

# 論文 曲げせん断力を受ける RC 部材の人工亀裂装置とせん断補強筋の併用効果

田中 泰司<sup>\*1</sup>・岸 利治<sup>\*2</sup>・前川 宏一<sup>\*3</sup>

**要旨** : RC棒部材内に人工亀裂装置を埋め込むことでRC部材のせん断耐力を向上させる手法(ACD手法)が提案されている。本研究では、亀裂面形状を操作することで補強効果を増進させる手法を提案する。また、人工亀裂装置とせん断補強筋の効果が併用可能であることを示し、せん断耐力および曲げ変形性能を増進できることを実証した。この手法を用いた場合、ひび割れ分散性が向上し、ひび割れ間隔が低減されることから、ひび割れ幅の抑制も期待できることが示唆された。  
**キーワード** : 人工亀裂装置, せん断耐力, ひび割れ間隔, アンボンド

## 1. 序論

RC部材のせん断補強法として提案されているアンボンド手法は、主筋の付着を人工的に絶つことによって、ディーブビーム部材で顕著に見られるタイドアーチ効果を増進させるものである。また、Pimanmas等が提案しているACD(Artificial Cracking Device)は、RC部材内に人工亀裂面材を埋め込むことでひび割れ経路を制御し、耐力を向上させる手法である<sup>1)</sup>。アンボンド手法とACD手法の耐力増進機構は、斜めひび割れ経路の制御と、それに続くタイドアーチ効果の増進作用に基づく点で同一であるため<sup>2)</sup>、腹鉄筋のない梁部材では、両者の効果は同等であると考えられる。

曲げせん断力を受ける場合、タイドアーチ効果の発現には、部材断面内の平面保持が成立しないことが必要条件となる。アンボンド手法の場合には、主筋の付着を除去するという方法で、ACD手法の場合には部材断面内に予め不連続面を形成するという方法で、ひずみ場に人工的に不連続性を与えている。

これらの手法による耐力増進効果によっても所要の強度や変形性能が得られない場合には、

せん断補強筋の併用が必要となる。

ここで、せん断補強筋によるトラス効果を期待する場合には、トラス節点の成立が必要条件となる。しかし、アンボンド手法では主筋付着の除去によってトラス節点の形成が困難となるため、せん断補強筋による耐力増加は期待できない<sup>3)</sup>。ACDでも人工亀裂面によってトラス圧縮斜材の成立が妨げられるため、同様の問題が危惧される。

そこで筆者らは、人工亀裂装置を用いる場合には、亀裂面の形状を任意に設定できる利点に着目し、亀裂面に適度なせん断伝達を付与することで、トラス圧縮斜材の形成が確保できると考えた<sup>4)</sup>。ACD手法では主筋の付着は保たれているので、トラスの節点も機構的に成立すると考えられよう。

以上を鑑み、本論文は人工亀裂装置の表面形状が部材の耐荷挙動に与える影響について実験的な検討を行い、せん断補強筋と人工亀裂装置が併用された部材の耐荷挙動の検討を行ったものである。

\*1 長岡技術科学大学 環境・建設系助手 修(工) (正会員)

\*2 東京大学生産技術研究所 人間・社会系部門助教授 博(工) (正会員)

\*3 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻教授 工博 (正会員)

