

論文 低軸力下の曲げ降伏後の大変形繰り返し載荷により発生する曲げ破壊性状

高柳美佐子*1・衣笠秀行*2

要旨：RC柱部材の曲げ降伏後の曲げ破壊には、一般に作用せん断力は影響を及ぼさないとされている。本研究では、曲げせん断試験体と純曲げ試験体を作成し、低軸力下の大変形繰り返し載荷を行ったときの破壊性状の比較を行った。その結果、ヒンジ領域の破壊の進行に、作用せん断力の大きさが少なからず影響を与えることが確認された。せん断力が作用する試験体では、コアコンクリート内に斜めひび割れが発生する。その斜めひび割れは、載荷を繰り返すことによってかみ合いを劣化させ、最終的に試験体が軸ズレを起こし、破壊に至る。

キーワード：RC柱部材, 低軸力, 大変形繰り返し載荷, 破壊メカニズム, せん断力

1. はじめに

これまで、低軸力下におけるRC柱部材の曲げ降伏後の大変形繰り返し載荷により発生する曲げ破壊は、ヒンジ領域に作用するせん断力の大きさの影響を受けず、曲げモーメントによるコアコンクリートの圧縮破壊によって引き起こされると考えられてきた。しかし本研究では、繰り返し載荷時の曲げ破壊に、せん断力が

影響を及ぼすことを実験的に示し、低軸力下における大変形繰り返し載荷時の破壊メカニズムの解明を試みた。

2. RC柱部材の繰り返し載荷実験

2.1 実験概要

部材断面20×20(cm)のRC柱部材で、曲げせん断載荷を行う試験体A(A1:単調載荷, A2:

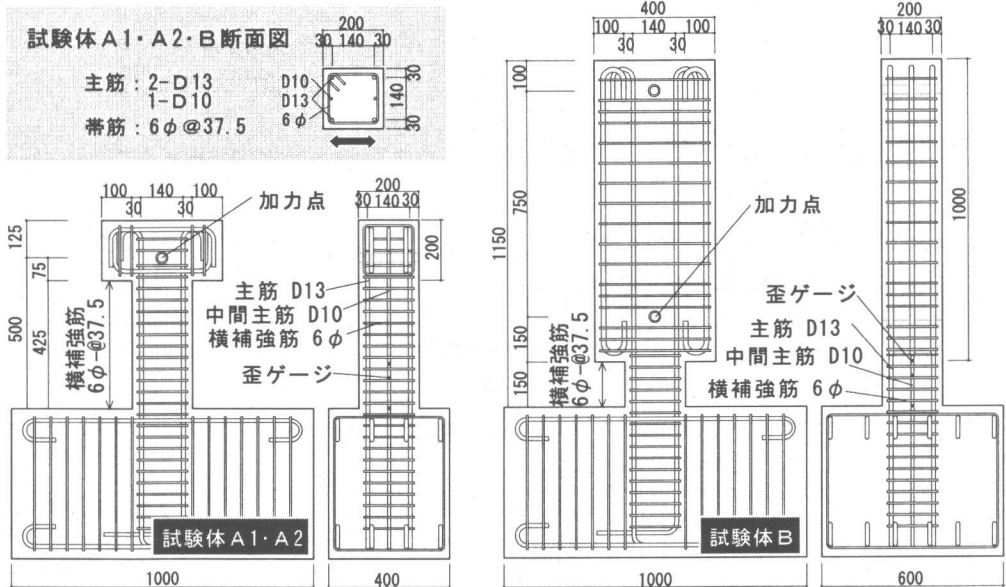


図1：試験体形状および配筋図

*1 東京理科大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (正会員)

*2 東京理科大学助教授 理工学部建築学科 工博 (正会員)

