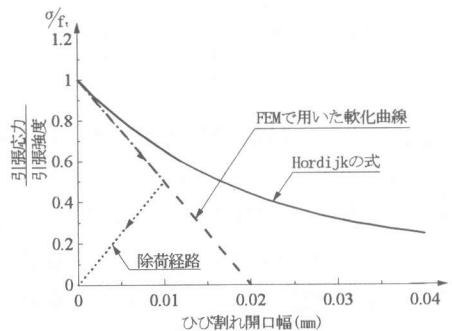


図-1 引張軟化曲線

2. 解析概要

解析では、仮想ひび割れモデルの概念を分布ひび割れに適用した Dahlblom ら[2] が提案したモデルを用いた。コンクリートの引張軟化特性は、図-1に示すような直線モデルを用いた。この解析に用いた引張軟化曲線の勾配は、Hordijk[3]が提案した引張軟化特性の軟化開始時の接線勾配とした。引張軟化特性である図-1の引張軟化曲線は、内田ら[4] が提案しているものと同様に要素のひび割れ方向の投影長さである等価長さを用いて引張応力とひずみの関係に変換している。

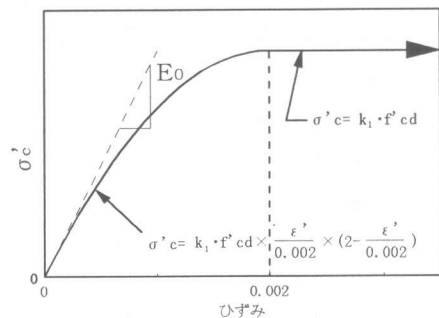


図-2 応力-ひずみ曲線

*1 鉄建建設(株) エンジニアリング本部技術研究所 (正会員)
 *2 鉄建建設(株) エンジニアリング本部技術研究所 (正会員)
 *3 鉄建建設(株) エンジニアリング本部技術研究所 (正会員)

また、解析では、ひび割れが閉じる方向に変位が生じた場合には、図に示すように原点を指向する除荷経路を取るものとした。

圧縮側の応力-ひずみ関係は、図-2に示すように最大圧縮応力までは二次曲線で表され、それ以降は最大応力を保持した状態でひずみが増加するものとした。除荷経路については図に示すように初期接線剛性 E_0 に従うものとした。なお、ひび割れが発生する前の引張応力-ひずみの関係についても初期接線剛性 E_0 に従うものとした。コンクリートは、Drucker-Pragerの降伏曲面に従うものとして解析を行った。解析では、最大主応力(引張側が正)がコンクリートの引張強度に達した時点で最大主応力方向と直交方向にひび割れが発生するものとし、ひび割れが発生した要素では最大主応力方向は図-1に示す引張軟化曲線に従い、最小主応力方向はひび割れ発生前の応力-ひずみ関係に従う直交異方体要素とした。なお、解析に使用した要素は平面応力条件下の四辺形アイソパラメトリック要素とした。鉄筋の応力-ひずみ関係は、降伏点以降の勾配を零とした完全弾塑性モデルとした。なお、鉄筋を曲げを負担しないものとしてモデル化したトラス要素の節点は、コンクリートをモデル化した要素の節点と共通とした。

ひび割れ面でのせん断伝達は、ひび割れ開口幅に依存するものと仮定し、ひび割れが発生した要素のせん断剛性は式(1)により表されるものとした。

$$G = \beta \frac{E_c}{2(1-\nu)} \quad \text{式(1)}$$

ここに、 G ：ひび割れ発生要素のせん断剛性、 E_c ：コンクリートの弾性係数、 β ：せん断剛性保持率、 ν ：コンクリートのポアソン比である。ひび割れ発生により、せん断伝達の低下を表す指標としてせん断保持率を定義した。解析では、せん断剛性保持率は図-3に示すようにひび割れ開口幅が増加するのに伴って減少するものと仮定し、せん断剛性保持率は式(2)により表されるものとした。

$$\begin{aligned} 0 \leq w \leq 0.15\text{mm} \\ \beta = 1 - 6w \\ 0.15\text{mm} < w \\ \beta = 0.015/w \end{aligned} \quad \text{式(2)}$$

