

論文 UFC パネルの押抜きせん断抵抗性に関する研究

千明 英祐^{*1}・二羽 淳一郎^{*2}・田中 良弘^{*3}・片桐 誠^{*4}

要旨：優れた流動性，高い圧縮強度および高い靱性といった特徴を有する超高強度繊維補強コンクリート（UFC）が注目されている。本研究では UFC をプレキャストパネルに適用した構造を検討し，この UFC パネルに対して押抜きせん断破壊を考慮する必要性の有無を確認した。載荷スパン，パネル厚さ，載荷板サイズおよびパネル端部の境界条件をパラメータとして UFC パネルを作製し，載荷実験を行った。実験結果より，UFC パネルは押抜きせん断破壊を生じる場合があり，その他にも特有の破壊モードがあることが認められた。本論文では，各パラメータの影響ならびに破壊モードの推移に関して考察した。

キーワード：超高強度繊維補強コンクリート，プレキャストパネル，押抜きせん断

1. はじめに

近年実用化が進んでいるプレキャストパネルは，施工期間の短縮ならびに工場で厳格な管理のもとで作製されることによる品質の安定という利点を持つ。しかし，重量ならびに大きさが輸送・架設などのコストに直接影響するといった検討すべき点もある。このような状況の中で，超高強度繊維補強コンクリート¹⁾（Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete：以下 UFC）が，新材料として注目されている。UFC は，高強度の鋼繊維を混入することで，ひび割れ面における繊維の架橋により高靱性を発揮し，充填構造を最密化することで高い圧縮強度（約 200N/mm²）ならびに優れた耐久性を示す。また，鋼繊維を混入した場合でも高い流動性（フロー値 240mm～270mm）を有するため，振動締固めを行うことなく流込みによって成形が可能である。このように優れた自己充填性を有するために，複雑な形状の部材を比較的容易に作製することが可能となる。高強度の UFC を用いてパネル厚を薄くすることで，部材の重量を軽減できるので，省力化やコスト削減につながると考えられる。

集中荷重下での RC 床版は，曲げひび割れ発生後，

押抜きせん断破壊を生ずる場合がある。このため，様々な押抜きせん断耐力式が提案されている^{2),3),4)}。本研究では UFC パネルに対して同様の破壊モードを示すかどうかの確認を目的として，載荷スパン，パネル厚さ，載荷板サイズおよび端部の境界条件をパラメータとして UFC パネルを作製し，載荷実験を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料ならびに特徴

UFC はセメント，シリカフュームおよび珪石微粉末をあらかじめ混合したプレミックス粉体に水，高性能減水剤および鋼繊維を練り混ぜて製造する。

表－1 に本研究における UFC の配合を示す。鋼繊維は径 0.2mm，長さ 15mm，引張強度 2.5kN/mm² 以上のものを体積比で 2%混入した。流動性はフロー値 270±10mm で管理した。

表－1 UFC の配合 [kg/m³]

