

## 6. 短繊維補強軽量 2 種コンクリートを用いた RC 版の押抜きせん断耐力評価

梶原 秀夫

## 1. 目的

近年、コンクリート構造物の大型化に伴う自重軽減、耐震性向上、基礎構造物への負荷軽減などを目的に軽量コンクリートの研究が行われている。軽量 2 種コンクリート（以下、SL）は普通コンクリート（以下、N）の単位体積質量  $2.3\text{t/m}^3$  と比較すると単位体積質量  $1.6 \sim 1.8\text{t/m}^3$  程度と非常に軽い。骨材自体の強度が小さいことによる引張、せん断強度の低下が顕著である。また N と比較して脆性的に破壊することが知られている。このような強度特性および破壊特性の改善方法として短繊維による補強が一般的である。短繊維の中でも鋼繊維は強度特性に優れるため多くの研究がなされてきた。また、近年では合成繊維の適用が増加している。

短繊維補強されたコンクリート部材のひび割れ進展解析では、ひび割れ先端の引張軟化現象をモデル化し、破壊エネルギーや引張軟化曲線を数値解析に組み込む必要があるが、適切な評価方法が確立していないのが現状である。

本研究ではピニロン（以下、V）、ポリエチレン（以下、PE）、鋼繊維（以下、ST）を対象として、短繊維補強による N、SL の各種強度試験を行い、短繊維混入率（以下、混入率）を考慮した各種強度評価式の提案を行った。また、切欠きはりを用いた 3 点曲げ試験を行い、得られた荷重 - ひび割れ開口変位（以下、CMOD）関係から引張軟化曲線を推定した。さらに、引張軟化曲線を簡便に取り扱うためにモデル化を検討し、モデル式を提案した。これら 2 つの提案式から短繊維補強された軽量 2 種コンクリートを用いた RC 版のせん断耐力評価へのアプローチを行い、破壊メカニズムに即したせん断耐力評価式を提案することを目的とする。

## 2. 内容

## 2.1 使用材料

使用材料を表 - 1 に示す。SL の粗骨材および細骨材は全て膨張頁岩系の人工軽量骨材を使用した。短繊維は図 - 1 および表 - 2 に示す V、PE および ST を使用し、繊維長を各繊維 30mm とした。また、V はストレートタイプ、PE は集束タイプ、ST はフックエンドタイプを使用した。

## 2.2 試験体および試験概要

試験体および示方配合を表 - 3 に示す。試験体はコンクリート種類、短繊維種類および混入率  $V_f$  をパ

ラメータとした。コンクリートは N および SL、各繊維の混入率（体積比）は施工性を考慮して、V は 0.5、1.0、1.5%、PE は 0.5、1.0%、ST は 0.4、0.8、1.2% とし、短繊維無補強の N および SL を加えた計 18 タイプとした。スラブは N、SL 各々  $10\text{cm} \times 18\text{cm}$ 、空気量は 4.5%、5.0% に設定した。28 日の圧縮強度の目標を  $40\text{N/mm}^2$  程度とした。

試験は各種強度試験および切欠きはりを用いた 3 点曲げ試験を行った。強度試験はコンクリート標準示方書に準じて圧縮、割裂引張、曲げ、せん断強度試験、静弾性係数試験を各タイプ 3 体以上実施した。一方、3 点曲げ試験は JCI 規準・指針の「切欠きはりを用いた繊維補強コンクリートの荷重 - 変位曲線試

表 - 1 使用材料

種類	記号	性質
普通ポルトランドセメント	C	密度: $3.16\text{t/m}^3$ 比表面積: $3890\text{cm}^2/\text{g}$
海砂	普通S	表乾密度: $2.58\text{t/m}^3$ 吸水率: $1.79\%$ 、粗粒率: $2.71$
碎石	普通G	表乾密度: $2.88\text{t/m}^3$ 吸水率: $1.92\%$ 、 $G_{\text{max}}$ : $20\text{mm}$
人工軽量細骨材	軽量S	絶乾密度: $1.68\text{t/m}^3$ 、粗粒率: $2.69$ 24時間吸水率: $10.0\%$ 、実績率: $53.2\%$
人工軽量粗骨材	軽量G	絶乾密度: $1.27\text{t/m}^3$ 、粗粒率: $6.47$ 24時間吸水率: $10.3\%$ 、実績率: $63.1\%$ $G_{\text{max}}$ : $15\text{mm}$
高性能 AE 減水剤	SP	主成分:ポリカルボン酸系化合物 密度: $1.05 \sim 1.09\text{t/m}^3$
AE 剤	AE	密度: $1.06 \sim 1.10\text{t/m}^3$

