

論文 軸力と曲げ・ねじりの載荷周期が異なる R C 部材の履歴特性

大塚 久哲^{*1}・白石 昭寿^{*2}・宇山 友理^{*3}

要旨：本研究では，一般的な R C 橋脚をモデルとした模型供試体を作製し，R C 部材に軸力を変動させた状態でねじり荷重・曲げ荷重を交番載荷させる実験を行った。本実験は，軸力が変動する状態と軸力が変動しない状態での R C 部材の履歴特性の比較を目的に行ったものである。比較の対象は，履歴曲線，等価減衰定数，エネルギー吸収量である。

キーワード：軸力・曲げ・ねじりの複合荷重，交番載荷，異なる載荷周期の影響

1. はじめに

著者らは，正方形断面の R C 橋脚を対象にこれまで軸力 - 曲げ - ねじりが同時に作用する（いわゆる複合応力状態）時の復元力特性や相関曲線を一連の実験によって明らかにしてきた¹⁾²⁾³⁾。これまでの実験では軸力を一定として行ってきたが，実際の地震動では軸力が一定ではないことを考慮して，今回新たに変動軸力状態における実験を 6 体追加したのでその結果を報告する。

2. 実験概要

2.1 供試体諸元

実験の概要を，図-1, 2に示す。供試体は，400mm × 400mm の充実矩形断面であり，柱部分の長さは 1600 mm である。また，主鉄筋の径は D 13，帯鉄筋の径は D 6，かぶり厚は 15mm である。載荷タイプは，曲げ荷重のみの純曲げ型とねじり荷重のみの純ねじり型，曲げ荷重とねじり荷重の影響を同程度とした中間型の 3 ケースとした。コンクリートの設計基準強度は $f_{ck} = 40 \text{ N/mm}^2$ ，帯鉄筋間隔（30mm）は共通とした。表-1 に今回対象とした検討ケースの一覧を示す。なお，これまでに行ってきた変動軸力実験以外の実験の詳細については，参考文献 1)，2)，3) を参照されたい。

2.2 載荷サイクル

曲げ荷重・ねじり荷重と軸力の載荷周期の比は 4 : 1 とし，軸力の変動域は，640kN ± 320kN とした。また，変動軸力 type1 は曲げ・ねじり荷重が最大のときに軸力が最小となるように，変動軸力 type2 は曲げ荷重・ねじり荷重が最大のときに軸