繰り返し載荷)と純曲げ繰り返し載荷を行う試験体Bの計3体作成した。試験体形状・配筋詳細図を図1に示す。載荷方法は、図2(a)に示すように試験体Aはスタブをピン固定、下部をローラーとしてローラー部分を載荷している。試験体Bは図2(b)のようにスタブ上端をピン固定、試験体下部をローラーとし試験体端部から300(mm)の位置を載荷することにより、同図中の曲げモーメント図に示すように、試験区間が純曲げとなる載荷を行っている。試験区間は、試験体Aは試験体端部より425(mm)、試験体Bは150(mm)である。試験体A・Bともに試験区間は同一配筋で、曲げ破壊させるため、曲げ耐力と比較しせん断耐力は十分大きくしてある。コンクリート強度は、試験体A1は33.3(N/mm²),

試験体A2は38.6(N/mm²)で、試験体Bは33.8(N/mm²)である。使用した鉄筋の材料特性を表1に示す。軸力は4.4(N/mm²)であり、軸力比は試験体A1, A2が0.13, 試験体Bが0.11である。

載荷履歴は、試験体A1は一方向単調載荷、試験体A2と試験体Bは変形角±12, ±24/1000radで繰り返しした後、試験体A2は±50/1000radから±3/1000radピッチで変形角±70/1000radまで漸増繰り返し載荷を行い、試験体Bは変形角±50/1000radの定変位繰り返し載荷を行った。繰り返し回数は10サイクルである。

なお、試験体A2と試験体Bは異なる載荷履歴であるが、今回の研究の目的は破壊の度合いではなく、破壊性状と破壊の発生メカニズムを比較検討することにあるので、以後の考察を行う上で特に問題はないと思われる。

表 1 : 鉄筋材料特性

鉄筋	降伏強度 (N/mm ²)	最大強度 (N/mm ²)	ヤング係数 (×10 ⁵ N/mm ²)
6φ	279.0	454.7	1.99
D10	328.3	464.1	1.73
D13	319.7	461.8	1.91