表-1 試験体概要

試験体 No.	試験体寸法						コンクリート圧縮強度 $f_c$ (MPa)	主鉄筋降伏強度 $f_y$ (MPa)	有効鉄筋比 $P_w$ (%)	破壊荷重 (kN)	備考
	有効高さ d (mm)	載荷スパン l (mm)	せん断スパン比 a/d	試験体長さ L (mm)	試験体高さ H (mm)	試験体幅 b (mm)					
1 Ref-2.8	250	1700	2.8	2100	300	200	40.7	736	1.55	174	
2 Ref-2.8S	250	1700	2.8	2100	300	200	43.2	736	1.55	347	せん断補強筋あり
3 PHS07-2.8	250	1700	2.8	2100	300	200	43.5	735	1.55	204	平板,スパンの7割
4 PHS10-2.8	250	1700	2.8	2100	300	200	45.6	736	1.55	222	平板,スパン全長
5 HHS07-2.8-25	250	1700	2.8	2100	300	200	43.5	735	1.55	221	開口率25%,穴板
6 HHS07-2.8-30	250	1700	2.8	2100	300	200	43.5	735	1.55	167	開口率30%,穴板
7 HHS10-2.8-25	250	1700	2.8	2100	300	200	45.6	736	1.55	246	開口率25%,穴板
8 WHP07-2.8	250	1700	2.8	2100	300	200	40.7	736	1.55	232	波板,スパンの7割
9 WHP10-2.8	250	1700	2.8	2100	300	200	43.2	736	1.55	246	波板,スパン全長
10 WHP10-2.8S	250	1700	2.8	2100	300	200	43.2	736	1.55	360	せん断補強筋あり

記号の意味: 表面形状 - 配置方向 - 材質 - プレートの長さ枚数 - a/d  
 P: 平鋼(未加工の平板) H: 部材軸方向 P: プラスチック(PE) 横方向配 07: せん断スパンの7割  
 H: 孔あき鋼板 S: 金属(鉄, トタン) 置の場合 10: せん断スパンの10割  
 W: 波板  
 Ref: 基準試験体

## 2. 梁の曲げせん断試験による人工亀裂装置の表面形状の影響に関する実験

### 2.1 実験概要

人工亀裂面にせん断伝達を付与する方法として、(1)波型の板を使用する方法、(2)孔を設けることで亀裂面の一部を周辺コンクリートと一体化させる方法、を採用し、それぞれの人工亀裂が部材せん断耐力挙動に与える影響について、梁試験体を用いた実験により検討を行った。

### 2.2 試験体の諸元

人工ひび割れ装置が埋め込まれた梁部材を作成し、2点単純支持条件下で荷重を行った。試験体概要を表-1に、各試験体の配筋図を図-1に示す。せん断スパン比 a/d は 2.8 とした。また、人工ひび割れ装置の配置方向は部材軸方向(水平方向)とし、部材断面の中央の高さに配置した。プレートの長さは、載荷スパン全長または載荷スパンの約 7 割の長さの 2 水準とした。

### 2.3 使用材料

コンクリートの配合を表-2に示す。鉄筋は圧縮側、引張側それぞれに D22 の高強度鉄筋を 2 本ずつ配置した。

せん断補強筋には呼び名が D10 の異形鉄筋を使用した。せん断補強筋の降伏強度は 358MPa、弾性係数は  $1.71 \times 10^5$  MPa であった。

### 2.4 人工亀裂装置

人工亀裂装置(ACD)には、平板、波板、孔あき

表-2 コンクリート配合表

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 S/a (%)	骨材の最大寸法 $G_{max}$ (mm)	単位量						空気量 (%)
			水 W (kg)	セメント C (kg)	砂 S (kg)	砂利 G (kg)	AE 減水剤 (kg)	AE 剤 (g)	
55	45	20	146	269	860	1075	2.96	16.1	4