水	プレミックス粉体	鋼繊維	高性能減水剤
180	2255	157	28

*1 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻（正会員）

*2 東京工業大学 大学院理工学研究科土木工学専攻教授 工博（正会員）

*3 大成建設(株) 技術センター土木技術開発部 Ph.D.（正会員）

*4 太平洋セメント(株) 中央研究所ダクトル技術開発チーム 博(工)（正会員）

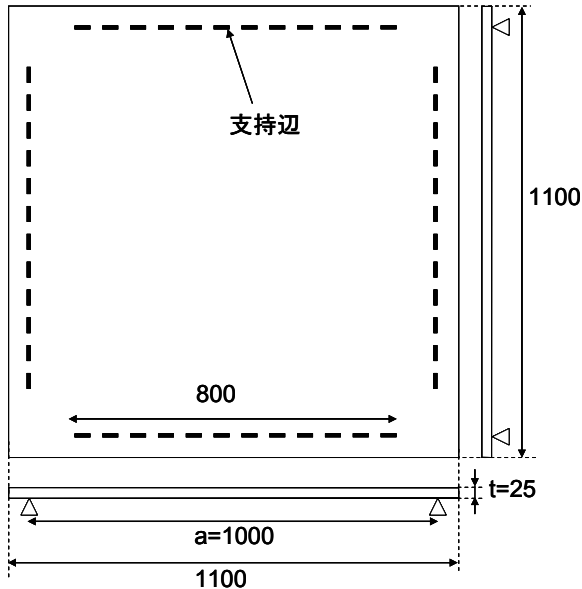
2.2 UFC パネルの載荷実験

(1) 供試体概要

表-2 に示すように実験パラメータは、載荷スパン a を 2 通り、厚さ t を 4 通り、載荷板サイズ b を 3 通り、端部の境界条件を 2 通りとして、これらの組合せにより計 18 体のパネルを作製した。図-1 に示すようにパネルは正方形とし、支持条件は 4 辺支持とした。ここでは例として SL25-50 ならびに FS12.5-50 を示す。支持辺の長さは、載荷スパン 1000mm のケースでは 800mm、載荷スパン 500mm のケースでは 400mm とした。

(2) 境界条件

図-2 に示すように、パネル端部の境界条件は、四隅の浮き上がりを許す単純支持と固定支持の 2



(a) SL25-50

(b) FS12.5-50

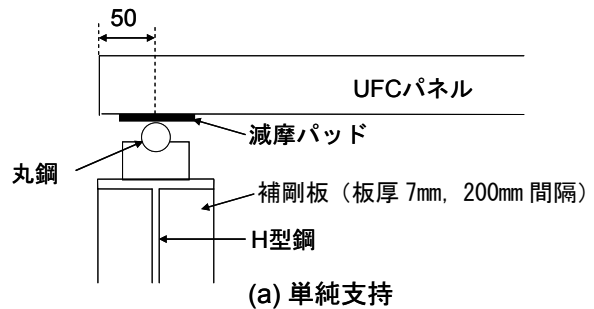
図-1 パネル概要

通りを検討した。境界条件が単純支持のケースでは支持辺に丸鋼を用い、パネル端部の回転ならびにパネルの四隅の浮き上がりを許した。また、支持辺とパネル間には減摩パッドを挿入することで支持辺の拘束による水平反力の発生を防いだ。固定支持のケースではパネル端部を L 型鋼と H 型鋼で挟み、ボルトを用いて固定することで、パネル端部の回転ならびにパネルの四隅の浮き上がりを

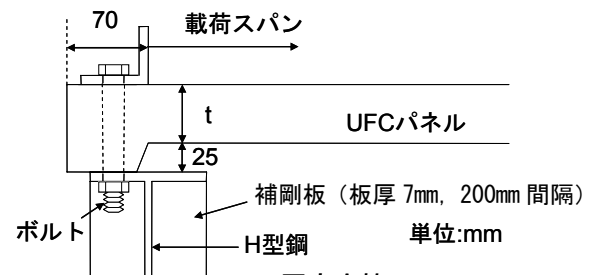
表-2 パラメーター一覧

供試体 名称	境界 条件	a (mm)		t (mm)				b (mm)		
		1000	500	100	50	25	12.5	200	50	25
SL100-50	四辺 単純 支持	○		○					○	
SL50-50		○			○				○	
SL25-200		○				○		○		
SL25-50		○				○			○	
SL25-25		○				○				○
SS100-50			○	○					○	
SS50-50			○		○				○	
SS25-50			○			○			○	
SS12.5-50			○				○		○	
FL100-50	四辺 固定 支持	○		○					○	
FL50-50		○			○				○	
FL25-200		○				○		○		
FL25-50		○				○			○	
FL25-25		○				○				○
FS100-50			○	○					○	
FS50-50			○		○				○	
FS25-50			○			○			○	
FS12.5-50			○				○		○	

供試体名称: [境界条件][載荷スパン a][厚さ t][載荷板サイズ b]
略号: 境界条件 四辺単純支持: S, 四辺固定支持: F
載荷スパン 1000 mm: L, 500 mm: S



(a) 単純支持



(b) 固定支持

図-2 境界条件

許さないようにした。十分な回転剛性を得るために、H型鋼には図-2に示すような保護板を溶接した。固定支持のケースの端部は、締め付けボルトの応力集中によるひび割れ発生を防ぐため、25mm厚くしている。