2.2 変形挙動の測定

図3のように試験体スタブに取り付けた変位計から、図4のように変形角Rを定義する。また、破壊の集中するヒンジ領域の変形挙動を把握

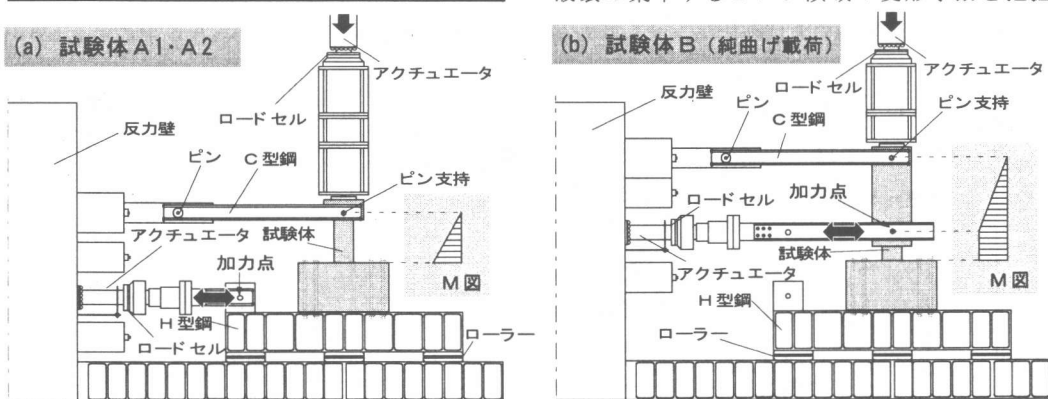


図 2 : 載荷装置概要

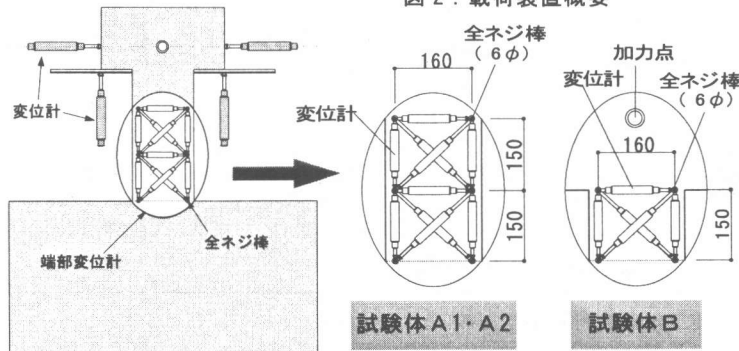


図 3 : 変位計取り付け位置

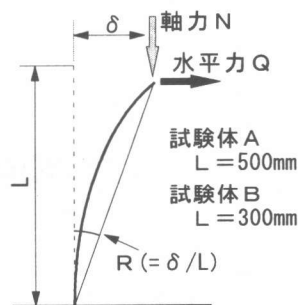


図 4 : 変形角 R

するため試験体Aは試験体端部から150(mm)と300(mm)の位置に、試験体Bは試験体端部から150(mm)の位置にのみ、全ネジ棒(6φ)を埋め込み(図3参照)、その全ネジに取り付けた変位計により試験体両側で相対変位を計測した。

3. 変形能力の比較

低軸力下の一方向単調荷を受けた試験体A1と大変形繰返し荷を受けた試験体A2・試験体Bの端部曲げモーメントMと変形角Rの関係を図5に示す。図5(1)より、一方向単調荷を受けた試験体A1は、変形角160/1000radまで耐力低下せず、十分な変形能力を有していることが確認できる。160/1000radは荷装置のストロークの限界である。一方、図5(2)に示す繰返し荷を受ける試験体A2では、変形角±60/1000rad付近の第7サイクル以降急激に耐力低下を起こしている。このように、試験体Aは一方向単調荷時には十分な変形能力を有しているにも関わらず、繰返し荷時には変形能力を著しく低下させることが確認できる。また、試験体Bも第7サイクル以降耐力低下をおこしている。

最近、RC柱部材の変形能力評価に関する理論的研究¹⁾が発表されるようになった。そこでは、一定軸力下のRC柱における限界変形と軸力比との関係の評価式が提案されている。これによると、一定軸力下のRC柱部材は軸力比が0.3よりも大きければ、単調荷時の変形能力に比べて繰返し荷時の変形能力は劣るが、軸力比0.3以下の低軸力下では、繰返し荷時でも単調荷時と同等の変形能力を有するとしている。しかし、本研究における軸力比0.15程度の低軸力下の実験では、単調荷時に比べ繰返し荷時には著しく変形能力を低下させている。変形能力評価に関する理論的研究は、RC柱部材の曲げ破壊がせん断力の影響を受けないという純曲げ下の理論に基づいて成り立っているものである。本実験における試験体A1, A2の変形能力の差は、せん断力の影響を受けて生じた可能性がある。本研究では、その大変形繰返し荷時に発生する破壊の発生メカニズムと、破壊の進行に対する作用せん断力の影響について検討していくことにする。

4. 破壊性状の比較

4.1 破壊状態

図6に、試験体A2と試験体Bの実験終了後の破壊性状図を示す。この破壊性状図から、試験体A2における破壊が試験体端部から150(mm)以内に集中していることが確認できる。また、図中の太点線で示すように、試験体A2と試験体Bにおける、実験終了後のヒンジ領域の変形性状が明らかに異なっていることがわかる。試