力が最大となるように載荷した。変動軸力 type1 と変動軸力 type2 の載荷サイクルのイメージを図-3 に示す。

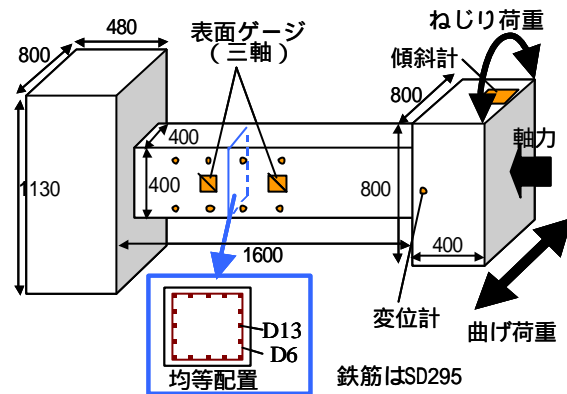


図-1 供試体概要（単位 mm）

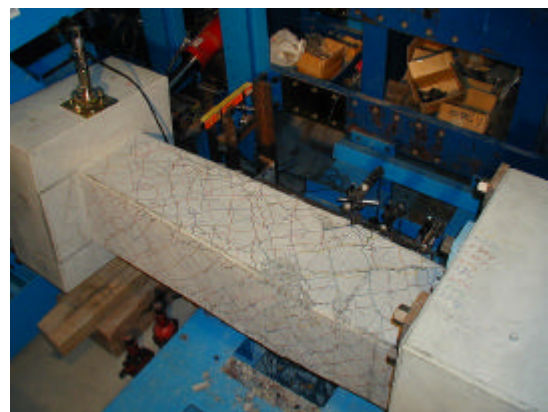


図-2 載荷状況

*1 九州大学大学院 工学研究院教授 工博（正会員）

*2 九州大学大学院 工学府建設システム工学専攻 修士課程 2 年

*3 九州大学 工学部地球環境工学科 4 年

表 -1 検討ケース一覧

軸力状態	軸力 (kN)	载荷パターン	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (N/mm ²)
一定軸力	640	純曲げ型	40.6	2.9	24.6
		純ねじり型	35.3	4.1	23.9
		中間型	50.4	4.0	35.5
変動軸力	640 ± 320	純曲げ型 type1	50.5	3.2	29.5
		純曲げ型 type2	51.2	3.7	32.6
		純ねじり型 type1	45.2	3.0	31.0
		純ねじり型 type2	48.9	3.0	31.4
		中間型 type1	52.2	3.3	33.3
		中間型 type2	46.4	3.4	27.2

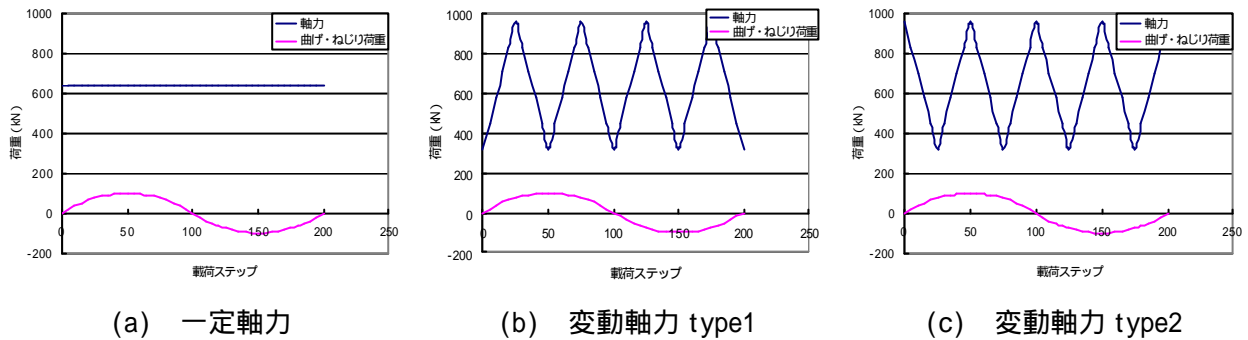


図 -3 変動軸力実験における曲げ・ねじり荷重 1 ループの载荷イメージ

3. 実験結果

3.1 曲げ荷重 - 曲げ変位関係の比較

図 -4, 5 に一定軸力と変動軸力の純曲げ型と中間型の曲げ荷重 - 曲げ変位関係のグラフを示す。グラフを比較すると、軸力の影響が顕著に表れていることがわかる。type1 では各ループの変位が最大のところで荷重が大きく落ちているのに対し、type2 では荷重が上がる傾向にある。これは type1 では変位が最大となる時に軸力は最小となり耐力が落ちるからであり、type2 では変位が最大となる時に軸力も最大となり耐力があがるからである。その影響により最大耐力に大きな影響が表れている。

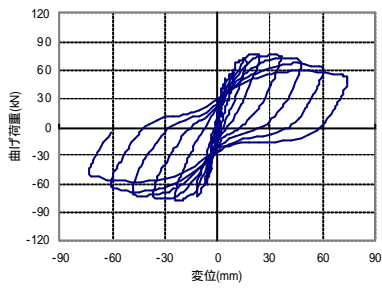
3.2 ねじり荷重 - ねじり角関係の比較

図 -6, 7 に一定軸力と変動軸力の純ねじり型と中間型のねじり荷重 - ねじり角関係のグラフを示す。まず、純ねじり型を比較する。type1 では、各ループで見ると、後半耐力が伸びにくくなっており、type2 では、後半急激に耐力が伸び、それに伴い最大耐力も大きく出ていることがわかる。次に、中間型を比較する。中間型も純ねじり型同様、type1 と type2 で各ループの後半の耐力の伸びに

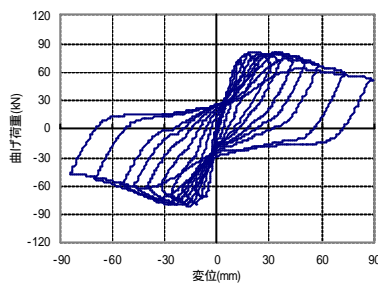
大きな差がある。また、最大耐力を見ると、type2 では一定軸力よりも大きくなるが、type1 では一定軸力よりも小さくなっている。曲げのときと同様、軸力が大きい時の方が耐力は大きくなりやすいという傾向が見られる。