(3) 実験方法

載荷は3000kN 載荷フレームにて中央集中載荷を行った。主な計測項目は、荷重、パネル下面中央部の変位とし、目視により破壊モードならびにひび割れ進展の観察を行った。パネル下面中央部の変位は、パネル中央下面の鉛直方向変位から、支持辺上中央位置のパネル上面の鉛直方向変位の平均を差し引いた相対変位として算出した。

3. 破壊モードの整理

載荷実験を行った UFC パネルを破壊モードごとに分類し、挙動を整理する。表-3には、各パネルの強度試験結果、最大荷重および破壊モード等を示す。表-3に示すように破壊モードを、曲げ破壊、押抜きせん断破壊および曲げ拔落ち破壊の3種類に分類した。それぞれの破壊モードから、典型的な挙動を示した2体のパネルを選定し、荷重-変位曲線ならびにひび割れ図を示す。以下、ひび割れ図では上側に上面のひび割れ状況を、下側に下面のひび割れ状況を示す。図中で太線を用いて示したひび割れは、終局に際して支配的であり試験終了後にも大きく開口していたひび割れである。また、載荷板ならびにパネル端部の固定部分を破線で示す。

3.1 曲げ破壊

曲げ破壊は、主に境界条件を単純支持としたケースならびに厚さ100mmのケースで観察された。例としてSL50-50ならびにFL100-50の荷重-変位曲線を図-3に、ひび割れ図を図-4に示す。曲げ破壊したパネルでは、パネル下面に中心部から放射状にひび割れが発生し、剛性が低下した。また、パネル上面には同心円状のひび割れが発生した。ピーク後はパネル下面において、中心部から支持辺の端部に向けたひび割れの開口幅が増加し、荷重が緩やかに低下した。

3.2 押抜きせん断破壊

押抜きせん断破壊は、主に境界条件を固定支持としたケースならびに載荷板サイズ25mmのケースで観察された。例としてSL25-25ならびにFS50-50の荷重-変位曲線を図-5に、ひび割れ図を図-6に示す。押抜きせん断破壊したパネルでは、下面の対角線上にひび割れが発生し、剛性が低下した。その後ピーク直後に、急激に荷重は低下し、載荷板の突抜けが発生した。載荷終了後、パネル下面の載荷板が突き抜けた箇所にははつり作業を行い、破壊面の確認を行った。写真-1にSL25-25のはつり後の破壊面を示す。写真に示すように、押抜きせん断破壊特有のコーン状の突抜けが確認できた。はつり作業が行えなかった他のパネルに関しても、写真-1と同様のコーン状の突抜けが発生していることを目視により確認した。

3.3 曲げ拔落ち破壊

曲げ拔落ち破壊は、主に厚さの薄いケースで観察された破壊モードである。例としてSS12.5-50ならびにFL25-200の荷重-変位曲線を図-7に、ひ

表-3 載荷試験結果

供試体 名称	圧縮 強度 [N/mm ²]	ひび割れ 発生強度 [N/mm ²]	弾性 係数 [kN/mm ²]	最大 荷重 [kN]	破壊 モード
SL100-50	210.2	9.02	52.51	285.9	BF
SL50-50	210.2	9.02	52.51	78.6	BF
SL25-200	211.2	9.26	53.85	29.5	BS
SL25-50	210.2	9.02	52.51	27.1	BS
SL25-25	211.2	9.26	53.85	21.5	PS
SS100-50	210.2	9.02	52.51	262.1	BF
SS50-50	210.2	9.02	52.51	88.0	BF
SS25-50	210.2	9.02	52.51	21.2	BF
SS12.5-50	217.3	10.84	53.40	7.0	BS
FL100-50	217.3	10.84	53.40	278	BF
FL50-50	217.3	10.84	53.40	104.1	PS
FL25-200	215.5	10.88	54.73	30.9	BS
FL25-50	215.5	10.88	54.73	25.1	BS
FL25-25	211.2	9.26	53.85	22.9	PS
FS100-50	217.3	10.84	53.40	344	BF
FS50-50	217.3	10.84	53.40	135.2	PS
FS25-50	217.3	10.84	53.40	41.9	PS
FS12.5-50	217.3	10.84	53.40	12.9	PS