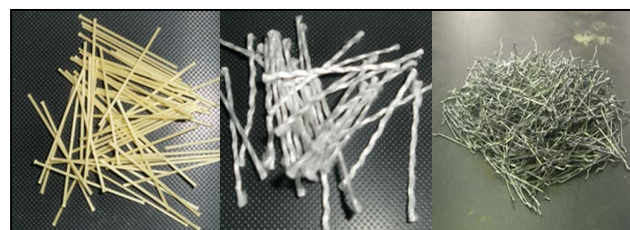


図 - 1 使用短繊維

表 - 2 短繊維特性

短繊維種別	密度 ( $\text{t/m}^3$ )	繊維長 (mm)	繊維径 ( $\mu\text{m}$ )	引張強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	ヤング係数 ( $\text{kN/mm}^2$ )
ピニロン (V)	1.30	30	660	900	23
ポリエチレン (PE)	0.97	30	68	1870	43
鋼 (ST)	7.85	30	620	1000	200

表 - 3 示方配合および強度試験結果

タイプ	コンクリート	繊維	混入率 (%)	W/C (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					単位容積質量 (t/m <sup>3</sup> )	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	曲げ強度 (N/mm <sup>2</sup> )	せん断強度 (N/mm <sup>2</sup> )	ヤング係数 (kN/mm <sup>2</sup> )		
					W	C	S	G	F								
N-00	N	なし	0.0	50.0	190	380	782	984	0.0	2.42	35.9	3.05	4.78	5.00	33.1		
N-V-05		V	0.5		190	380	776	977	6.5	2.39	41.2	3.75	5.06	4.71	30.0		
N-V-10			1.0		190	380	770	969	13.0	2.38	41.9	3.76	7.33	5.63	29.5		
N-V-15			1.5		190	380	764	961	19.5	2.40	42.8	4.65	8.22	6.97	30.6		
N-PE-05			PE		0.5	190	380	776	977	4.9	2.36	37.8	3.40	4.28	4.03	30.7	
N-PE-10		1.0			190	380	770	969	9.7	2.30	37.3	3.58	5.43	5.30	26.9		
N-ST-04		ST	0.4		213	425	868	859	31.4	2.44	42.3	3.65	5.46	5.85	31.2		
N-ST-08			0.8		212	423	864	855	62.8	2.40	45.2	4.19	7.15	6.34	31.0		
N-ST-12			1.2		211	422	860	852	94.2	2.44	44.3	4.73	8.09	8.23	30.8		
SL-00			SL		なし	0.0	47.5	190	422	609	333	0.0	1.64	46.5	2.08	2.90	3.83
SL-V-05		V			0.5	190		422	605	331	6.5	1.64	44.4	3.00	2.91	3.84	14.8
SL-V-10					1.0	190		422	601	329	13.0	1.64	45.5	4.07	5.95	4.65	15.2
SL-V-15	1.5			190	422	596		326	19.5	1.67	49.9	4.49	9.53	4.99	16.5		
SL-PE-05	PE			0.5	190	422		605	331	4.9	1.64	34.4	2.60	3.47	2.81	14.1	
SL-PE-10		1.0		190	422	601		329	9.7	1.64	31.6	2.99	5.81	3.50	12.7		
SL-ST-04	ST	0.4		232	487	539		406	31.4	1.73	31.3	2.79	5.21	4.13	14.5		
SL-ST-08		0.8		230	484	535		403	62.8	1.77	34.2	3.59	5.88	4.15	14.9		
SL-ST-12		1.2		228	480	531		400	94.2	1.81	39.2	3.93	7.26	4.82	14.7		