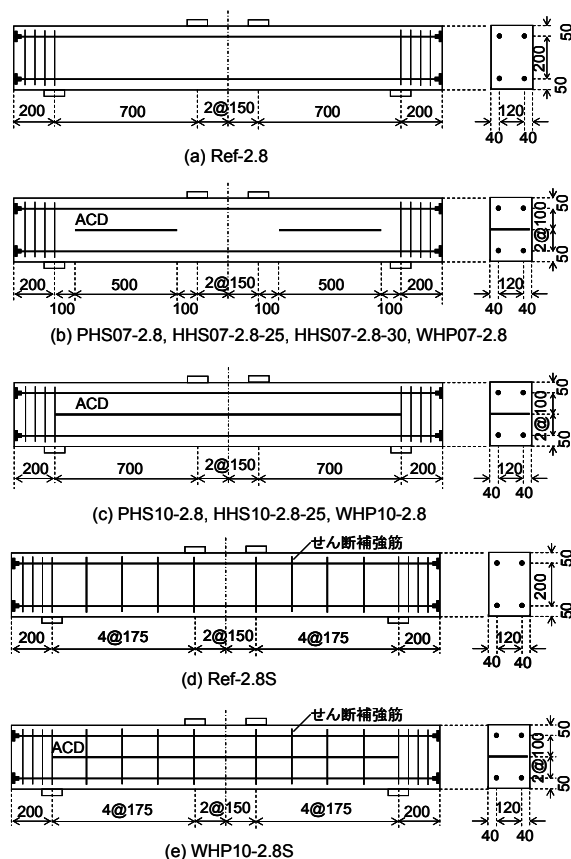


図-1 試験体配筋図

鋼板の 3 種類を使用し、比較を行った。平板には厚さが 0.6mm の鋼板(SS400 相当品)を使用した。波板には市販のプラスチック製の小波タイ

ブ(波の高さが 13mm のもの)を使用した。孔あき鋼板には、プレス処理により孔あき加工が施された厚さ 0.6mm の鋼板を使用した。孔の直径は粗骨材が通過できるように 50mm とした。また、孔の総面積が人工亀裂の総面積の 25%、または 30%となるように孔の数と配置を決定した。以降、孔の面積率を開口率と呼び、式(1)によって定義する。

$$\Pi = A_h / A_p \quad (1)$$

ここに、 $\Pi$ は開口率、 $A_h$ は 1 パターンあたりの孔の総面積、 $A_p$ は 1 パターンあたりの人工亀裂装置の総面積を表す(図-2 参照)。

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 ACD の形状が部材耐荷性能に与える影響

##### (1) 荷重—中央変位関係による比較

図-3 は、ACD の形状が部材構造性能に与える影響を荷重—中央変位関係により比較したものである。ここで荷重値には、加力点 2 点の荷重の和を採用した。試験体にはせん断補強筋は配置されていない。また、ACD は載荷スパン全長にわたって配置されている。

この部材諸元では、人工亀裂装置を使用することで、最大耐力が基準試験体に比べて 28%~41%増加した。また、人工亀裂装置に波板、孔あき鋼板を使用することで、平板に比べて最大荷重が 11%程度増加している。

図-4 にはせん断スパンの約 7 割の長さで水平方向に ACD を配置した場合の、荷重—中央変位関係である。ACD の形状によらず、載荷スパン全長配置に比べて、最大耐力と変形性能が小さい。これは、載荷点側の配置長さを短くすることによって、ひび割れの迂回効果が弱められ、タイドアーチ効果が十分に発揮されないためである。そのため ACD の形状によらず、載荷点直下まで配置するのがよいといえる。

##### (2) ひび割れ状況による考察

図-5 には、破壊後に観察されたひび割れ状況を示した。平板や波板を使用した場合には、

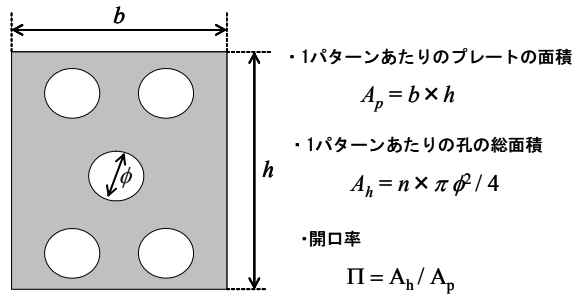


図-2 開口率の定義

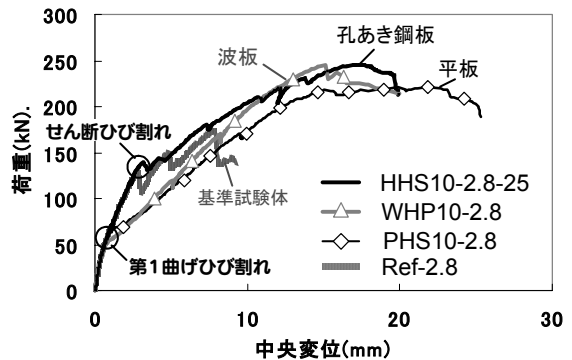


図-3 荷重—中央変位関係における ACD の形状の影響(載荷スパン全長配置, せん断補強筋なし)