ここに、 w ：ひび割れ開口幅である。

コンクリート構造物で発生するひび割れの局所化を考慮するためには、ひび割れが発生した要素の引張特性が図-1に示す引張軟化曲線状にあるのか、あるいは除荷経路に

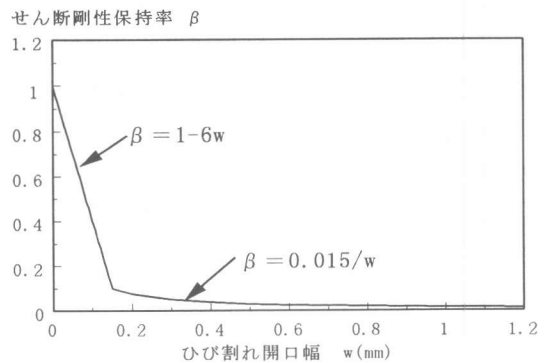


図-3 せん断剛性保持率

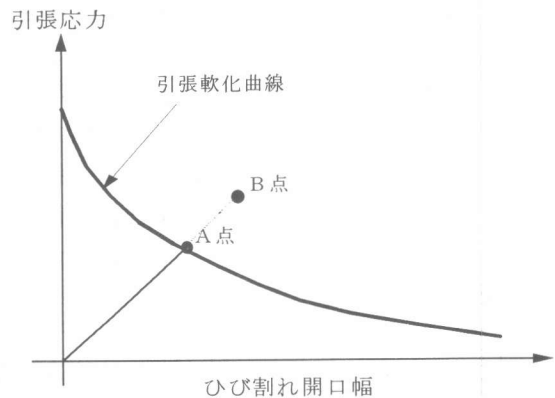


図-4 ひび割れの局所化

あるのかを判定する必要がある。本解析モデルでは、ひび割れが発生した要素の多くが除荷経路に分岐することに注目してひび割れの局所化を考慮した。あるひび割れ発生要素の最大主応力が図-4に示す引張軟化曲線上のA点にあるとした場合、次のインクリメントの計算では、ひび割れが発生した要素はすべて除荷経路に分岐したものとして解析を行う。このインクリメントの計算結果で図-4に示すように最大主応力が引張軟化曲線外に位置する要素のみ引張軟化曲線上にあるものと判断して、再度同一のインクリメントの計算を行った。各インクリメントで前述のような繰り返し計算を行うことによりひび割れの局所化を考慮した。

分布ひび割れモデルでは要素分割方向の相違により、ひび割れ発生状況および最大荷重以降の変位挙動が影響を受けることが知られているが、ひび割れの局所化を考慮することにより要素分割等の影響を少なくすることができる。そこで、本研究の解析モデルに対する要素分割方向の影響を把握する目的で、図-5に示す要素分割方向および要素寸法を変化させて解析を行った。解析は、図に示すようにモデル下面に引張力を与え、引張ひび割れが下面から発生・進展するモデルである。図-5(a)は、ひび割れ面と直交して要素分割したものであり、(b)の要素分割はひび割れ面に対して45度の方向に分割したものである。また、両者の要素分割では要素寸法を変えている。なお、両者の引張軟化曲線は同一のものを用いた。