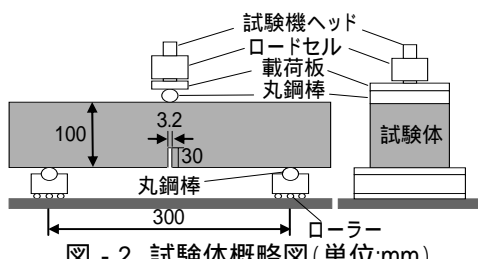


図 - 2 試験体概略図(単位:mm)

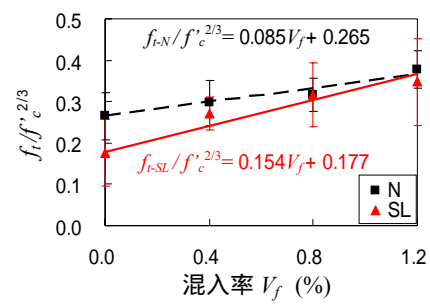


図 - 3 引張強度と混入率の関係 (ST)

験方法 (JCI-S-002-2003)」に準じて各タイプ 5 体実  
 施した。図 - 2 に試験体概略図を示す。計測項目は  
 荷重、載荷点の鉛直変位、ひび割れ開口変位とした。

2.3 強度評価式

表 - 3 に各種強度試験結果を示す。コンクリート標  
 準示方書では引張および曲げ強度と圧縮強度の関係  
 式を  $f = \alpha f_c^{2/3}$  ( $f$ :各強度,  $\alpha$ :係数,  $f_c$ :圧縮強度) で評  
 価している。そこで、今回の試験結果に加え、過去  
 のデータも含めて同様な形で短繊維毎に式の提案を  
 行った(以下、強度評価式)。強度評価式の算出に際  
 して、混入率毎にデータを分別し、圧縮強度を考慮  
 した各強度、つまり  $f/f_c^{2/3}$  の値を算出した。有効な  
 データはこれらの平均値から  $\pm 2\sigma$  ( $\sigma$ :標準偏差)の  
 範囲内における値とした(引張: N - 101 (数字は有  
 効データ数), SL - 151, 曲げ: N - 45, SL - 79, せ  
 ん断: N - 58, SL - 89)。一例として ST の引張強度

表 - 4 強度評価式

タイプ	強度評価式	決定係数 R <sup>2</sup>	適用範囲				
			混入率 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )			
V	引張	$f_t = (0.065xV_f + 0.265) \times f_c^{2/3}$	0.835	0 ~ 1.5	28.2 ~ 45.0		
	曲げ	$f_b = (0.174xV_f + 0.406) \times f_c^{2/3}$	0.894				
	せん断	$f_{cv} = (0.093xV_f + 0.398) \times f_c^{2/3}$	0.797				
	SL	引張	$f_t = (0.116xV_f + 0.177) \times f_c^{2/3}$			0.912	35.0 ~ 52.4
		曲げ	$f_b = (0.275xV_f + 0.225) \times f_c^{2/3}$			0.856	
		せん断	$f_{cv} = (0.052xV_f + 0.296) \times f_c^{2/3}$			0.866	
PE	引張	$f_t = (0.052xV_f + 0.265) \times f_c^{2/3}$	0.999	0 ~ 1.0	28.2 ~ 45.0		
	曲げ	$f_b = (0.053xV_f + 0.406) \times f_c^{2/3}$	0.431				
	せん断	$f_{cv} = (0.045xV_f + 0.398) \times f_c^{2/3}$	0.301				
	SL	引張	$f_t = (0.114xV_f + 0.177) \times f_c^{2/3}$			0.997	29.6 ~ 49.2
		曲げ	$f_b = (0.327xV_f + 0.225) \times f_c^{2/3}$			0.934	
		せん断	$f_{cv} = (0.056xV_f + 0.296) \times f_c^{2/3}$			0.985	
ST	引張	$f_t = (0.085xV_f + 0.265) \times f_c^{2/3}$	0.945	0 ~ 1.2	28.2 ~ 46.8		
	曲げ	$f_b = (0.176xV_f + 0.406) \times f_c^{2/3}$	0.961				
	せん断	$f_{cv} = (0.146xV_f + 0.398) \times f_c^{2/3}$	0.942				
	SL	引張	$f_t = (0.154xV_f + 0.177) \times f_c^{2/3}$			0.887	28.0 ~ 49.2
		曲げ	$f_b = (0.290xV_f + 0.225) \times f_c^{2/3}$			0.635	
		せん断	$f_{cv} = (0.109xV_f + 0.296) \times f_c^{2/3}$			0.797	