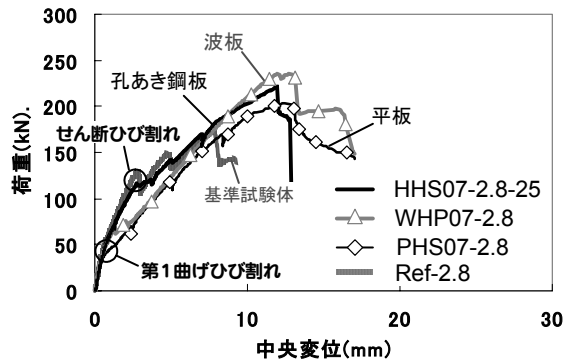


図-4 荷重—中央変位関係における ACD の形状の影響(せん断スパンの 7 割配置, せん断補強筋なし)

第 1 曲げひび割れ発生後の部材剛性が基準試験体に比べて小さい(図-3, 4)。これは、曲げひび割れ発生による中立軸位置の上昇に伴い、亀裂面ですべりが生じ、平面保持が不成立となるためである。

一方で、孔あき鋼板を使用した場合には、孔を介してコンクリートが一体化しているため、応力伝達が保持され、剛性の低下は起こらない。

また、斜めひび割れの発生後には、プレート

の上側をアーチリブとするタイドアーチ機構が発揮されるため、破壊時のひび割れ状況は ACD の形状によらず、同様な結果となった。

せん断補強筋のない RC 部材の場合には、曲げひび割れ後の部材剛性と最大耐力の両面から、孔あき鋼板を人工亀裂装置として使用するのが妥当であると結論付けられる。

### 3.2 開口率が部材耐荷性状に与える影響

#### (1) 荷重－変位関係による比較

図－6 に、開口率が 25%、30%である孔あき鋼板を使用した試験体の荷重－変位関係を示す。開口率 25%に比べ、30%では最大荷重が低下している。

#### (2) 開口率の上限値の考察

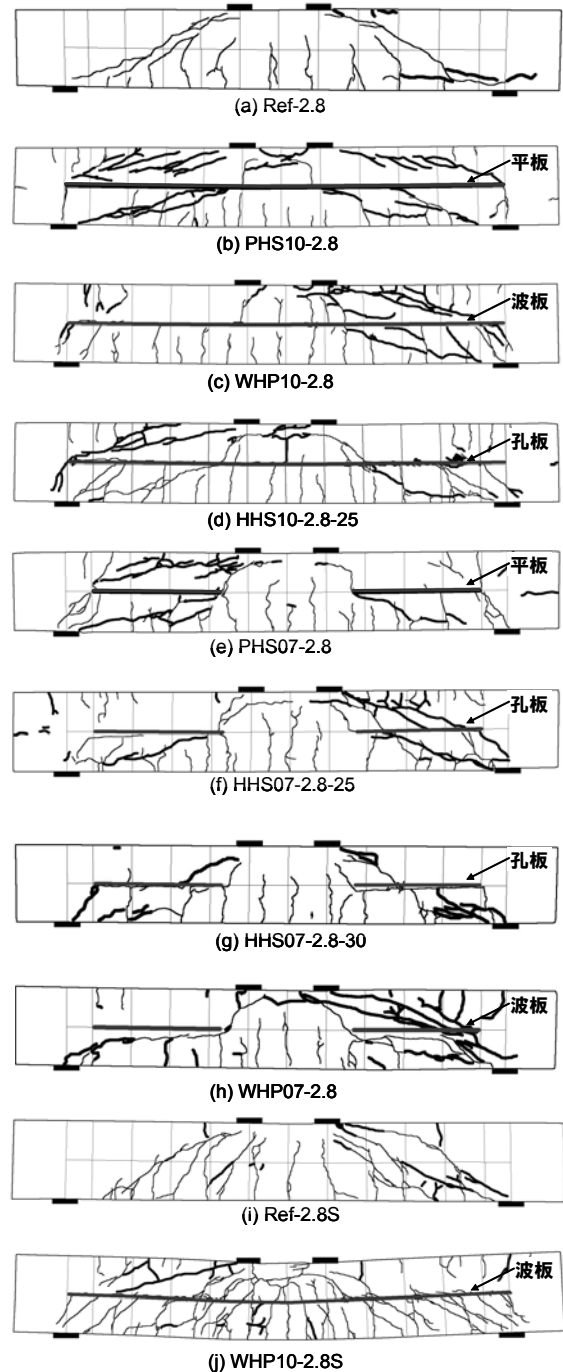
図－7 には、これらの試験体で破壊前に観察されたひび割れ状況を示した。開口率が 25%の場合には支点上縁からひび割れが発生した。これらの試験体は ACD を境界とした重ね梁部材とみなせるが、端部拘束された重ね梁では端部で負曲げが生じるため、上縁からひび割れが発生したものと考えられる。一方、開口率が 30%である場合には、ACD 面でのすべりが生じないために、負曲げによる上縁からのひび割れが生じていない。それに伴って斜めひび割れはプレートを貫通するように進展している。このため、ACD のひび割れ迂回効果によるタイドアーチ機構の増進が見られなかったと考えられる。

