

5. 水平切欠き付きコンクリートの一面せん断実験

Experimental Study of Notched Concrete Blocks Subjected to Shear

石原誠一郎* 内井 栄二*

森 浩二^{*2}

要 旨

本研究では、水平切欠き付きコンクリートの切欠き間隔と試験体高さとの比および支持条件をパラメータとした一面せん断実験を行ないその破壊挙動を検証した。さらに打継ぎ試験体についても同様な試験を行ない一体打ち試験体と破壊挙動を比較した。その結果、一体打ちしたコンクリートは切欠き間隔と試験体高さとの比を小さくしても、必ずしもせん断破壊しないこと、および支持条件が破壊挙動に大きな影響を与えることが明らかになった。しかし、打継ぎのある試験体では、全て打継ぎ部で破壊した。

キーワード：せん断破壊／一面せん断／切欠き／コンクリート／打継ぎ

1. はじめに

コンクリートのひび割れ先端付近の変形モードには図-1に示すようなモードⅠ、ⅡおよびⅢの三つのモードがあることが知られている。そのうち、モードⅠ（開口型変形）の破壊現象に関しては、これまで多くの研究がなされ、破壊力学モデルも確立し、（社）日本コンクリート工学協会の「コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会」が、プレーンコンクリートの破壊エネルギー標準試験法を提案している¹⁾。一方、モードⅠ以外のモードⅡ（面内せん断型変形）やこれらが複合した混合モード破壊については、その破壊現象の物理的解釈やその挙動を示す力学モデルの確立、さらにモデルを定量化するための力学パラメータを、標準化された試験法によって抽出することが求められている。

WatkinsとLiu²⁾によれば、図-2(a)に示すような水平切欠きをもつプレーンなコンクリート試験体について、切欠き間隔 a と試験体高さ D の比 (a/D) が、0.1から0.25の場合に、切欠き近傍の応力場が圧縮で、引張応力はこの領域から離れており、せん断応力が荷重線上に卓越し、図-2(b)に示すように切欠き間でモードⅡのせん断破壊が生じたと報告している。

そこで、本研究では切欠き間隔と試験体高さの比を0.1と0.17に設定したプレーンなコンクリートの一面せん断実験を行い、その破壊性状を検証した。さらに載荷時の支持条件を変化させることで、どのようにその破壊挙動が変化するかも合わせて検証した。さらに、打継ぎのあ

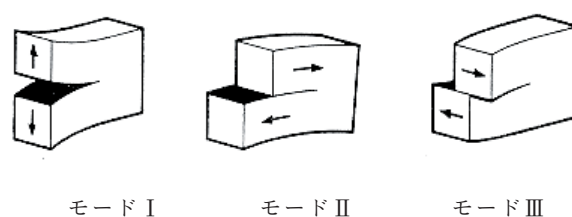


図-1 ひび割れ先端付近の三つの独立な変形様式

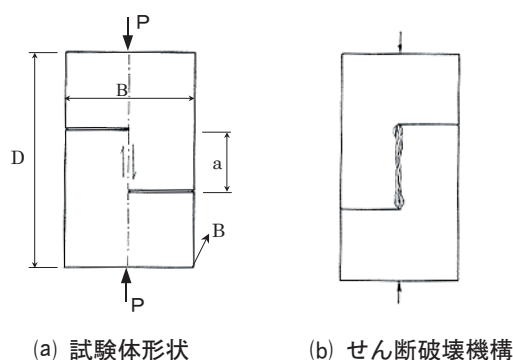


図-2 WatkinsとLiuのせん断試験

るコンクリートについても同様な試験を行ない、一体打ちコンクリートと破壊挙動を比較した。

*建築工法・材料研究室

^{*2}建築構造研究室

2. 実験概要

2.1 試験体

試験体一覧を表－1に示す。試験体の形状および計測位置を図－3に示す。試験体は一体打ちのものと打継ぎを有するものとした。各試験体には図－3に示すような、先端が5mmのくさび状の水平切欠きを上下2ヵ所設けた。一体打ち試験体は、図－3(a)に示す切欠き間隔が60mm($a/D=0.1$)のUJ60タイプと、(b)に示す切欠き間隔が100mm($a/D=0.17$)のUJ100タイプの2種類とした。試験体は図－4に示すように平打ちとした。