破壊モード： 曲げ破壊：BF，押抜きせん断破壊：PS
曲げ拔落ち破壊：BS

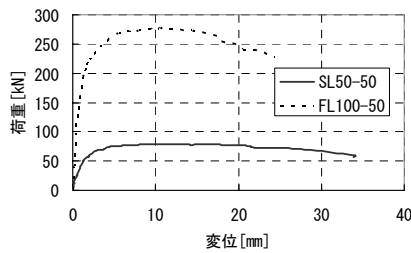


図-3 荷重－変位曲線(BF)

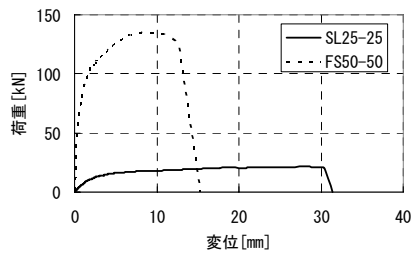


図-5 荷重－変位曲線(PS)

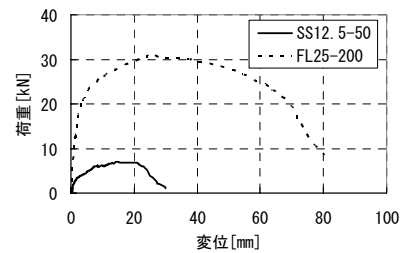
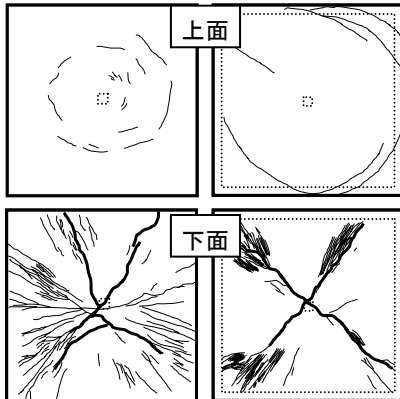
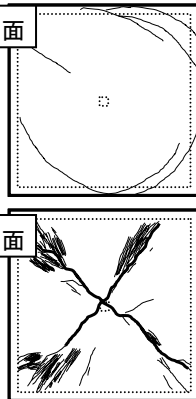


図-7 荷重－変位曲線(BS)

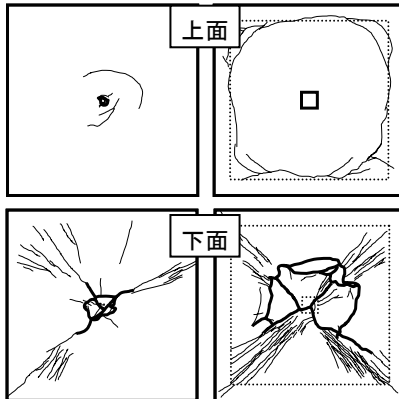


(a) SL50-50

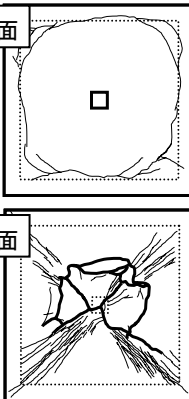


(b) FL100-50

図-4 ひび割れ図(BF)

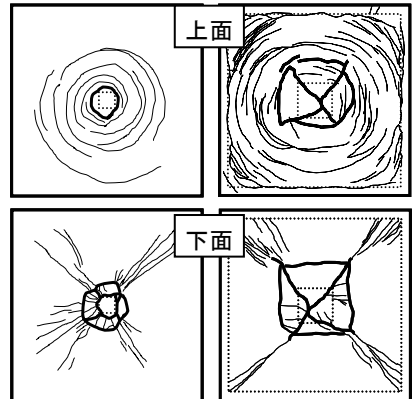


(a) SL25-25



(b) FS50-50

図-6 ひび割れ図(PS)



(a) SS12.5-50

(b) FL25-200

図-8 ひび割れ図(BS)