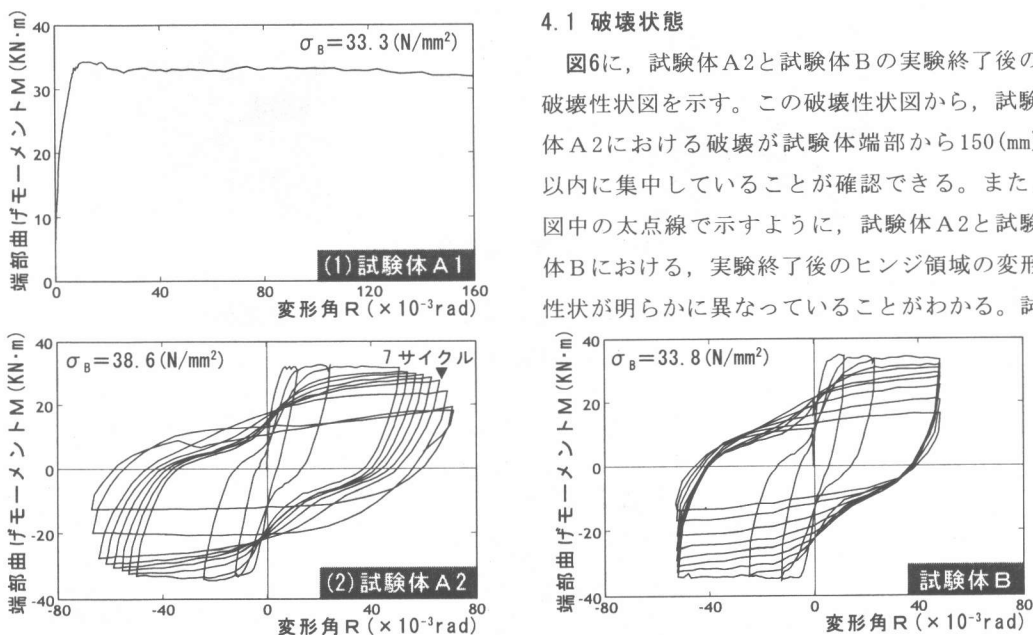


図5: 端部曲げモーメントM-変形角R関係

験体A2は、最終的に大きなせん断変形を起こしているように見える。

4.2 端部回転角 θ の挙動

図7に試験体A2と試験体Bの端部回転角 θ の振幅（図10参照）を変形角Rの振幅で除した値とサイクルの関係を示す。ここで端部回転角 θ は、図8に示す通り試験体端部から150(mm)の位置に取り付けた全ネジの座標から求めた。

比較のため図7に、試験体A2と同一配筋・同一形状で軸力ゼロの繰り返し載荷を行った試験体C（P-R関係は図7右下参照）の値を示す。試験体Cは明らかに、いわゆる曲げ降伏後のせ

ん断破壊した試験体で、変形性状は図6の試験体A2とほぼ同じである。図7より、曲げ降伏後のせん断破壊を起こした試験体Cでは、著しい耐力低下の生じた第4サイクルから、せん断変形成分の増加のためにR振幅に対する θ 振幅の比率は急激に減少している。一方試験体A2の端部回転角 θ の振幅と変形角Rの振幅の比率は減少していない。試験体A2は純曲げ載荷した試験体Bと同様に、破壊が進行してもせん断変形成分は大きくならず、変形角Rに見合った端部回転角 θ が、最後まで曲げ変形により発生したと考えられる。以上のことから図6の破