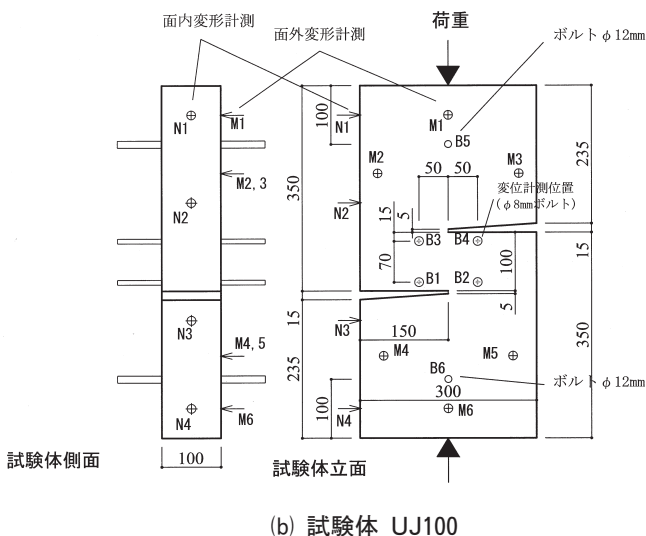
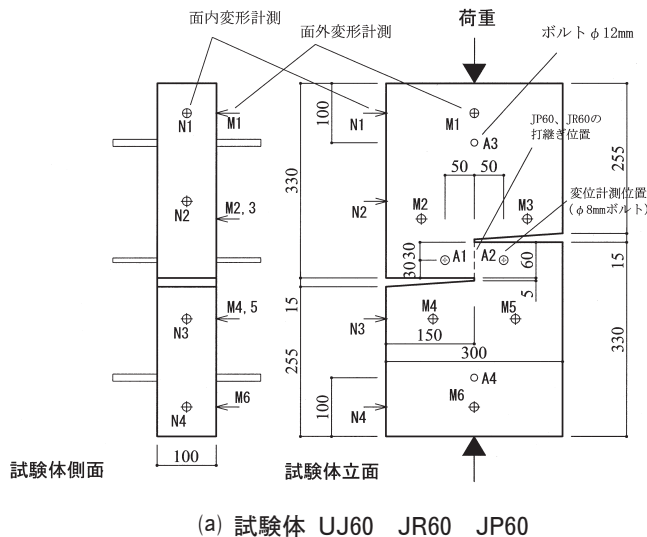
打継ぎ試験体は、図－3(a)に示す切欠き間隔が60mm($a/D=0.1$)で、打継ぎ面を目荒したJR60タイプと打継ぎ面を塗装合板型枠による平滑な仕上がりとしたJP60タイプの2種類とした。打継ぎ試験体は、図－4に示す

ように試験体の先打ち部のコンクリート打設後、2週間後に後打ち部のコンクリートを打設し、切欠き間を打継いだ。JR60タイプは、打継ぎ面に凝結遅延シートを貼り付け、型枠脱型時にその面を洗い出し、目荒した。目荒しの深さは約2mmである。試験体は型枠脱型後、試験日まで屋内に静置した。試験体のコンクリートの使用材料を表－2に、調合を表－3に示す。切欠き間隔が狭いため、粗骨材の最大寸法は15mmとした。

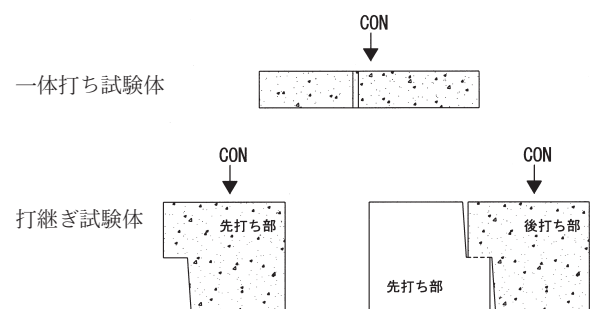
試験体のコンクリートは3回に打ち分けた。これらのコンクリートは同一の調合であるが、打設日の違いによってそれぞれをC01、C02、C03に区別した。コンクリートの各材料試験の結果を表－4に示す。表－1に示すように一体打ちはC01、JR60タイプはC01とC02を打継ぎ、JP60タイプはC02とC03を打継いだ。

表－1 試験体一覧

試験体 記号	切欠き間隔 (mm)	打継ぎ面の 処理法	支持条件		使用 CON
			上部	下部	
UJ60－1	60	一体打ち	球座	固定	C01
UJ60－2			球座	固定	
UJ60－3			球座	固定	
UJ60－4			鋼棒(角)	鋼棒(角)	
UJ60－5			鋼棒(角)	鋼棒(角)	
UJ60－6			鋼棒(丸)	鋼棒(角)	
UJ60－7			鋼棒(丸)	鋼棒(丸)	
UJ60－8			球座	球座	
UJ60－9			球座	球座	
UJ100－1	100	一体打ち	球座	固定	C01
UJ100－2			球座	固定	
UJ100－3			球座	固定	
JR60－1	60	目荒し	球座	固定	C01 + C02
JR60－2			球座	固定	
JR60－3			球座	固定	
JP60－1	60	平滑	球座	固定	C02 + C03
JP60－2			球座	固定	
JP60－3			球座	固定	



図－3 試験体の形状と計測位置



図－4 試験体製作要領

表－２ 使用材料

材料	規格・性状 他
セメント	普通ポルトランドセメント [(株)トクヤマ製] 密度 3.16g/cm^3
細骨材	山砂(城陽産) 表乾密度 2.56g/cm^3 粗粒率 2.80 吸水率 1.96%
粗骨材	砕石1505(高槻産硬質砂岩)($G_{\max}=15\text{mm}$) 表乾密度 2.67g/cm^3 吸水率 0.77% 実積率 57%