3.3 実験値と理論値の骨格曲線の比較

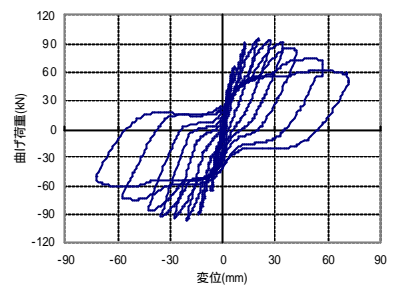
図 -8 に純曲げに関する骨格曲線の実験値と理論値を比較する。理論値は軸力が 320kN, 640kN, 960kN の 3 パターンに対し汎用コードを用いて求めた。図に見られるように理論値は軸力の大きい部材の耐力が大きくなっている。実験耐力の最大値は大きい方から、type2, type1, 一定軸力の順になっている。まず一定軸力の場合を見ると、実験値は 640kN の理論値より若干大きく、安全側の理論値となっている。変動軸力 type2 では最大変位時に軸力が最大となることから、一定軸力の最大耐力よりも大きくなり、さらに最大軸力 960kN の理論値よりも大きくなっている。また、変動軸力 type1 でも一定軸力の耐力より大きくなっている。この場合、最大変位時に軸力が 320kN と最低となるにも関わらず、変動軸力の影響で耐力は 640kN の理論値を越える結果となった。