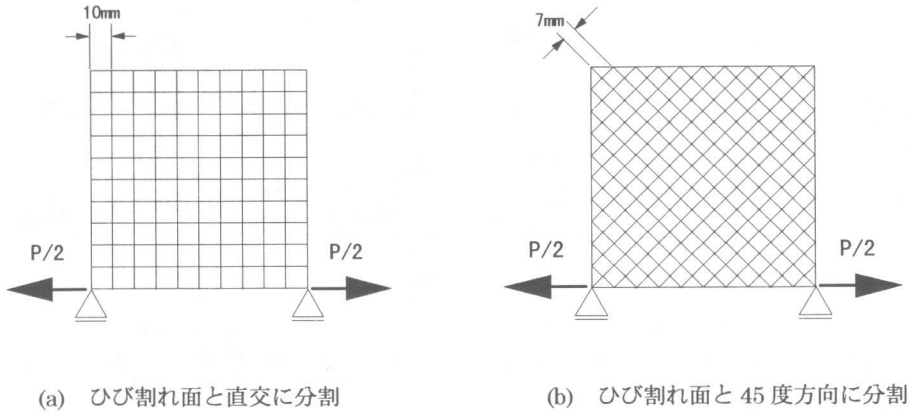


図-5 要素分割図

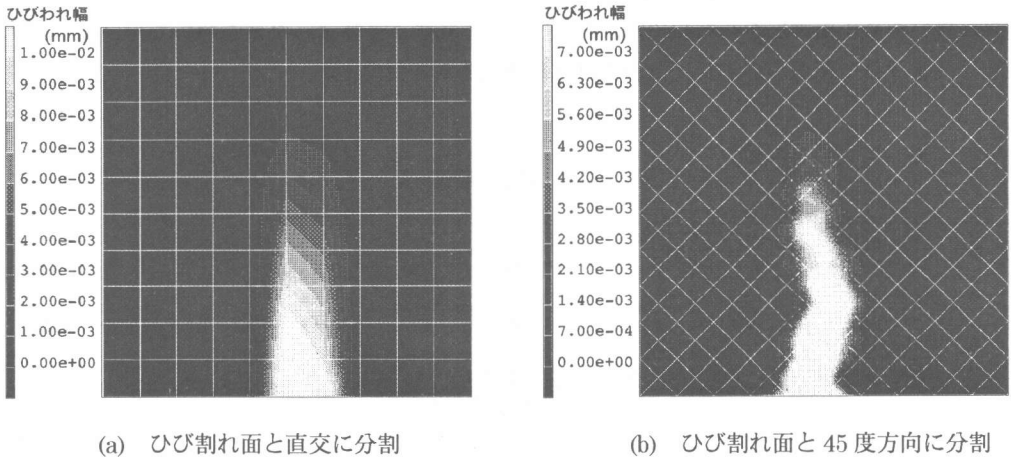


図-6 解析結果

解析では引張軟化曲線の除荷経路を考慮しているために、ひび割れは図-6に示すよう(b)の分割では要素に沿ってジグザグに発生しているが、巨視的には(a)の分割と同様にひび割れは局所化している。荷重とひび割れ開口幅との関係についても図-7に示すように(a)と(b)の分割ではほぼ一致している。これらのことから、使用した解析モデルでは要素分割方向による影響は小さいものと判断される。要素寸法が違う(a),(b)の解析結果の荷重-変位曲線はほぼ一致していることから、本論文で用いている解析モデルの引張特性は要素寸法に対しても依存性が少ないものと考えられる。なお、解析結果のひび割れ発生状況は、最大主ひずみから等価長さを考慮して開口幅に変換表示している。

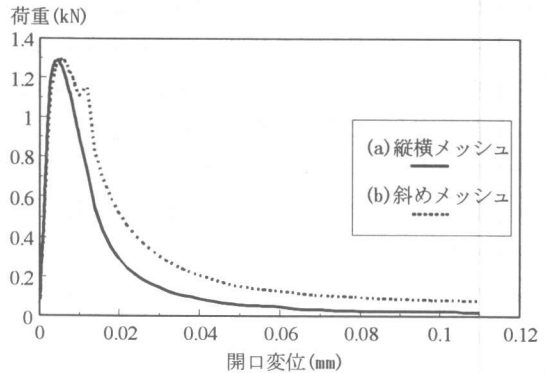


図-7 要素分割の違いによる荷重とひび割れ開口幅の関係

解析モデルの引張特性は要素寸法に対しても依存性が少ないものと考えられる。なお、解析結果のひび割れ発生状況は、最大主ひずみから等価長さを考慮して開口幅に変換表示している。

3. 耐震壁の解析

市川ら[5]は、鉄筋コンクリート構造の建物の耐震性を検討する目的で2層耐震壁の載荷実験を行っている。この耐震壁の実験は、図-8に示すように一定軸力を供試体に載荷した状態で頂部に取り付けたジャッキにより交番載荷を行ったものである。2層耐震壁の実験を本解析モデルにより計算を行った。表-1に供試体の諸元を、表-2に供試体で用いた各材料の強度試験結果と解析で用いた力学特性を示す。コンクリートの引張強度については、試験結果が無いため圧縮強度から岡村[6]が提案している式により算定した値を解析で用いた。なお、実験は交番載荷であるが、解析では荷重は単調増加として計算した。