表－３ 調査表

骨材寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)			
			水	セメント	粗骨材	細骨材
15	60	51.1	186	310	876	878

2.2 試験方法

試験には容量200kNのサーボパルス用アクチュエータを用いた。試験は、安定した破壊挙動が得られるように $0.0002\text{mm/sec} \sim 0.0004\text{mm/sec}$ の低速度で、アクチュエータのヘッドを変位制御しながら載荷した。データのサプリングは5回/秒とした。

一体打ち試験体は、表－１に示すように、支持条件を変えて、載荷を行った。各支持条件を図－５に示す。試験体の設置の容易さを考慮して、上部を球座、下部を固定にした支持条件を基本とした。UJ60－8およびUJ60－9については、上下とも球座とした。ただし、UJ60－9の上部の球座は、図に示した球座の向きと上下を逆とした。文献^{3),4)}によれば、分布載荷とすると載荷が容易になるが、曲げによるひび割れが発生しやすく、線載荷にすると切欠き間でせん断破壊しやすいとの報告がある。そこで、載荷が線載荷になるよう支承に角および丸の鋼棒を使用した。

切欠き間隔60mmの試験体については、計測用ボルトA1とA2との間の正面と背面の垂直変位と水平変位を計測した。切欠き間隔100mmの試験体については、計測用ボルトB1とB2との間、B3とB4との間の垂直変位と、水平変位を計測した。各試験体の上部と下部の各々の面内変形(N1,N2,N3,N4)および面外変形(M1,M2,M3,M4,M5,M6)ならびに計測用ボルトA3とA4との間およびB5とB6との間の軸方向変形も合わせて計測した。

切欠き間のひび割れの進展状況を、デジタルマイクロスコープ(KEYENCE VH－6300)で観察した。試験装置の全景および試験体設置状況を写真－１に示す。

3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れ観察と破壊状況

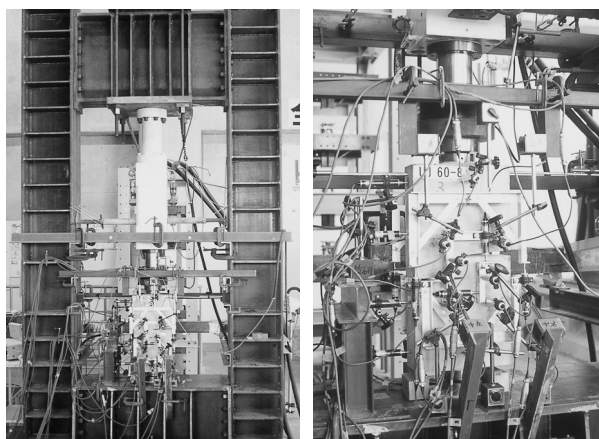
代表的な試験体の最終破壊状況を写真－２に示す。

(1) 一体打ち－UJ60タイプ

UJ60－8、UJ60－9以外の試験体は切欠き間で破壊せず、

表－４ 材料試験結果

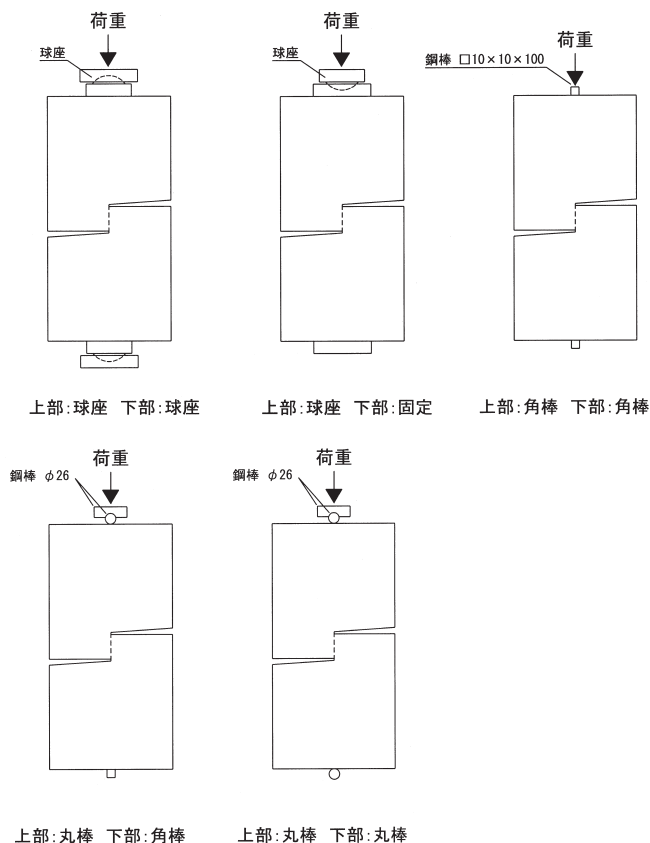
コンクリート 記号	圧縮強度 (N/mm^2)	割裂強度 (N/mm^2)	割線弾性 係数 (kN/mm^2)	破壊 エネルギー (N/mm)
C01	30.4	2.47	28	0.165
C02	35.5	3.0	29	—
C03	31.8	3.0	28	—