(a) 一定軸力

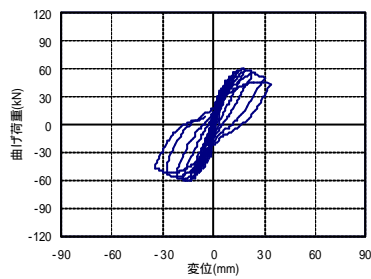


(b) 変動軸力 type1

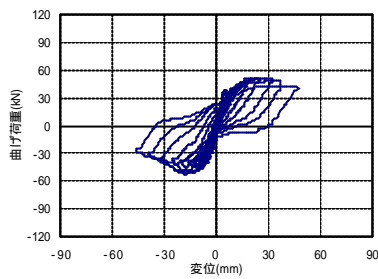


(c) 変動軸力 type2

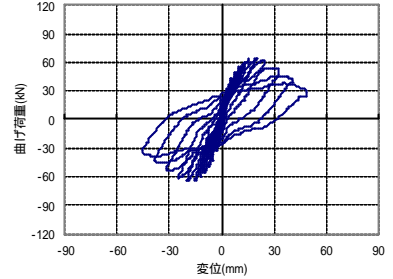
図-4 純曲げ型の荷重 - 変位関係



(a) 一定軸力

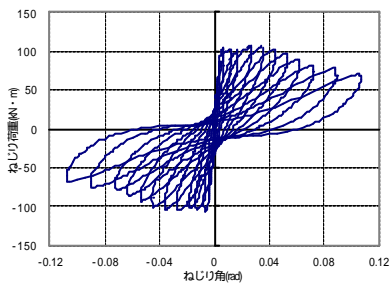


(b) 変動軸力 type1

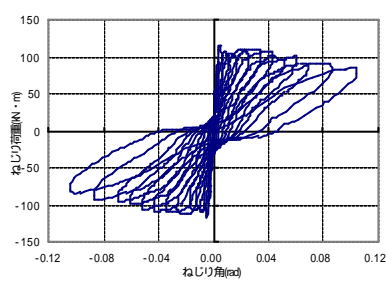


(c) 変動軸力 type2

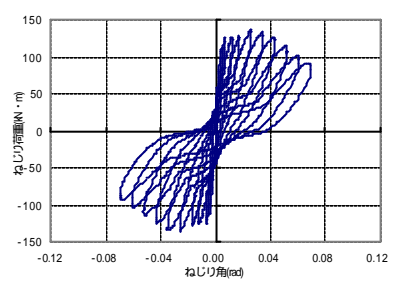
図-5 中間型の荷重 - 変位関係



(a) 一定軸力

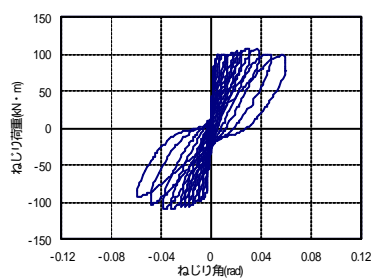


(b) 変動軸力 type1

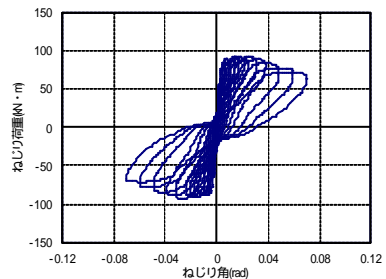


(c) 変動軸力 type2

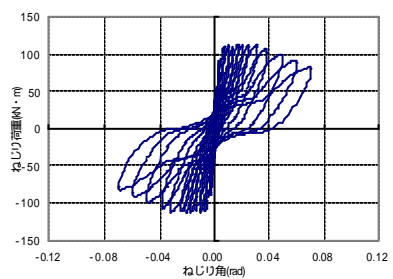
図-6 純ねじり型の荷重 - ねじり角関係



(a) 一定軸力

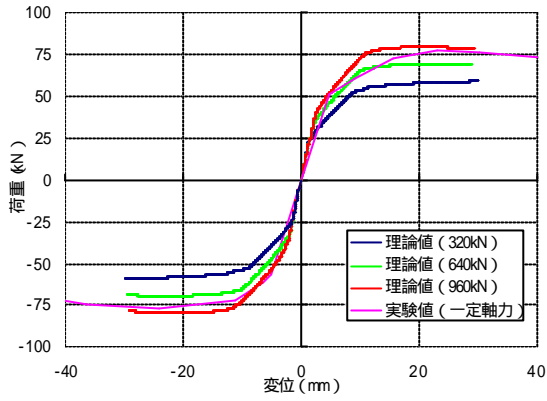


(b) 変動軸力 type1

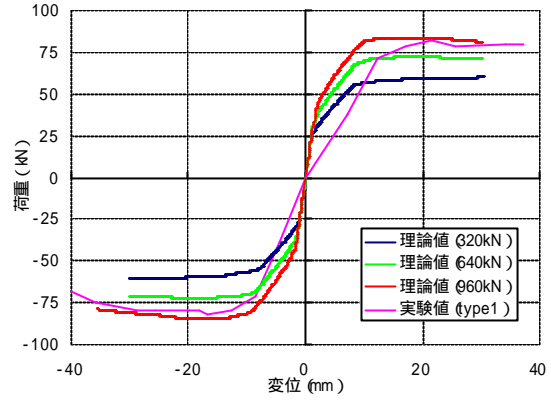


(c) 変動軸力 type2

図-7 中間型の荷重 - ねじり角関係

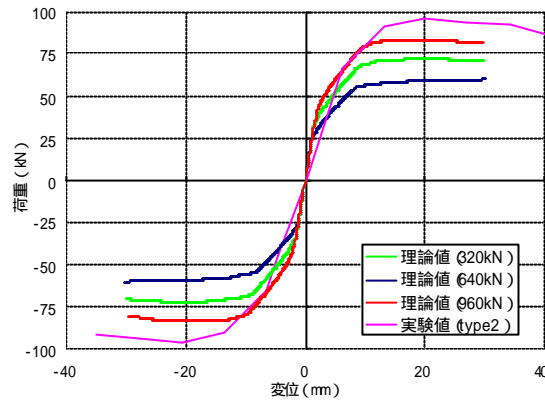


(a) 一定軸力



(b) 変動軸力(type1)

また、図-6に見られるように純ねじり型の実験耐力の最大値も大きい方から、type2、type1、一定軸力の順になっている。一方、中間型では図-5あるいは図-7に見られるように、最大耐力は大きい方からtype2、一定軸力、type1の順となっており、最大耐力の大きい順番が変動している。これは、複合応力状態（中間型）の方が軸力変動の影響を大きく受けることを示している。

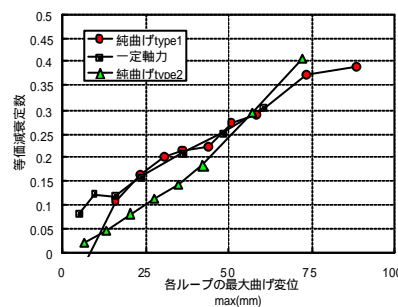


(c) 変動軸力(type2)