ひび割れ図を図-8に示す。曲げ抜落ち破壊したパネルでは、下面に中心部から放射状にひび割れが発生し、剛性が低下した。また、パネル上面には同心円状のひび割れが外側から順に発生した。ピーク後は図-9に示すように、パネル上面の載荷板周囲のひび割れが開口し、載荷板と共に下側に沈み込むことで終局に至った。載荷試験は、変位が急激に増加した時点で終了した。この破壊モードは、パネル下面の曲げひび割れが開口した曲げ破壊や、載荷板直下がコーン状に突き抜けた押抜きせん断破壊とは異なることから、曲げ抜落ち破壊と呼ぶこととする。パネル上面の同心円状のひび割れは、他の破壊モードとなったパネルに比べて本数が多く、上面に放射状に引張応力が作用したことが分かる。通常のRC床版ではこの破壊形態の例が無いことから、厚さが薄く変形能力が高いUFCパネル特有の破壊モードと言える。

4. 各パラメータの影響と破壊モードの推移

各パラメータがパネルの挙動に与える影響ならびに破壊モードの推移について考察する。

4.1 載荷スパンならびに厚さの影響

境界条件が単純支持で曲げ破壊したケースに関



写真-1 破壊面(SL25-25)

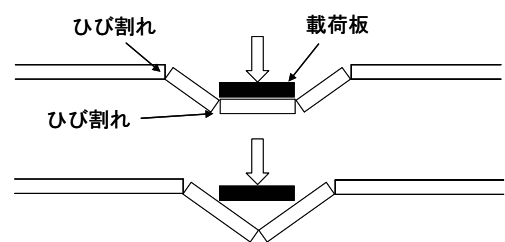


図-9 抜落ち概念図

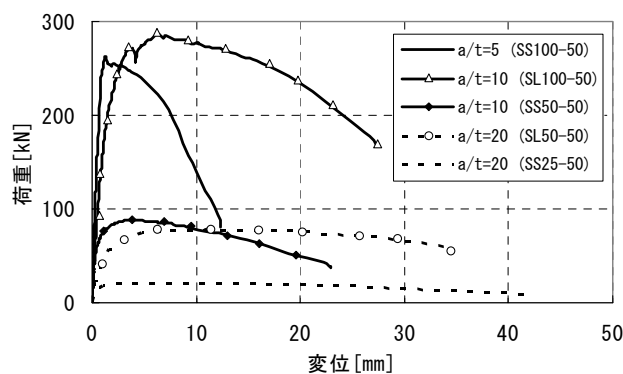
して載荷スパンパネル厚さ比 a/t による比較を行う。載荷板サイズ 50mm のケースの荷重－変位曲線を図-10に、ひび割れ図を図-11に示す。

ピーク後の挙動を見ると a/t が等しいケースではほぼ同様の傾きで荷重が低下しており、 a/t が小さくなるほど脆性的な挙動を示すことが分かる。これは図-11に示すように a/t が小さくなるとともに、ひび割れが集中し、このため十分な鋼繊維の架橋効果が発揮されず、ピーク後に脆性的な挙動を示

したものとする。

4.2 境界条件の影響

境界条件が異なる載荷板サイズ 50mm のケースの荷重－変位曲線を図－12 に、ひび割れ図を図－13 に示す。全てのケースで境界条件を固定支持とすることで、単純支持のケースに比べ、耐力は同等以上となった。境界条件を固定支持とすることで載荷スパン 500mm のケースでは耐力が上昇するが、1000mm のケースでは変化が無いことが分かる。載荷スパン 500mm のケースでは、図－13 に示すパネル下面の曲げひび割れの進展後、上面の固定支

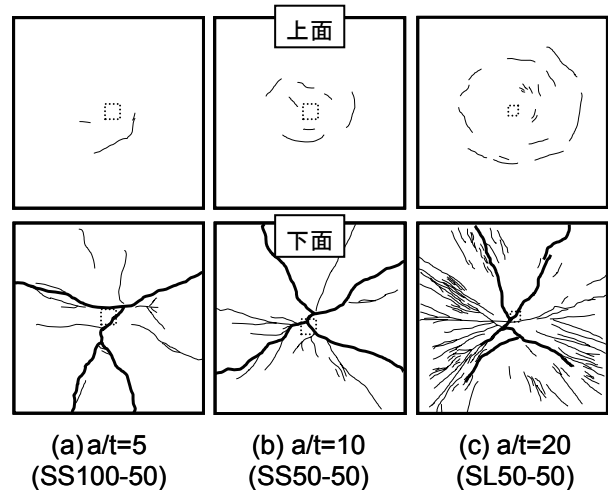


図－10 荷重－変位曲線(a/t による比較)