載荷装置全景

試験体設置状況

写真－１ 試験装置



図－５ 各試験体の支持条件

試験体の上下の各切欠き先端から数センチ離れたところに曲げによると思われるひび割れ（以下、曲げひび割れと呼ぶ）が発生した。そのひび割れは載荷とともに切欠き間に沿って比較的ゆっくりと進展し、上下の切欠き先端に達した。UJ60-8, UJ60-9では、まず他の試験体と同様に上下の各切欠き先端から数センチ離れたところに曲げひび割れが発生し、載荷とともに切欠き面に沿って比較的ゆっくりとひび割れが進展した。その後、切欠き間の中央部に写真-3に示すようなひび割れがマイクロスコープで観察された。しかし、UJ60-9では中央部のひび割れの進展がしばらくすると止まり、他の試験体と同様に曲げひび割れが進展して破壊した。それに対し、UJ60-8では切欠き面に沿った曲げひび割れよりも、徐々に切欠き間のひび割れが卓越し、切欠き間で破壊した。UJ60-8の最終の破壊の瞬間を写真-4に示す。

(2) 一体打ち-UJ100タイプ

UJ100（切欠き間隔100mm）については、3体のうちUJ100-1とUJ100-2は、切欠き間でひび割れ破壊した。ただ両試験体とも下の切欠き先端から数センチ離れたところに曲げひび割れが発生し、その後切欠き先端に向かっ

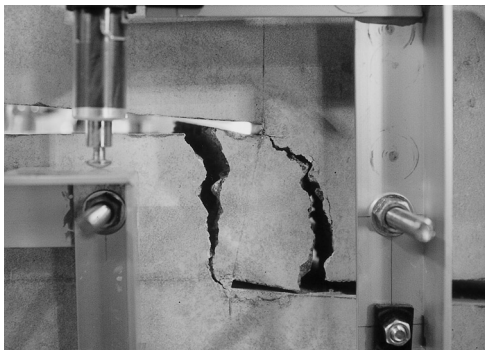
て進展した。UJ100-3は、マイクロスコープによる観察で切欠き間にひび割れの進展が見られたが、上下の各切欠き先端から数センチ離れたところにひび割れが発生し、載荷とともに切欠き面に沿って曲げひび割れが進展し、最終的にはそのひび割れが上下の切欠き先端に達して破壊した。

(3) 打継ぎ-JR60およびJP60タイプ

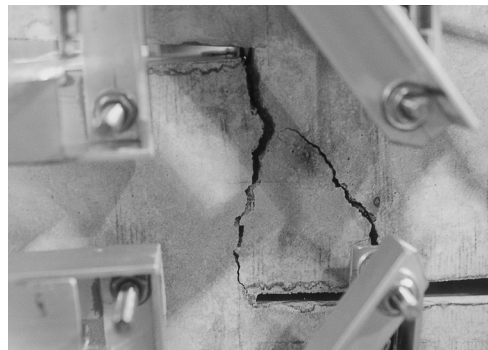
載荷前、JR60-1、JP60-1およびJP60-3の打継ぎ箇所が目視では確認できない程度のひび割れがマイクロスコープで観察された。打継ぎ試験体はいずれも切欠き間で打継ぎ面に沿ってずれ破壊した。特にJPタイプは非常に低速度の載荷にもかかわらず、最終破壊時には音をたてて瞬時に破壊した。打継ぎ試験体では、一体打ちの試験体にみられた切欠き面に沿った曲げひび割れは、いずれにも目視観察では見られなかった。

3.2 最大荷重と垂直変位の関係

各試験体の最大荷重とその時点での計測ボルト間の平均垂直変位 δ との関係を図-6に示す。UJ60タイプの垂直変位には、せん断応力による変形の他に、曲げによる変形成分も含まれているため、UJ60タイプの多くが、



UJ60-1



UJ100-1



JP60-2



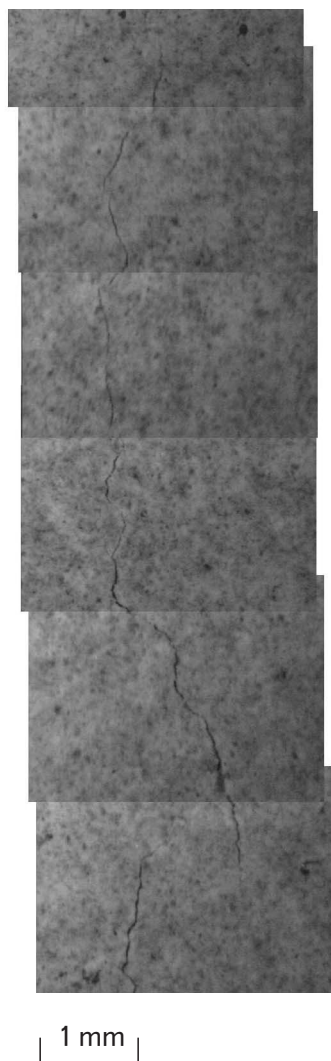
JR60-3

写真-2 代表的試験体の最終破壊状況

他のタイプの試験体にくらべ垂直変位がかなり大きくなっている。

UJ100タイプにおいて、曲げひび割れが発生したにもかかわらず垂直変位がUJ60タイプにくらべ小さい原因は、曲げひび割れが計測用ボルトの外側に発生し、ボルト間の計測では曲げひび割れの変形を計測できていないためである。