と混入率の関係を図 - 3 に示す。これより  
 を混入率の 1 次関数として各強度評価式を導出した。表 - 4  
 に、各強度評価式を示す。強度評価式の  $V_f$  の係数は  
 短繊維の補強効果を表すが、図 - 3 より一部を除い  
 て各短繊維の補強効果は SL が N よりも大きく、混  
 入率の増加による強度の向上効果が顕著である。

2.4 引張軟化特性

2.4.1 荷重 - CMOD 関係および引張軟化曲線の推定

切欠きはりの 3 点曲げ試験から得られた荷重 -  
 CMOD 関係を図 - 4 に示す。一例として N-00, SL-00  
 および N-ST, SL-ST の結果を示す。同図は各タイプ  
 4 体以上の試験体の平均値を示している。同図より、  
 N-00 および SL-00 はひび割れ発生後急激な荷重低下  
 とともに軟化挙動を示し、SL-00 は N-00 よりも脆性  
 的であった。鋼繊維補強した場合、ひび割れ発生後  
 一旦は荷重が低下するが、N の場合、0.4%は最大荷

重の 5 割, 0.8% は 7 割, 1.2% は 9 割で荷重を保持し, その後緩やかに低下した. SL の場合, 0.4% は最大荷重の 5 割, 0.8% は 9 割の荷重を保持し, 1.2% は急激な荷重の低下が見られなかった. 繊維を混入することにより, ひび割れ発生後に架橋効果が顕著に現れることが確認された.

荷重 - CMOD 関係から多直線近似法を用いて引張軟化曲線の推定を行った. 引張軟化曲線の推定には JCI で公開されて

いる逆解析プログラムを用いた. これより得られた荷重 - CMOD 関係の解析値を図 - 4 に, 引張軟化曲線を図 - 5 に示す. 図 - 4 より最大荷重およびそれ以降の挙動は試験値と解析値でよく一致していることが確認された.

### 2.4.2 引張軟化曲線のモデル化

図 - 5 に示す引張軟化曲線を簡便に扱うために東山らの研究を参考にしてモデル化の検討を行った. 一般に, N-00 の引張軟化曲線は簡易的に 2 直線で表され, その折曲がり点応力 (以下,  $\sigma_{BP1}$ ) は引張軟化開始点応力の 1/4 としたモデルが多用されている. 本研究では, N-00 および SL-00 は従来通り 2 直線でモデル化を行う. N-ST, SL-ST については 3 直線でモデル化を行った. 図 - 6 に引張軟化曲線のモデルを示す. SL-V および SL-PE はすべてのタイプにおいてひび割れ発生後一旦荷重が低下し, ある一定の荷重を保持した後, 再び荷重が回復する現象が見られた. そこで再現性をよくするために, 同図の 4 直線モデル採用した.

1/4 モデルを引張軟化曲線に適用すると,  $\sigma_{BP1}$  は推定値より小さな値となる. そこで, 本研究では N の場合,  $\sigma_{BP1}$  を軟化開始点応力の 1/3 としたモデルを基本とし, N-V, N-ST の  $\sigma_{BP1}$  は混入率の影響を考慮した値とした. そのときのひび割れ幅  $W_1$  は混入率に