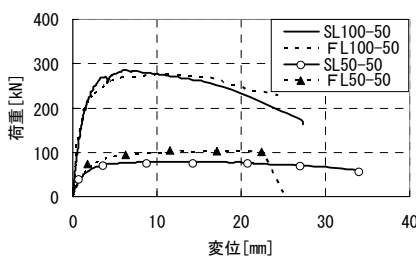
持辺の近傍に負曲げによるひび割れが発生したのに対し、1000mm のケースでは載荷初期から発生していたことから、1000mm のケースでは境界条件が単純支持のケースに近い挙動を示していたものとする。

4.3 載荷板サイズの影響

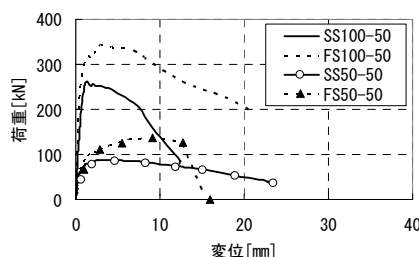
境界条件を単純支持とした載荷板サイズが異なるケースの荷重－変位曲線を図－14 に、ひび割れ図



図－11 ひび割れ図(a/t による比較)

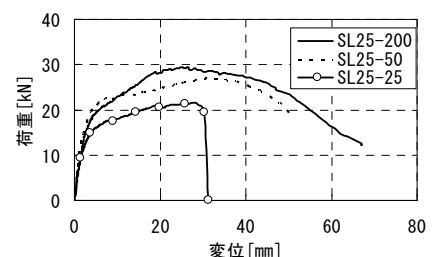


(a) 載荷スパン1000mm

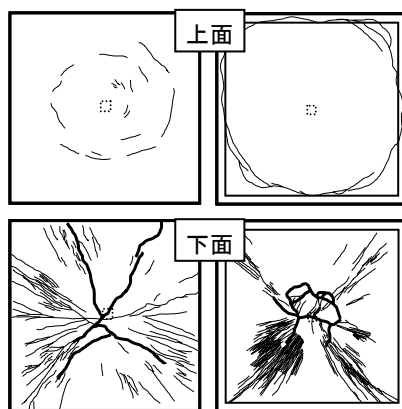


(b) 載荷スパン500mm

図－12 荷重－変位曲線(境界条件による比較)

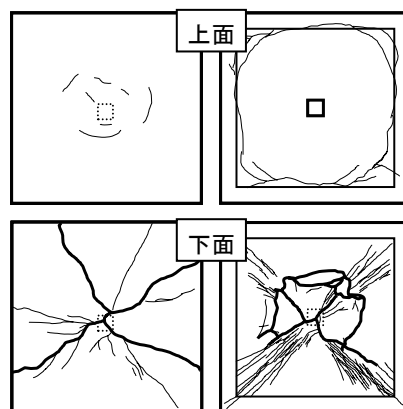


図－14 荷重－変位曲線
(載荷板サイズによる比較)



(a) SL50-50

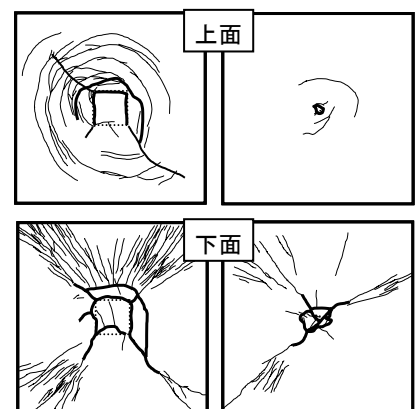
(b) FL50-50



(c) SS50-50

(d) FS50-50

図－13 ひび割れ図(境界条件による比較)



(a) SL25-200

(b) SL25-25

図－15 ひび割れ図
(載荷板サイズによる比較)