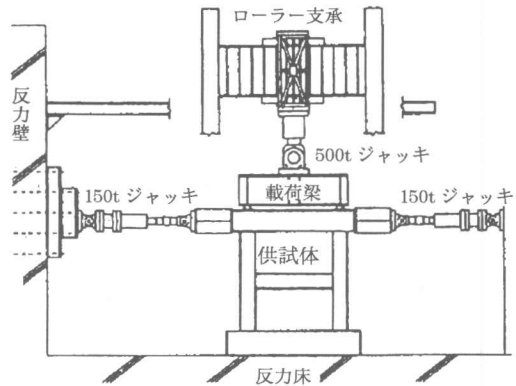


図-8 載荷装置

試験結果が無いため圧縮強度から岡村[6]が提案している式により算定した値を解析で用いた。なお、実験は交番載荷であるが、解析では荷重は単調増加として計算した。

表-1 供試体諸元

柱	b×D(cm)	35×35
	主筋(pg,%)	8-D16(1.30)
	帯筋(pw,%)	D6 @50(0.37)
梁	b×D(cm)	20×35
	主筋(pg,%)	3-D16(0.96)
	帯筋(pw,%)	D6 @100(0.32)
壁	壁厚(cm)	12
	壁筋(ps,%)	D6 @110ダブル(0.48)

表-2 材料の強度試験結果

鉄筋径	降伏強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	備考
D16	690	1.78×10 ⁵	882	柱主筋
D16	409	1.75×10 ⁵	576	梁主筋
D6	353	1.76×10 ⁵	511	帯筋、肋筋
D6	420	1.89×10 ⁵	545	壁筋

コンクリートの 圧縮強度(N/mm ²)	1層	2層
		24.9

図-9に載荷点変位と荷重の関係を示す。解析結果によると載荷点変位 1.1mm 付近で耐震壁に斜めひび割れが発生し、この時の水平荷重は約 500kN であった。実験においても水平荷重が 500kN 付近で耐震壁に斜めひび割れが発生しており、解析結果とほぼ一致している。しかしながら変位については実験結果（約 1.7mm）に較べて解析結果は多少小さくなっている。最初に斜めひび割れが耐震壁に発生した状態を図-10に示す。実験結果では、交番載荷を行っているためにほぼ左右対称に斜めひび割れが発生しているのに対して、解析では荷重を単調増加させているために斜めひび割れは片側のみとなっている。しかしながら、解析結果のひび割れ発生状況は実験で観察されたものとほぼ一致している。