最大荷重が20kN程度しか上昇しなかったJR60、JP60タイプで載荷前のマイクロスコープによる観察で、打継ぎ部に損傷が見られた試験体では、適切に打継がれたと考えられる試験体の最大荷重は、JR60、JP60のタイプとも、一体打ちのUJ60タイプの最大荷重と同程度であった。このことから、打継ぎ面の目荒し処理程度が打継ぎ面のせん断付着性能に与える影響は、ひび割れ発生前の弾性変形の範囲では小さいと考えられる。ただし、打継いだ面が平滑なJPタイプの試験体が、試験前に半数程度

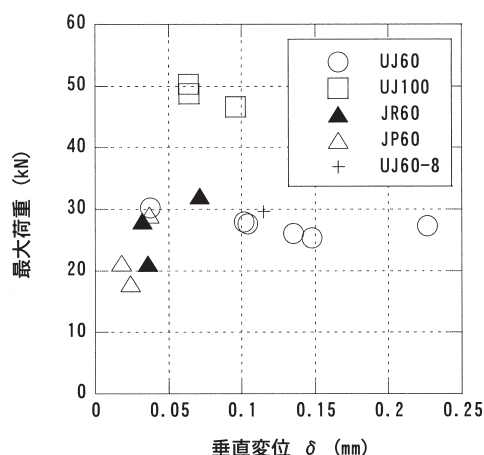


写真－3 UJ60－8試験体においてマイクロスコープにより観察されたひび割れ

破断したことから、打継ぎ目荒し処理の程度が小さいほど試験体製作過程で生じる欠陥による影響を受けやすいと思われる。

3.3 荷重と垂直変位の関係

一体打ちと打継ぎの代表的試験体の荷重 P と垂直変位 δ との関係を図－7および図－9に示す。一体打ちと打継ぎの代表的試験体の荷重 P と垂直変位 δ の比較を図－8に示す。