孔あき鋼板においては開口率の上限値が存在し、今回の部材諸元では、25%~30%の範囲であった。

### 3.3 せん断補強筋のある梁部材

#### (1) 荷重－中央変位関係

図－8 に、せん断補強筋を有する梁試験体の荷重－変位関係を示す。基準試験体のせん断/曲げ耐力比は 0.76 であり、曲げ降伏と同時にせん断圧縮破壊した。一方、波板を使用した試験体はせん断補強筋を付与することによって、最大荷重と曲げ変形性能を大幅に向上させている。また、曲げひび割れ後の剛性低下は見られず、終局に至るまで、一般の RC 部材の変形状態と同



図－5 破壊後のひび割れ状況

様な挙動を示した。タイドアーチ効果とせん断補強筋によるトラス効果が重ね合わせ可能であると仮定すれば、せん断/曲げ耐力比は 1.13 となる。波板を使用した場合には、せん断補強筋によるトラス機構が成立し、人工亀裂装置によるタイドアーチ機構と併用可能であると言える。

平板を使用した場合には、人工亀裂境界でのせん断伝達が小さいため、トラスの圧縮斜材が形成できない。その結果、アンボンド部材と同

様にせん断補強筋による複合効果は発揮されないと考えているが、実証的な検証が必要であり、今後の課題である。

## (2) ひび割れ状況

図-5 (i), (j)には、せん断補強筋のある試験体のひび割れ状況を示した。破壊要因となったひび割れは、ACD 支点側端部と載荷点を結ぶ斜めひび割れであり、この部分でアーチリブが形成され、タイドアーチ機構が発揮されていたことが示唆される。

## (3) 曲げひび割れ間隔の検討

人工亀裂装置を使用した部材では、人工亀裂面ですべりが生じるため、変形が局所化し、ひび割れ幅が大きくなることも危惧される。

ひび割れ幅は鉄筋の平均ひずみとひび割れ間隔に大きく支配されることから、本文では等モーメント区間におけるひび割れ間隔に着目し、検討を行うこととした。

図-9 には等モーメント区間におけるひび割れ状況を示した。せん断補強筋がある場合、波板を使用した試験体(a)は基準試験体(b)に比べて曲げひび割れの本数が多く、ひび割れ間隔が半分程度になっている。一方、せん断補強筋のない場合(c),(d)は、曲げひび割れ間隔は人工亀裂の種類によらず同様であり、基準試験体に比べて若干、小さくなる程度であった。

いずれのケースにおいても、曲げひび割れ間隔は基準試験体に比べて小さくなるため、曲げひび割れ幅に関して人工亀裂装置を導入した部材が極度に不利となることは考え難い。ひび割れ幅の検討については、実測による検証が課題として残る。