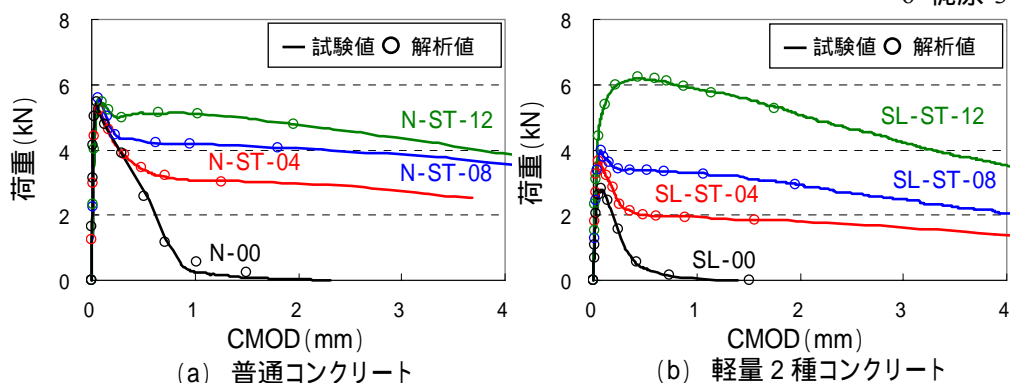


図 - 4 荷重 - CMOD 関係および解析値との比較 (ST)

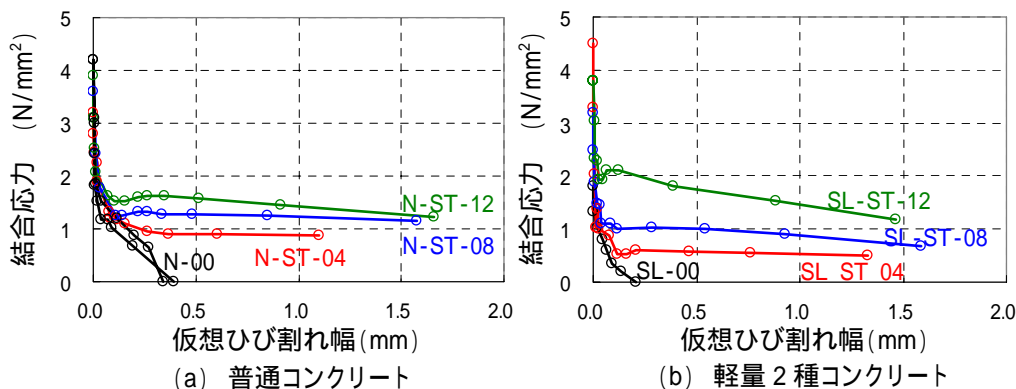


図 - 5 引張軟化曲線 (ST)