を図-15 に示す。図-14 に示すように載荷板が小さくなると、耐力ならびに靱性が落ち、ピーク後も脆性的になることが分かる。これは、図-15 に示すように、載荷板が小さくなるとパネル上下面のひび割れの本数が減少する傾向があることから、ひび割れ発生箇所が集中すること起因していると考えられる。また破壊モードは、SL25-200 ならびに SL25-50 では曲げ抜落ち破壊をし、SL25-25 では、押抜きせん断破壊をした。載荷板サイズ 25mm のケースでは境界条件に関わらず押抜きせん断破壊をしている。載荷板サイズが小さいとコーン状の破壊面積が小さくなり、最大せん断応力により早く達したと考える。

4.4 破壊モードの推移

載荷板サイズが 50mm のケースに関して、境界条件を単純支持と固定支持としたそれぞれのケースにおける a/t と破壊モードの関係を表-4 に示す。境界条件を単純支持としたケースでは a/t が 5~20 で曲げ破壊を、40 で曲げ抜落ち破壊を生じたのに対し、境界条件を固定支持としたケースでは、 a/t が 5~10 で曲げ破壊、10~40 で押抜きせん断破壊、40 で曲げ抜落ち破壊が生じた。このことから a/t を大きくすると曲げ破壊、押抜きせん断破壊、曲げ抜落ち破壊の順に破壊モードが推移することが分かる。また境界条件を固定支持とすることで、 a/t が小さくても、押抜きせん断破壊が生じた。固定支持下では、単純支持のケースと同等のせん断力が作用した場合でも、パネル中央部におけるモーメントは小さくなる。このため固定支持の場合、曲げ変形が卓越せず、載荷板直下に変形が集中したものとする。

5. まとめ

- (1) 集中荷重下の UFC パネルには、曲げ破壊、押抜きせん断破壊、曲げ抜落ち破壊の 3 種類の破壊モードがあることが認められた。このうち、曲げ抜落ち破壊は、パネル上面の載荷板周囲のひび割れが開口し、載荷板と共に下側に抜け落ちるようにして終局に至る破壊モードであり、厚さが薄く変形能力の高い UFC パネル特有のものであると言える。

表-4 a/t と破壊モードの関係

供試体 名称	境界 条件	a (mm)	t (mm)	b (mm)	a/t	破壊 モード
SS100-50	単純 支持	500	100	50	5	BF
SL100-50		1000	100	50	10	BF
SS50-50		500	50	50	10	BF
SL50-50		1000	50	50	20	BF
SS25-50		500	25	50	20	BF
SL25-50		1000	25	50	40	BS
SS12.5-50		500	12.5	50	40	BS
FS100-50	固定 支持	500	100	50	5	BF
FL100-50		1000	100	50	10	BF
FS50-50		500	50	50	10	PS
FS25-50		500	25	50	20	PS
FL50-50		1000	50	50	20	PS
FS12.5-50		500	12.5	50	40	PS
FL25-50		1000	25	50	40	BS

破壊モード: 曲げ破壊: BF, 押抜きせん断破壊: PS
曲げ抜落ち破壊: BS

- (2) 載荷スパンパネル厚さ比 a/t を大きくすると曲げ破壊、押抜きせん断破壊、曲げ抜落ち破壊の順に破壊モードが推移する。また a/t を小さくすると曲げひび割れの発生が集中し、ピーク後に脆性的な挙動を示す。
- (3) 境界条件を単純支持としたケースに比べ固定支持としたケースの方が押抜きせん断破壊を生じやすい。ただし載荷板サイズを小さくすると、パネル端部の境界条件に関わらず押抜きせん断破壊を生じる傾向にある。

参考文献

- 1) 土木学会: 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案), コンクリートライブラリー, 第 113 号, 2004
- 2) 土木学会: コンクリート標準示方書 (構造的な性能照査編), 土木学会, 2002.3
- 3) 角田與史雄, 井藤昭夫, 藤田嘉夫: 鉄筋コンクリートスラブの押抜きせん断耐力に関する実験的研究, 土木学会論文報告集, 第 229 号, pp.105-115, 1974.9
- 4) 前田幸雄, 松井繁之: 鉄筋コンクリート床版の押抜きせん断耐力の評価式, 土木学会論文集, 第 348 号, V-1, pp.133-141, 1984.8