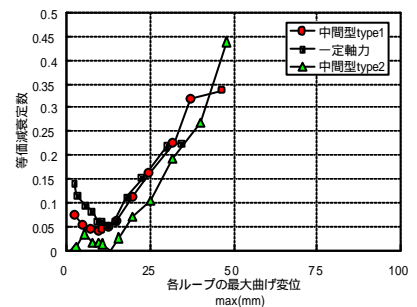
図-8 実験値と理論値の骨格曲線の比較

3.4 等価減衰定数の比較

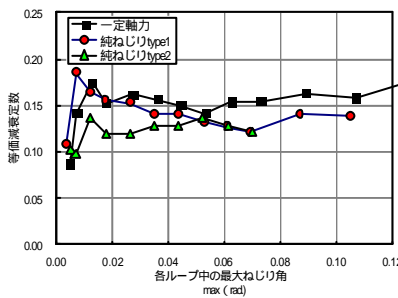
図-9に等価減衰定数の比較を行う。一つのグラフに一定軸力と変動軸力type1、変動軸力type2のグラフを載せている。また、中間型では、曲げで出したものとねじりで出したものそれぞれを載せている。さらに、グラフのx軸は、曲げでは各グループの最大の曲げ変位を、ねじりでは各グループの最大のねじり角を用いている。比較した結果、グラフの形状は一定軸力状態と変動軸力状態で大差はない結果となっている。しかし、純曲げ型、中間型、純ねじり型のどの時も変動軸力type2の値が一番小さくなるという傾向が見られる。



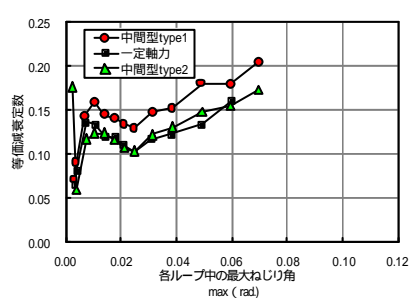
(a) 純曲げ型



(b) 中間型(曲げ)



(c) 純ねじり型



(d) 中間型(ねじり)

図-9 等価減衰定数

3.5 エネルギー吸収量の比較

図-10, 11にエネルギー吸収量と累積エネルギー吸収量の比較を行う。x軸は図-9と同じである。エネルギー吸収量は図-4から図-7の各ループの囲む面積を算出しており、両図の縦軸に示す次元を有している。これらの図を比較すると、エネルギー吸収量、累積エネルギー吸収量ともに、どのパターンのときも大差がない結果となっている。つまり、一定軸力、変動軸力 type1, 変動軸力 type2ではループの形はそれぞれ異なるが、ループの面積にはほとんど差がないといえる。

3.6 ひび割れ幅, ひび割れ本数関係の比較

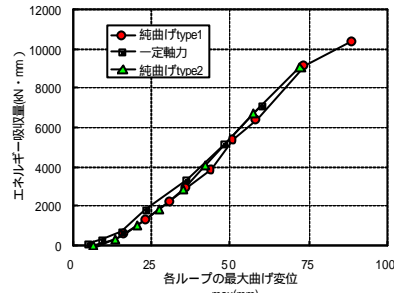
図-12, 13, 14に最大ひび割れ幅, 残留ひび割れ幅, ひび割れ本数関係の比較を行う。ここでひび割れ本数とは、供試体の任意の面の中央に部材軸線を引き、その線を通じたひび割れの数とした。また、図のx軸は等価減衰定数のときと同様のものを用いている。比較すると、ひび割れ本数は、純ねじり型・中間型では、変動軸力時の方が少ないが、純曲げ型では大差ない。ひび割れ幅はいずれの場合にも変動軸力時の方が大きい。

4 まとめ

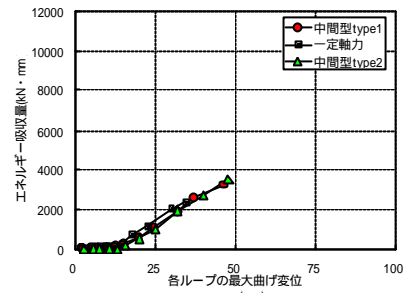
本検討で得られた知見をまとめると以下のとおりである。

(1)軸力が変動することにより、荷重 - 変位関係のループの形状は変わる。特に軸力が増えるときに曲げ・ねじりが大きくなる場合 (type2) には、履歴曲線の先端が尖っている。