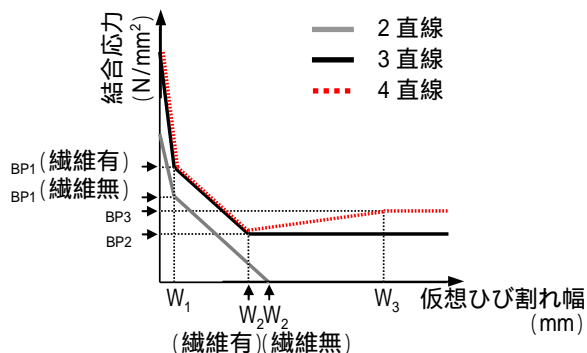


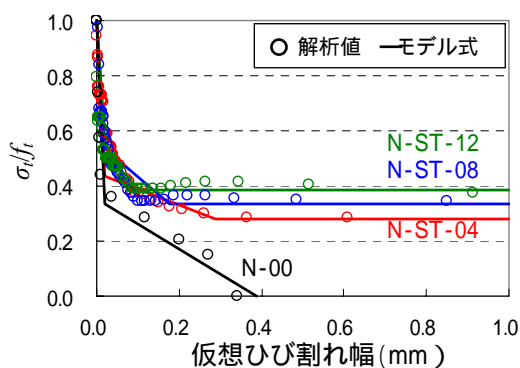
図 - 6 引張軟化曲線モデル

よる値の変動率が小さく, 一定値の  $0.20G_f/f_t$  とした. SL の場合,  $\sigma_{BP1}$  は 1/2 モデルを基本とし, SL-ST の  $\sigma_{BP1}$  は混入率の影響を考慮した.  $W_1$  は一定値の  $0.30G_f/f_t$  とした. ここで,  $G_f$  は N-00, SL-00 の破壊エネルギー, つまり図 - 5 に示す N-00, SL-00 の引張軟化曲線下の面積である. また,  $f_t$  は各タイプの割裂引張強度である. 混入率による影響を考慮しながら第 2, 第 3 折曲がり点についても決定した. 図 - 7, 表 - 5 に引張軟化曲線のモデルを示す. また, 各種短繊維補強コンクリートは最終破壊まで至ることができなかったため, 3 直線では第 2 折曲がり点以降, 4 直線では第 3 折曲がり点以降の結合応力を一定の値とした.

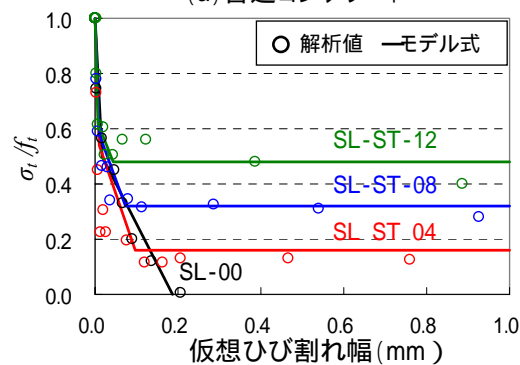


表 - 5 引張軟化曲線のモデル式

タイプ	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	第1折曲がり点		第2折曲がり点		第3折曲がり点	
		BP1	W <sub>1</sub>	BP2	W <sub>2</sub>	BP3	W <sub>3</sub>
N-00	3.26	$f_t/3$		0	$3.6G_f/f_t$	-	-
N-V-05	3.13	$(0.18V_f + 1/3)f_t$	$0.20G_f/f_t$	$0.28V_f f_t$	$(-0.40V_f + 3.6G_f)/f_t$	-	-
N-V-10	3.24						
N-V-15	4.43						
N-PE-05	3.04	$f_t/3$	$0.20G_f/f_t$	$0.21V_f f_t$	$(-0.80V_f + 3.6G_f)/f_t$	-	-
N-PE-10	3.60						
N-ST-04	2.99						
N-ST-08	3.26	$(0.25V_f + 1/3)f_t$	$0.20G_f/f_t$	$(0.13V_f + 0.23)f_t$	$(-0.70V_f + 3.6G_f)/f_t$	-	-
N-ST-12	4.01						
SL-00	1.89	$f_t/2$	$0.30G_f/f_t$	0	$3.6G_f/f_t$	-	-
SL-V-05	3.20						
SL-V-10	4.29						
SL-V-15	4.07	$f_t/2$	$0.30G_f/f_t$	$0.18V_f f_t$	$(0.25V_f + 3.6G_f)/f_t$	$0.25V_f f_t$	$4W_{2(SL-00)} = 14.4G_f/f_t$
SL-PE-05	2.68						
SL-PE-10	3.57						
SL-ST-04	3.06	$(0.10V_f + 1/2)f_t$	$0.30G_f/f_t$	$0.40V_f f_t$	$(-0.20V_f + 3.6G_f)/f_t$	$0.56V_f f_t$	$3W_{2(SL-00)} = 10.8G_f/f_t$
SL-ST-08	3.26						
SL-ST-12	4.04						



(a) 普通コンクリート



(b) 軽量 2 種コンクリート

図 - 7 引張軟化曲線のモデル化(ST)