図－6 最大荷重と垂直変位

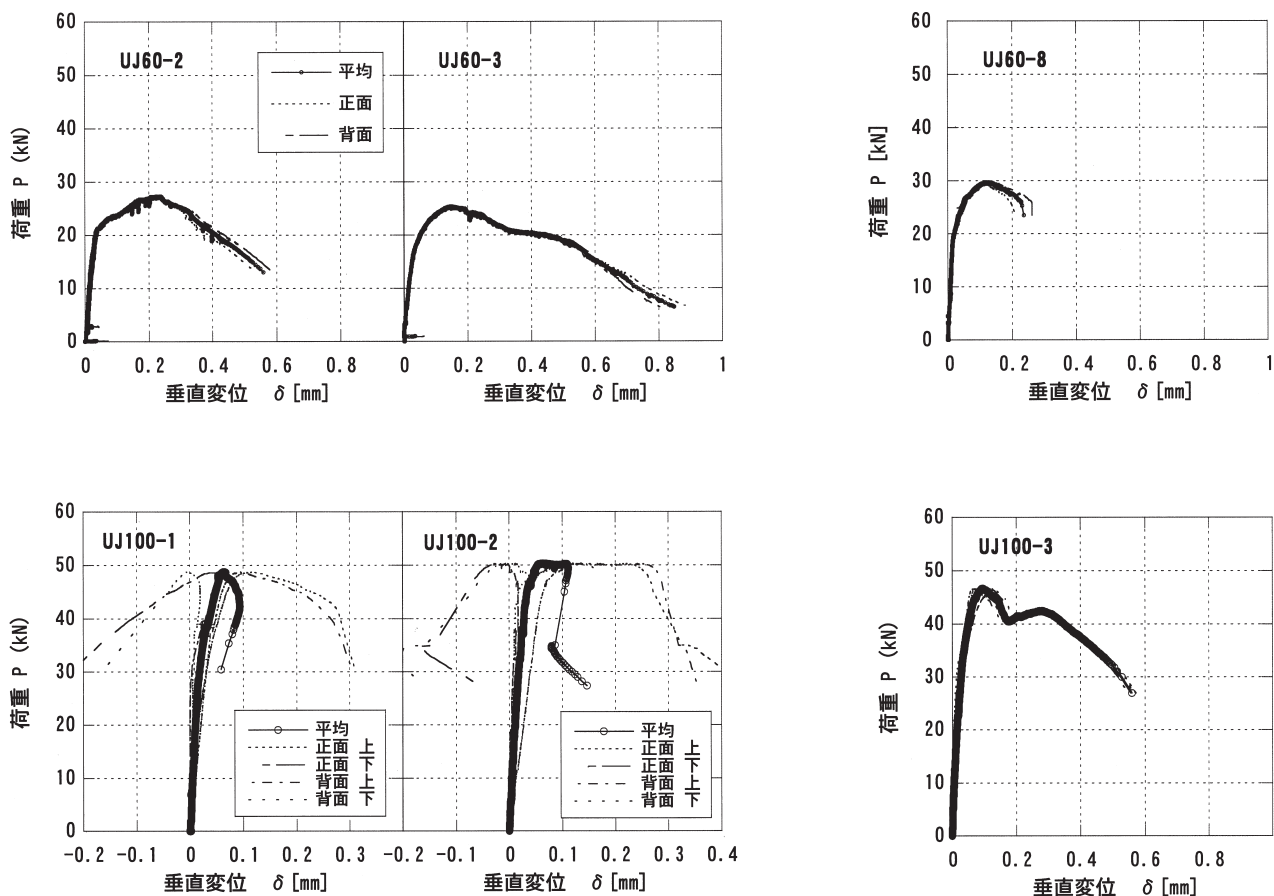


破壊直前



破壊直後

写真－4 UJ60-8試験体の破壊の瞬間



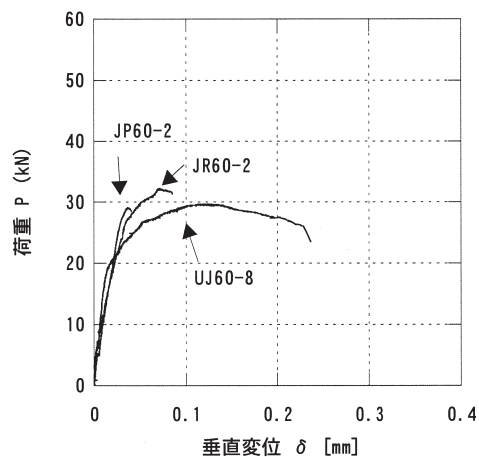
図－7 一体打ち試験体の荷重－垂直変位の関係

(1) 一体打ち－UJ60タイプ

UJ60－2とUJ60－3は、曲げひび割れ発生後大きく剛性が低下し、垂直変位も大きくなり、その曲げひび割れが進展して破壊した。荷重と垂直変位の関係は正面と背面ともほぼ同じであった。UJ60－8は、最大荷重29.7kNに到達後、切欠き間がひび割れ破壊した。

結果としては、上下とも球座としたUJ60－8のみが、切欠き間で破壊する結果となった。このことから、この形式の試験体では、まず曲げひび割れが切欠き近傍に発生し、载荷に伴うひずみエネルギーを開放後、主にせん断応力により引き起こされるひび割れと曲げなどによる高い直応力によって生じるひび割れとが混在した不安定な非線形の破壊状態に移行すると考えられる。しかし、上下球座以外の支持条件では、曲げ力がかかりやすいため、せん断応力により引き起こされるひび割れよりも曲げなどによる高い直応力によって生じるひび割れが卓越したと考えられる。

以上から、この形式の一体打ちコンクリートのせん断



図－8 荷重－垂直変位の比較

試験では、支持条件がひび割れの発生および進展に大きな影響を与えることが明らかになった。

(2) 一体打ち－UJ100タイプ

UJ100－1とUJ100－2は切欠き間で破壊したが、切欠き間が大きくなったため、面外および面内の大きな変形が見られ、垂直変位も载荷方向と逆の方向に振れる破壊

現象がみられた。

(3) 打継ぎ-JR60およびJP60タイプ

図-8からもわかるように打継ぎ試験体の最大荷重時の垂直変位は一体打ちにくらべ小さく、曲げひび割れの発生もみられなかった。

打継ぎ試験体の支持条件が、下部固定で上部のみ球座であったにもかかわらず、曲げひび割れが発生せず、切欠き間で破壊したのは、打継ぎのあるコンクリートでは一体打ちに比べ、ひび割れをともなう損傷領域が打継ぎ部の狭い領域に限定され、曲げの影響を受けにくいと考えられる。

図-10に、打継ぎ面を目荒ししたJR60-2およびJR60-3の試験体における荷重と垂直変位0.15mmまでの関係を示す。これらの試験体では、最大荷重に到達後、ずれ破壊による崩壊が一気に進まずに、荷重がほぼ一定に保持されたまま垂直変位の増大が進む現象(図中のF1、F2、F3部分)が観察された。ただし、JR60-3では背面のみでこの現象が観察された。同様な現象については、

筆者らが以前に報告⁵⁾しており、今回の実験においても確認された。図-10に示すJR60-2およびJR60-3水平変位と垂直変位との関係をみると、この現象がみられる段階の、垂直変位の進行にともなう水平変位の拡大が、それ以前の段階よりも大きくなる傾向が見られた。