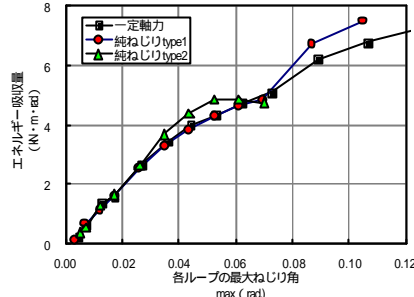
(2)曲げ荷重 - 曲げ変位関係, ねじり荷重 - ねじり角関係の履歴曲線において、純曲げ型, 純ねじり型, 中間型の载荷パターンにかかわらず変動



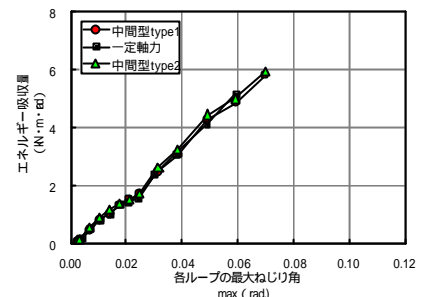
(a) 純曲げ型



(b) 中間型 (曲げ)

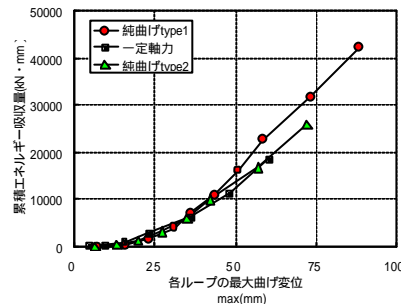


(c) 純ねじり型

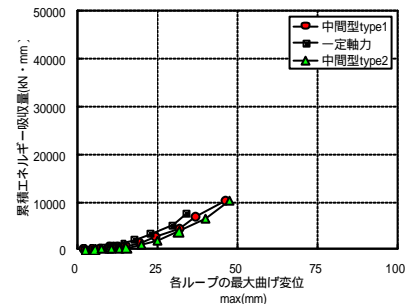


(d) 中間型 (ねじり)

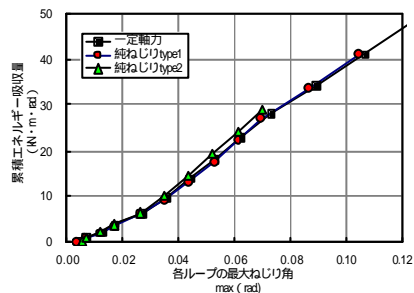
図-10 エネルギー吸収量



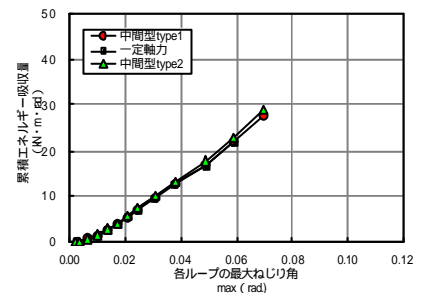
(a) 純曲げ型



(b) 中間型 (曲げ)



(c) 純ねじり型



(d) 中間型 (ねじり)

図-11 累積エネルギー吸収量

軸力 type2 の最大耐力が最も大きくなった。

(3)骨格曲線で比較すると、純曲げ型・純ねじり型では最大耐力の大きさが、type2, type1, 一定軸力の順になっているのに対し、中間型では type2, 一定軸力, type1 となっており、複合応力状態の方が変動軸力の影響を受けやすいことがわ