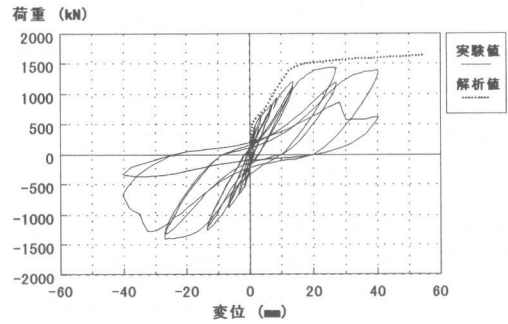


図-9 載荷点変位と荷重

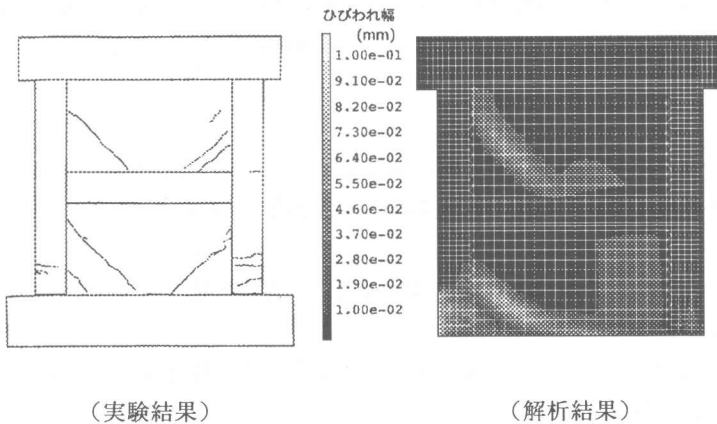


図-10 最初のひび割れが発生した状態

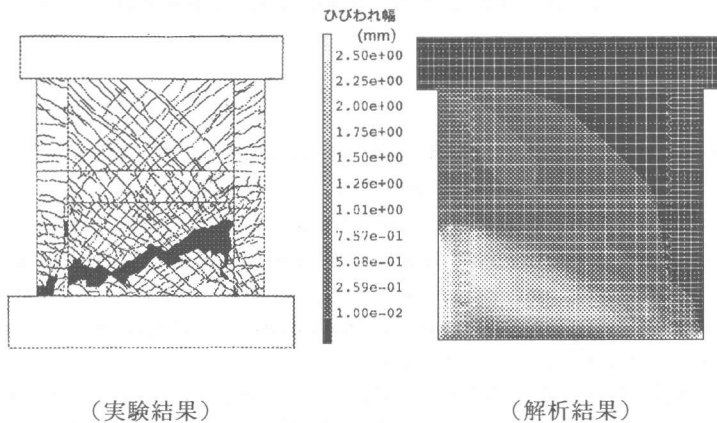


図-11 耐震壁の斜めひび割れ発生位置

さらに、水平変位を増加すると解析では耐震壁に複数のひび割れが発生し、柱部分にも部材軸に

直交方向に複数のひび割れが発生した。解析結果によると荷重が約 1500kN に達した以降は、載荷点変位が増加しても荷重はほとんど一定であった。また、載荷点の水平変位が 50mm を越えた付近で、1 層耐震壁の斜めひび割れが柱を貫通し、さらに斜めひび割れ開口幅が 2mm 以上となったことにより、1 層耐震壁のせん断剛性がほとんど無くなったために計算を継続することができなくなった。実験結果では、載荷点変位が 40mm 付近で図-11 に示すように 1 層耐震壁に発生した斜めひび割れが拡大して急激に荷重が低下した。実験および解析結果ともに耐震壁の耐力は、1 層耐震壁に発生した斜めひび割れにより決定されている。耐力を決定している 1 層耐震壁の斜めひび割れ発生位置は、図-11 に示すように解析と実験結果はほぼ一致している。また、図-11 に示すように解析結果では 1、2 層に実験結果と同様に複数のひび割れが発生した。しかしながら、実験で荷重が急激に低下する変位と解析で計算を継続することができない変位は異なっている。この原因としては解析では荷重が単調増加しているものとしているため、繰り返し荷重による引張応力の低下や残留ひびわれ開口幅等の影響を考慮していないためであると推定される。

本論文で提案した解析モデルを用いることにより、せん断破壊により耐力が決定される 2 層耐震壁のひび割れ発生および最終的な破壊状態を推定することができる。しかしながら、実験で耐力が急激に低下する最終変位量については、解析結果は大きめの値となっている。

4. まとめ

ひび割れ面でのせん断伝達をひび割れ開口幅に依存するものとし、引張軟化曲線を考慮した解析モデルによりせん断破壊により耐力が決定される 2 層耐震壁を計算した。その結果をまとめると次のようになる。

- ①本論文で提案した解析モデルにより、ひび割れ発生位置等の破壊プロセスと耐震壁のせん断破壊面を推定することができる。
- ②最終的な変位量については、実験より解析では多少大きめの値となるが、荷重-変位曲線と最大荷重は実験とほぼ一致している。

以上のように、本論文で提案した解析モデルはせん断破壊が生じる耐震壁の解析に有効であると考えられる。しかしながら、ひび割れ面でのせん断伝達を表すせん断剛性保持率については、今後部材試験等により確認する必要がある。

参考文献

- [1]Rots, J. G., Nauta, P., Kusters, G. M. A. and Blaauwendraad, J. : Smearred Crack Approach and Fracture Localization in Concrete, HERON, Vol.30, No.1, 1985
- [2]Dahlblom, O. and Ottosen, N. S. : Smearred Crack Analysis Using Generalized Fictitious Crack Model, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol.116, No.1, pp.55-76, 1990
- [3]Hillerborg, A., Modeer, M. amd Petersson, P.E. : Analysis of Crack Formation and Crack Growth in Concrete by Means of Fracture Mechanics and Finite Elements, Cement and Concrete Research, Vol. 6, pp.773-782, 1976
- [4]内田裕市、六郷恵哲、小柳 治：仮想ひび割れモデルを組込んだ分布ひびわれモデルによるコンクリートのひびわれの有限要素解析、土木学会論文集V, pp.79-88, 1993
- [5]市川昌和、今津賀昭、森本 仁、松崎育弘：ダブルハーフ Pca 板を用いた Pca 耐震壁に関する実験研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol. 17, No. 2, pp. 273-278, 1995
- [6]岡村 甫：コンクリート構造物の限界状態設計法、共立出版、pp. 17-18, 1984