## (4) ひび割れ間隔の低減効果

ひび割れ間隔の検討は、土木学会コンクリート標準示方書の曲げひび割れ幅算定式<sup>6)</sup>のうち、ひび割れ間隔を表す部分を参照して、比較検討を行った。

$$l = \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \quad (2)$$

ここに、 $l$  は曲げひび割れ間隔、 $c$  はかぶり、

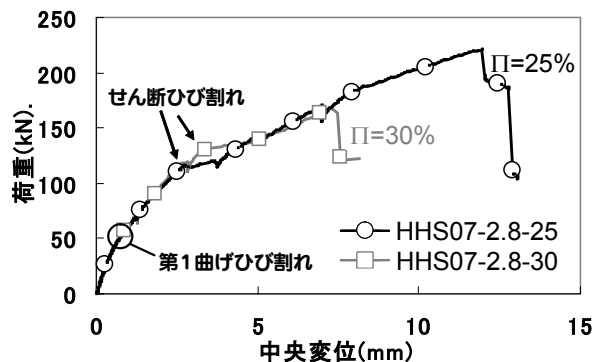


図-6 孔あき鋼板を使用した ACD 部材の荷重-中央変位関係(開口率 25%, 30%)

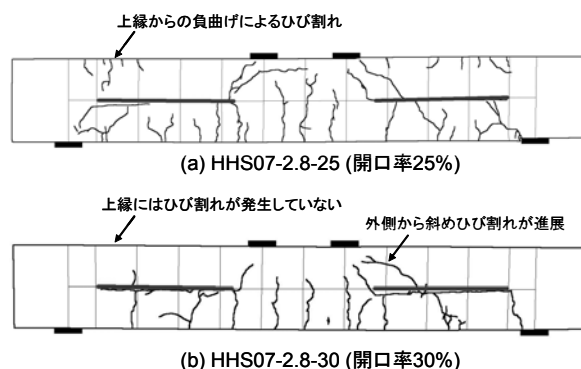


図-7 開口率が破壊前のひび割れ状況に及ぼす影響

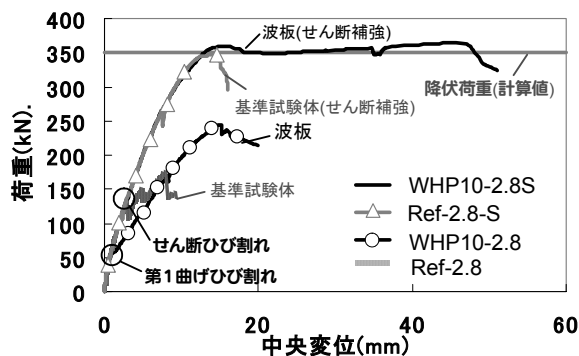


図-8 腹鉄筋を有する梁試験体の荷重-中央変位関係

$c_s$  は鋼材の中心間隔、 $\phi$  は鋼材径を表す。

式(2)から本実験におけるひび割れ間隔は 211mm と算定される。このため、等モーメント区間には 2~3 本の曲げひび割れが発生すると考えられる。基準試験体(b)のひび割れ状況は、算定式とおおむね整合していることから、ACD 部材のひび割れ間隔は一般の RC 部材よりも小さくなると判断される。

波板の場合には、図-10 に示すように、重ね

梁的な変形を拘束するせん断応力がプレート面に作用し、それに伴い直交方向に体積変形が生じる。せん断補強筋によって、この変形が拘束される結果、局所曲げが発生し、追加的にひび割れが生じると考えているが、詳細については今後検討を進める予定である。