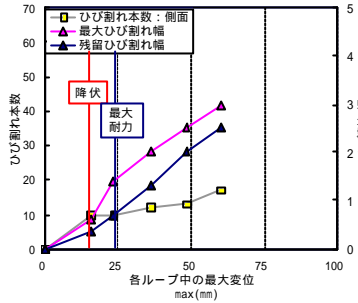
かった。

(4)等価減衰定数は、荷重パターンにかかわらず変動軸力 type2 の場合が小さい。

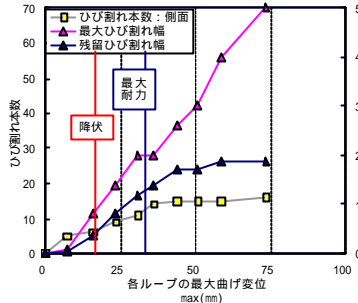
(5)エネルギー吸収量に関しては変動軸力・載

荷パターンにかかわらず結果には大差がない。

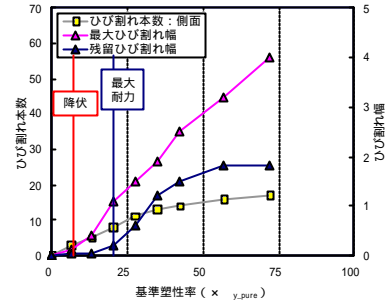
(6)ひび割れは、変動軸力時の方がひび割れ本数は小さく、ひび割れ幅は大きくなる傾向にある。



(a) 一定軸力

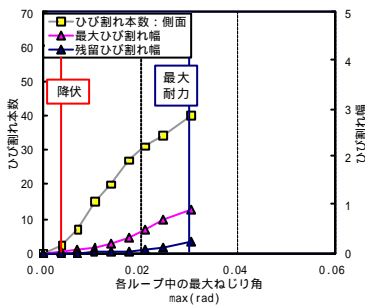


(b) 変動軸力 type1

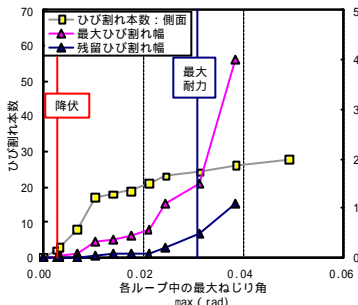


(c) 変動軸力 type2

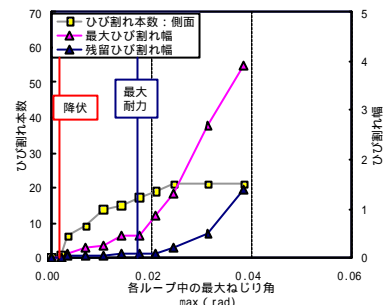
図 - 12 純曲げ型のひび割れ本数と幅



(a) 一定軸力

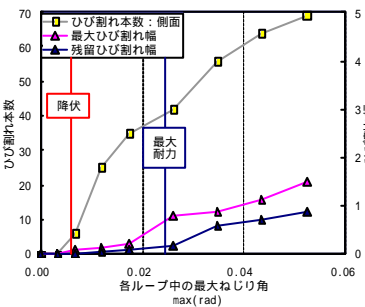


(b) 変動軸力 type1

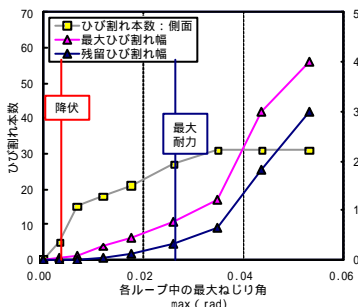


(c) 変動軸力 type2

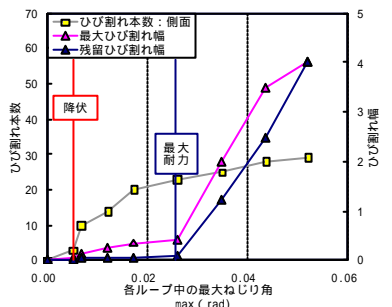
図 - 13 中間型のひび割れ本数と幅



(a) 一定軸力



(b) 変動軸力 type1



(c) 変動軸力 type2

図 - 14 純ねじり型のひび割れ本数と幅

参考文献

1) 大塚久哲, 竹下永造, 王堯: 軸力, 曲げおよびねじりの複合荷重を受ける R C 部材の履歴復元力に関する実験的考察, 土木学会地震工学論文集, Vol. 27, pp. 1-8, 2003.
 2) 大塚久哲, 王堯, 高田豊輔, 吉村徹: 純ねじりを受ける R C 部材の履歴特性に影響を及ぼすパ

ラメーターに関する実験的研究, 土木学会論文集, No. 739/v-60, pp. 93-pp. 104, 2003.
 3) 大塚久哲, 竹下永造, 浦川洋介: 軸力, 曲げ/せん断及びねじりの複合荷重を同時に受ける R C 部材の耐震性能と相関特性, 土木学会論文集, No. 801/1-73, pp. 123-pp. 139, 2005.