破壊後のひび割れ面を観察すると、打継ぎ面に小さなストラットの痕跡が見られたことから、この破壊現象を以下のように解釈する。載荷荷重が大きくなるとともに、打継ぎ部において破壊進行領域が形成され、破壊進行領域での微細な斜めひび割れによるストラットおよび骨材間のブリッジングによって、最大荷重に到達した後もある一定の間、抵抗力を維持するが、破壊の進行とともにストラットが破壊され打継ぎ部が崩壊した現象と考える。JR60-3では、背面から正面に破壊が進行したため、片側においてのみ前述の現象が観察されたと考えられる。また、JR60-1において、このような現象が観察されなかったのは、載荷以前の打継ぎ部の損傷によって、ストラットが十分に形成される前にひび割れが進展して破壊

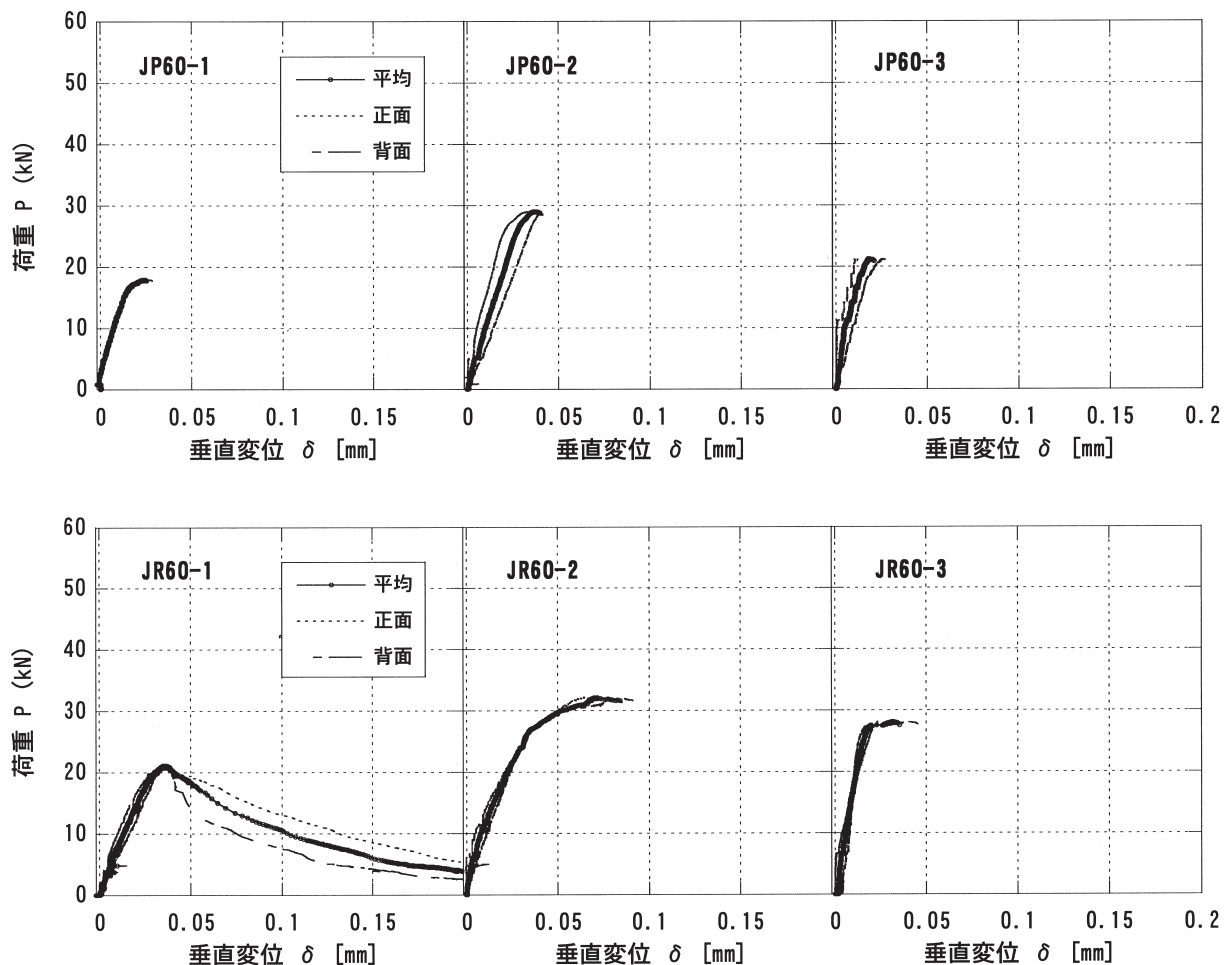


図-9 打継ぎ試験体の荷重-垂直変位の関係

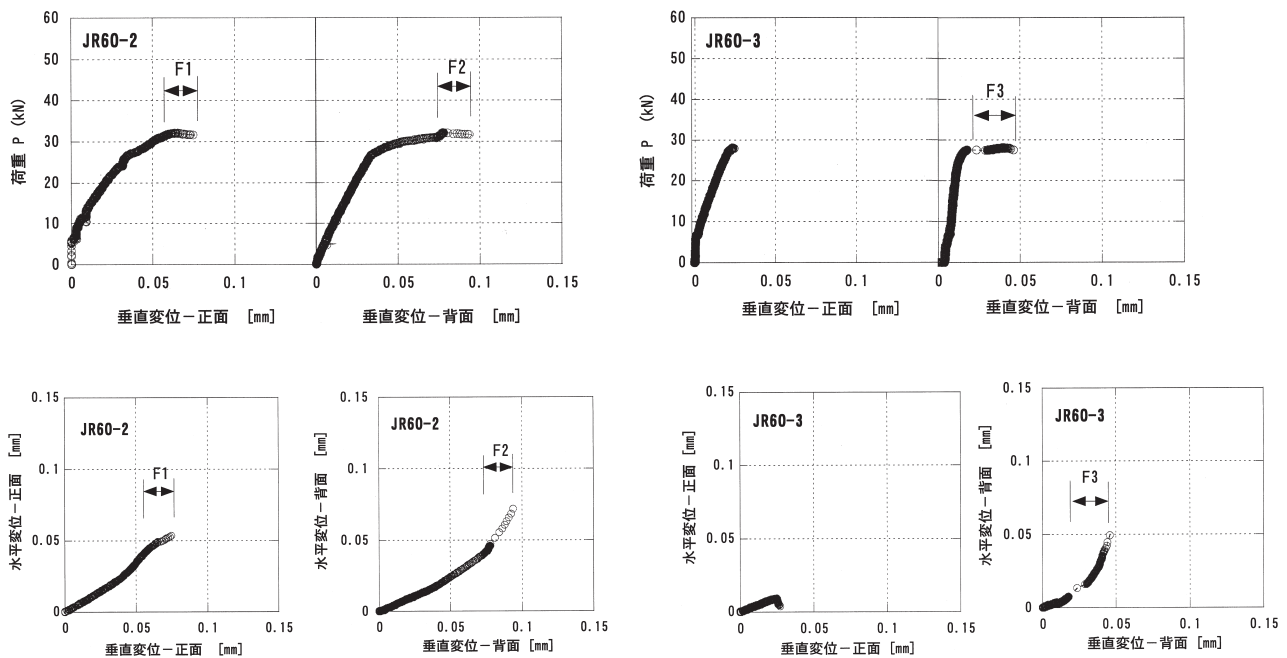


図-10 JR60-2とJR60-3の荷重と垂直変位および水平変位と垂直変位の関係

に至ったためと考えられる。

4. まとめ

今回行った実験から、以下の知見が得られた。

- (1) 今回の実験では、一体打ちのコンクリートのうち支持条件を上下とも球座にした試験体でのみ、切欠き間でせん断破壊した。それ以外の試験体は着目部位以外で曲げによると思われるひび割れによって破壊した。この方式によるせん断試験では、支持条件がひび割れの発生および進展に大きな影響を与える。
- (2) 一体打ちしたコンクリートは切欠き間隔と試験体高さとの比を小さくしても、必ずしもせん断破壊しない。
- (3) 打継ぎのある試験体は、一体打ちの試験体と異なりすべて上下の切欠き間の打継ぎ面で破壊する。
- (4) 今回の実験の範囲では、打継ぎ面のせん断付着性能に与える打継ぎ面の処理程度の影響は、ひび割れ前の弾性変形の範囲では小さく、むしろ試験体の製作過程で生じる欠陥が打継ぎ面のせん断付着性能に影響を与える。
- (5) 目荒しをした打継ぎ試験体において、最大荷重に到達後、荷重がほぼ一定のままで垂直変位および水平変位が進展する。

[謝辞]

本研究は(株)日本コンクリート工学協会の「コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会」の活動の一環として行った。委員会の各委員には貴重な助言を賜り、ここに深い感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) コンクリートの破壊特性の試験方法に関する調査研究委員会報告書、日本コンクリート工学協会、2001年5月
- 2) Watkins, J. and Liu, K.L.W.: A Finite Element Study of the Short Beam Test Specimen under Mode II Loading, International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, Vol.7, No.1, pp.39-47, Feb., 1985
- 3) 魚本 健人、峰松 敏和：コンクリートのせん断強度試験方法に関する基礎的研究、コンクリート工学、Vol.19、No.4、pp.16-27、1981.4
- 4) 東 洋一、磯 健一：組合せ荷重によるコンクリートのせん断強度試験方法(案)、コンクリート工学、Vol.23、No.3、pp.17-28、1985.3
- 5) Ishihara, S. and Mihashi, H.: Experimental Study on Strain Softening Behavior of Shear Fracture in Concrete Structures, Transactions of the 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology, SMiRT-15, Vol.VI, pp.149-160, 1999