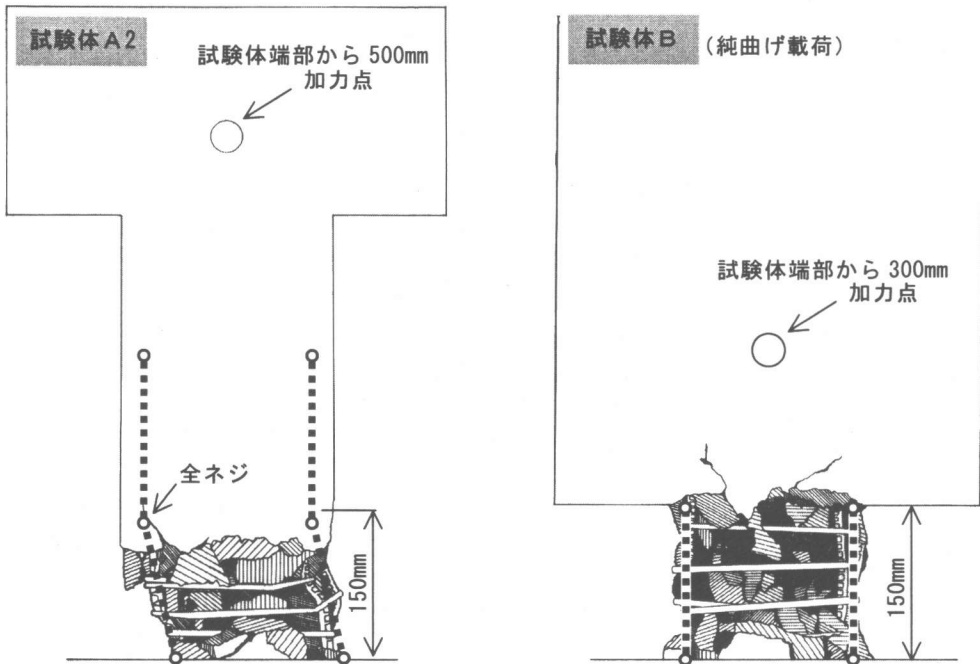


図6：実験終了後破壊性状図

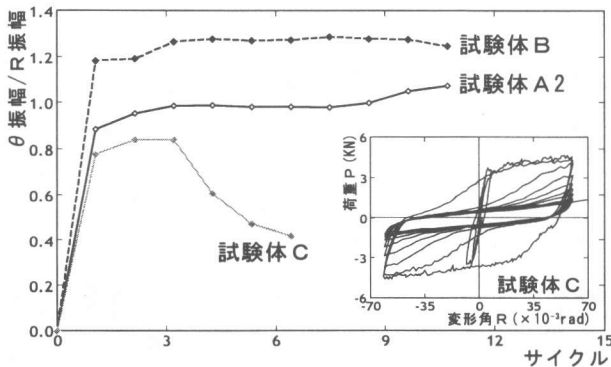


図7：端部回転角 θ 振幅/変形角R—サイクル関係

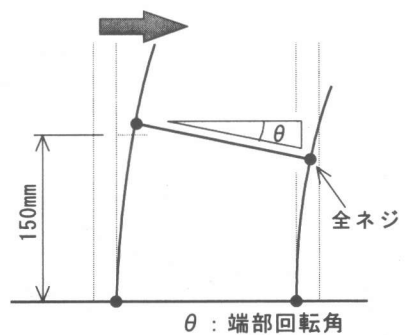


図8：端部回転角 θ

壊性状図における試験体A2と試験体Bの変形性状の違いが、曲げ破壊とせん断破壊の違いによるものではないと判断できる。

4.3 端部回転角 θ の振幅のズレ挙動

試験体A2と試験体Bにおける、端部回転角 θ の振幅ズレDを振幅で除した値の推移を図9に示す。なお、 θ 振幅のズレDと θ 振幅を、図10のように定義する。図9に示すように、試験体A2の θ 振幅のズレDは第7サイクルまではほぼゼロであるが、第8サイクル以降正側に急激な増加を示している。試験体A2はサイクルが増すに従って、試験体が軸ズレを起こしていると考えられる。図6の破壊性状図が示した試験体A2のせん断変形に似た変形は、せん断破壊によって発生したのではなく、軸ズレによって生じたことがわかる。それに対して純曲げ载荷した試験体Bは、サイクルが増しても θ 振幅のズレDは大きくなり、破壊性状図からもほとんど軸がずれていないことがわかる。