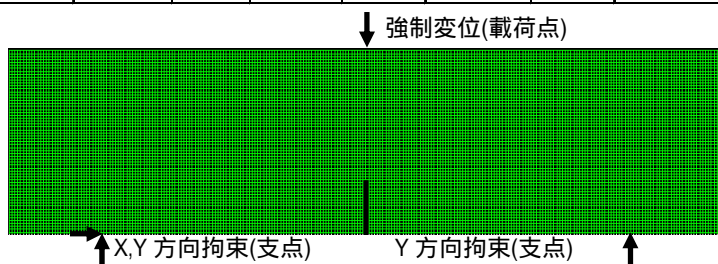


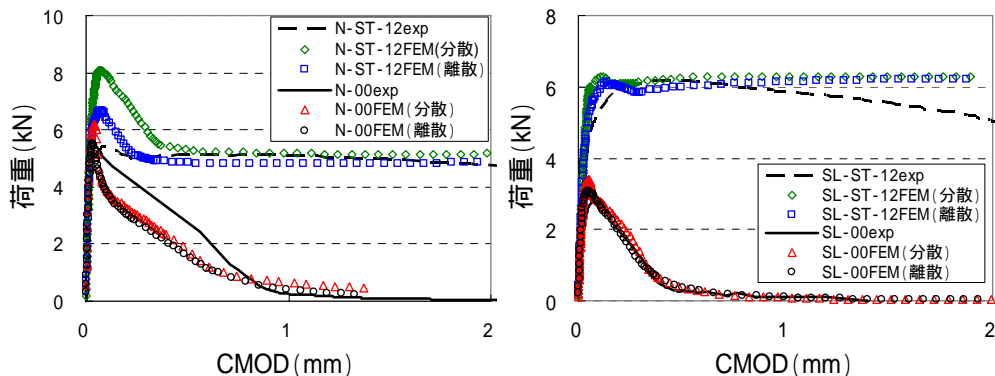
図 - 8 解析モデル

2.4.3 FEM 解析

2.4.2 で提案したモデル式の適用性を検討するために切欠きを用いたはりの 2 次元非線形解析を行った。解析モデルを図 - 8 に示す。コンクリートは 4 節点平面応力要素を用い、離散ひび割れモデルおよび分散ひび割れモデルを用いた。圧縮域は圧縮強度試験結果を用いた。離散ひび割れモデルは切欠き上部のひび割れ発生箇所に、分散ひび割れモデルの引張軟化域に表 - 5 のモデル式を用いた。

図 - 9 に荷重 - CMOD 関係の試験結果と解析結果の比較を示す。同図には一例として N-00, SL-00 および N-ST-12, SL-ST-12 の結果を示す。N-00 はポストピーク挙動に試験結果との差異が見られるが概ね再現できた。SL-00 は試験結果を再現できた。N-ST-12 は解析値の最大荷重が試験結果と比較して 2~3 割程度大きくなったものの、架橋効果は試験結果を再現できた。SL-ST-12 は最大荷重点における CMOD に差異が見られるが、架橋効果を再現できた。他の短繊維についても同様に解析を行ったが、試験結果を再現できた。

図 - 9 に荷重 - CMOD 関係の試験結果と解析結果の比較を示す。同図には一例として N-00, SL-00 および N-ST-12, SL-ST-12 の結果を示す。N-00 はポストピーク挙動に試験結果との差異が見られるが概ね再現できた。SL-00 は試験結果を再現できた。N-ST-12 は解析値の最大荷重が試験結果と比較して 2~3 割程度大きくなったものの、架橋効果は試験結果を再現できた。SL-ST-12 は最大荷重点における CMOD に差異が見られるが、架橋効果を再現できた。他の短繊維についても同様に解析を行ったが、試験結果を再現できた。



(a) 普通コンクリート

(b) 軽量 2 種コンクリート

図 - 9 引張軟化曲線モデル式

3. 結論

本研究で得られた結果は以下の通りである。

- (1) 各種強度評価式より、各短繊維の補強効果は混入率に比例し、SL が N よりも増大する傾向を示した。
- (2) 荷重 - CMOD 関係より、ひび割れ発生後の短繊維補強による架橋効果が顕著に現れた。
- (3) 引張軟化曲線を混入率を考慮して定式化した。
- (4) 切欠きを用いたはりの 2 次元非線形解析を行い、モデル式の適用性を検討した結果、短繊維の架橋効果を再現できた。

今後は、この結果を RC 版に適用することで短繊維補強軽量 2 種コンクリートの押抜きせん断耐力の評価方法を検討する予定である。