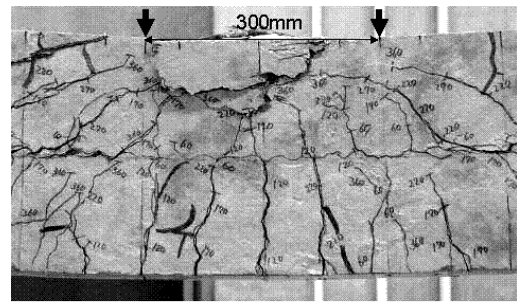
#### 4. 結論

表面形状の異なる ACD が埋め込まれた梁部材の試験を通じて以下の知見を得た。

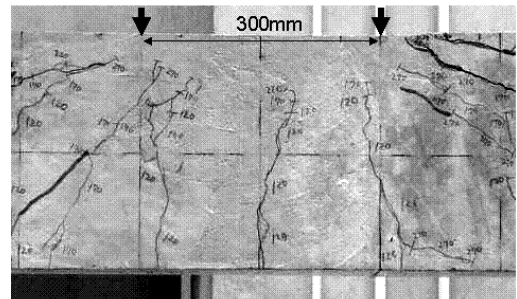
- ・せん断補強筋のない ACD 梁部材において、孔あき鋼板や波板を使用すると、構造性能を向上させることができる。
- ・孔あき鋼板の開口率が過大となる場合には、ACD によるタイドアーチ効果は低減する。
- ・波板を ACD として使用した場合、せん断補強筋との併用効果が期待できる。また、曲げひび割れ間隔が低減される。

#### 参考文献

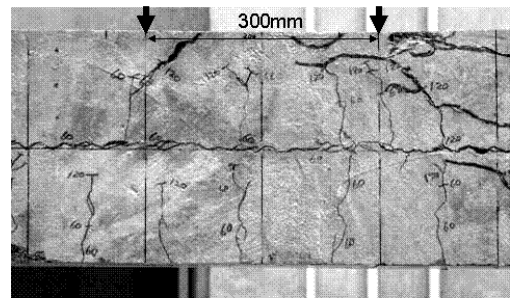
- 1) Pimanmas, A. and Maekawa, K.: Control of crack localization and formation of failure path in RC members containing artificial crack device, J. Materials. Conc. Struct., Pavements, JSCE, No.683/V-52, pp.173-186, Aug. 2001.
- 2) 田中 泰司・岸 利治・前川 宏一：せん断補強筋のない RC 部材におけるせん断ひび割れ以降の耐力評価手法，コンクリート工学年次論文集，Vol.26, No.2, pp.949-954, 2004
- 3) 滝口 克己：付着のある RC 部材と付着のない RC 部材の変形特性・II，日本建築学会論文報告集，第 262 号，pp.53-59, 1977.12.
- 4) Tanaka, Y., Kishi, T. and Maekawa, K. : Development of smeared crack inducing device and its mechanism in RC members, EASEC-9 Proceedings, RCS103-RCS110, Dec. 2003
- 5) コンクリート標準示方書耐震性能照査編，土木学会，2002
- 6) コンクリート標準示方書構造性能照査編，土木学会，2002



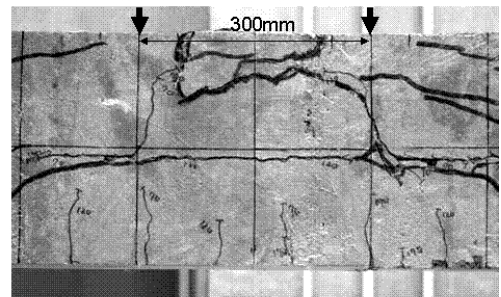
(a) WHP10-2.8S (波板, 補強筋あり)



(b) Ref-2.8S (基準試験体, 補強筋あり)

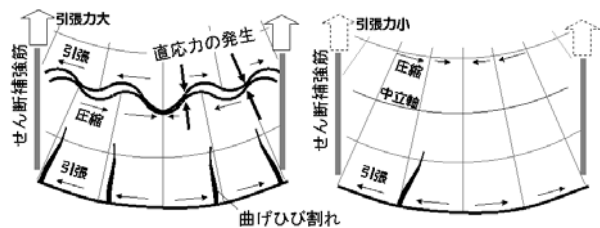


(c) WHP10-2.8 (波板, 補強筋なし)



(d) PHS10-2.8 (平板, 補強筋なし)

図-9 等モーメント区間におけるひび割れ状況



(a) 波板のダイレタンシーによる局所曲げ

(b) 基準試験体

図-10 等モーメント区間での変形状態