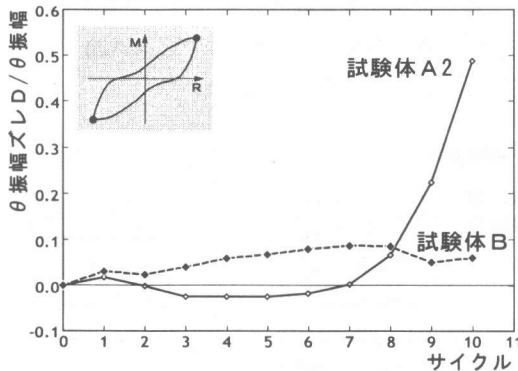


図9：端部回転角 θ 振幅ズレD—サイクル関係

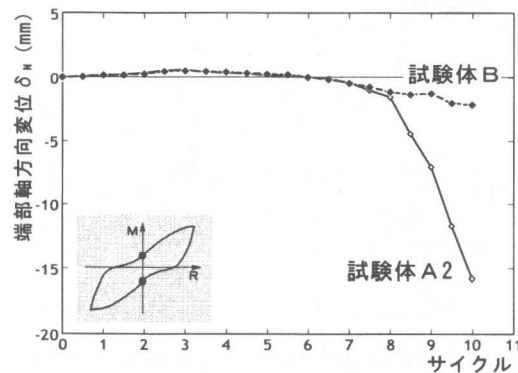


図11：端部軸方向変位 δ_N —サイクル関係

4.4 コアコンクリートの破壊挙動

4.1節で述べたように、試験体A2およびBの破壊は、試験体端部から150(mm)以内に集中している。図11に、変形角ゼロ時の端部軸方向変位 δ_N とサイクル関係を示す。ここで端部軸方向変位 δ_N は、図12に示すように取り付けられた変位計により測定、算出した。端部軸方向変位 δ_N は、両試験体とも第7サイクルまでは大きな変化が見られないが、試験体A2は第8サイクル以降、負側に急激に低下している。このことから、試験体A2は第8サイクルあたりからコアコンクリートが急激に破壊していったと考えられる。先に示した図9の回転角 θ の振幅ズレD / θ 振幅とサイクルの関係では、試験体A2は、これと同じ第8サイクル以降急激に軸ズレを起こしている。このことから、試験体A2の端部軸方向変位 δ_N の急激な低下、つまりコアコンクリートの急激な破壊は、図9に示す試験体の軸ズレの発生によって引き起こされたと推察される。

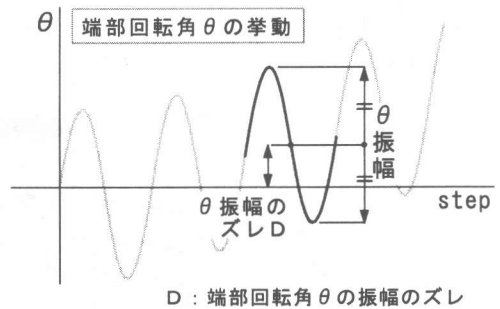


図10：端部回転角 θ 振幅ズレD概念図

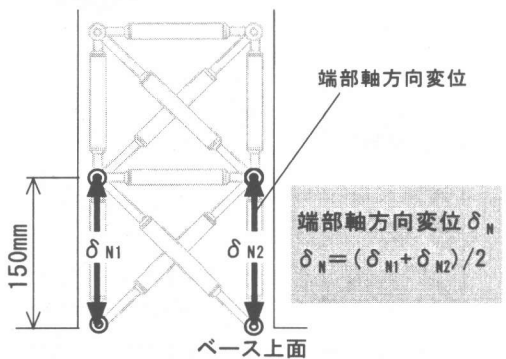


図12：端部軸方向変位 δ_N の計測と算出

5. 低軸力下繰り返し載荷を受けるRC柱部材の破壊メカニズム

試験体A2と試験体Bの破壊性状や破壊の進行状況は、明らかに異なっている。その違いが曲げ破壊とせん断破壊の違いによるものではないことは、4.2節ですでに示した。本実験中における、試験体の破壊挙動を目視により観察した結果、下記のようなことが推察される。試験体A2は純曲げ載荷である試験体Bとは異なり、せん断力を受けているため斜めひび割れが多く発生する。RC部材は繰り返し載荷を受けると、載荷の方向を変えるたびにひび割れの開閉が繰り返される。試験体Bのような純曲げ載荷を受ける試験体に入る水平のひび割れは、図13に示すように、載荷方向を変えたときのひび割れの開閉が比較的容易に行われるが、せん断力により発生した斜めひび割れの場合、繰り返し載荷することによってひび割れが開閉し、図14[a]のように試験体端部を中心に回転するような変形が生じる。それがさらに繰り返されると、斜めひび割れのかみ合いが劣化して、ひび割れの閉鎖が徐々に困難になる。それにより、

載荷の方向を変えたときに、図14[a]に示すような試験体端部を中心とした変形ができず、図14[b]のように、変形の中心が移動し、試験体が折れ曲がるような変形が生じる。その結果、図14[c]に示すような試験体の軸ズレが発生し、破壊に至ると考えられる。

6. まとめ

RC柱部材の低軸力下における曲げ降伏後の曲げ破壊時には、コアコンクリートの破壊の進行にせん断力が影響を与えることが確認された。せん断力が作用する試験体では、せん断力によってコアコンクリート内に斜めひび割れが発生する。その斜めひび割れは、載荷を繰り返すことによってかみ合いを劣化させ、最終的に試験体が軸ズレを起こし破壊に至ると推察される。

参考文献

- 1) 稲井栄一・平石久廣・葉研地彰:一定軸力下で曲げ破壊する鉄筋コンクリート造柱の設計用限界変形算定式 日本建築学会構造論文集 第536号 pp129-134 2000.10

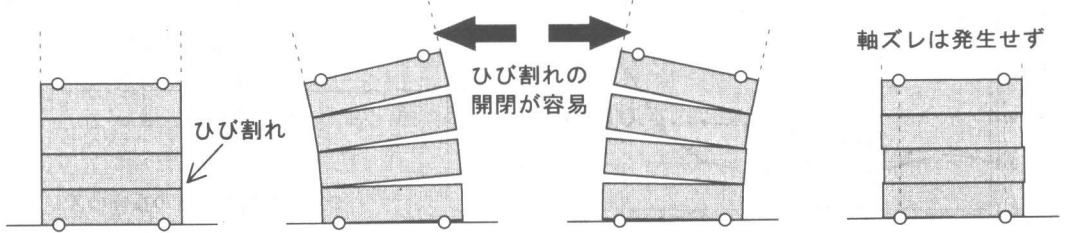


図13: 純曲げ載荷時におけるひび割れの開閉図

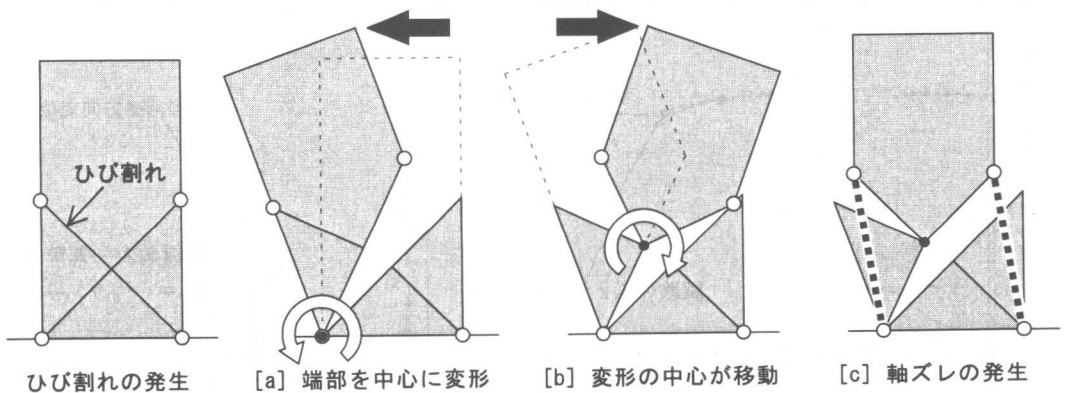


図14: 斜めひび割れの開閉による軸ズレ発生図