

軽量コンクリートスラブの押抜きせん断特性に及ぼす PVA 短繊維の影響

Influence of PVA short fibers on punching shear behavior of lightweight concrete slab

伊藤 始*, 岩波光保**, 横田 弘**

Hajime Ito, Mitsuyasu Iwanami, Hiroshi Yokota

* 工修 独立行政法人港湾空港技術研究所 構造強度研究室 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)
(前田建設工業株式会社 技術研究所)

** 工博 独立行政法人港湾空港技術研究所 構造強度研究室 (〒239-0826 神奈川県横須賀市長瀬 3-1-1)

This paper examines the punching shear behavior of lightweight concrete slab reinforced by PVA short fibers by experimental loading tests and nonlinear finite element analyses. Loading tests were carried out on RC slabs with different fiber contents, concrete types, reinforcement ratios, and loading conditions. As a result, it was confirmed that punching shear capacity is improved by mixing PVA short fibers in concrete and that the increase in punching shear capacity of lightweight concrete is larger than normal-weight concrete. The analytical punching shear capacities agreed well with the test capacities on normal-weight concrete and lightweight concrete. On fiber reinforced concrete, it is necessary to reexamine crack model, stress-strain model, etc for accurate analysis.

Key Words: PVA short fiber, lightweight concrete, RC slab, punching shear capacity

キーワード: PVA 短繊維, 軽量コンクリート, RC スラブ, 押抜きせん断耐力

1. はじめに

近年, 設計や施工の合理化を図ることを目的として, コンクリートに用いられる骨材を軽量なものに代えて, コンクリートの重量を軽減する試みがいくつかの構造物で行われている。橋梁においては, 上部工を軽量化することで, 地震時の慣性力の減少によるコスト縮減を可能にした大規模実施工が実現している¹⁾。

港湾構造物においても, 栈橋上部工を軽量化することによって, 地震時における橋梁と同様の効果が得られ, 鋼管杭の本数を減らすことや鋼管杭の杭径や肉厚などを小さくすることが可能となり, コスト縮減につながる可能性がある^{2), 3)}。

軽量コンクリートは, 独立空隙型の高性能人工軽量骨材の採用により, 従来のものに比べ力学性能および耐久性が向上することが確認されているが, 依然として普通コンクリートと比較した場合, 引張強度やせん断強度が小さい⁴⁾。クレーン等の大きい上載荷重が作用する栈橋上部工のスラブでは高い押抜きせん断耐力が必要であり, はりでは高いせん断耐力が必要である。はりに軽量コンクリートを用いた場合には, せん断耐力が低下することが既往の研究で確かめられていることより⁵⁾, スラブでも押抜きせん断耐力の低下が懸念される。栈橋上部工のスラブには一般にせん断補強鉄筋を配置しないため, 押抜きせん断耐力の増加には部材厚を厚くする方法があるが,

重量の増加があることやコンクリート量が多くなりコストアップになるため, 適用できない場合が考えられる。

そこで本研究では, はりのせん断特性の改善に有効性が確認されている PVA 短繊維⁶⁾を軽量コンクリート製 RC スラブに適用することを試みた。研究では, 軽量コンクリートを用いた場合の押抜きせん断耐力の低下と PVA 短繊維による耐力の改善効果を確認することを目的に, コンクリート種類と短繊維混入の有無をパラメータとした RC スラブ試験体の押抜きせん断実験を行った。あわせて, 3次元有限要素解析を行うことで, 実験結果の再現の可能性と短繊維補強コンクリートを解析するときの問題点を検討した。

2. RC スラブの載荷実験

短繊維混入による軽量コンクリート製 RC スラブの押抜きせん断特性の改善効果を検討するために, 表-1に示す載荷方法, 有効高さ, 鉄筋比, コンクリート種類, 短繊維混入の有無をパラメータとした RC スラブ試験体を作製し, 一方向荷重を作用させる載荷実験を行った。

2.1 使用材料

(1) 軽量骨材

軽量コンクリートに使用した軽量骨材は, 中国・黄河の堆積物を原材料として, これに発泡材と結合材を混合

表-1 実験ケースと実験パラメータ

シリーズ	試験体名	実験条件		引張側鉄筋				コンクリート種類	短繊維混入率 (体積比)	結果				
		載荷方法	有効高さ	径	降伏強度	ピッチ	鉄筋比			圧縮強度	ヤング率	押抜きせん断耐力 P_{Vsc}		
		*1	d *2		f_y	s	p *2			f_c	E_c	実験	計算	実験
			mm		N/mm ²	mm	(=As/bd)		%	N/mm ²	kN/mm ²	kN	kN	計算
A1	A1-N-0	A	120	D19	507	150	0.016	普通	0.0	30.9	25.6	335	281	1.19
	A1-N-1	"	"	"	"	"	"	"	1.0	30.8	26.2	364	280	1.30
	A1-L-0	"	"	"	503	"	"	軽量	0.0	50.0	21.4	336	357	0.94
	A1-L-1	"	"	"	"	"	"	"	1.0	41.1	19.9	383	324	1.18
A2	A2-N-0	"	"	D13	339	"	0.007	普通	0.0	33.8	28.6	272	224	1.21
	A2-N-1	"	"	"	"	"	"	"	1.0	34.2	28.5	297	225	1.32
	A2-L-0	"	"	"	"	"	"	軽量	0.0	50.0	21.4	312	272	1.15
	A2-L-1	"	"	"	"	"	"	"	1.0	41.1	19.9	315	247	1.28
B1	B1-L-0	B	120	D19	507	150	0.016	軽量	0.0	37.6	19.9	713	954	0.75
	B1-L-1	"	"	"	"	"	"	"	1.0	37.1	19.4	960	948	1.01
B3	B3-L-0	"	180	"	"	100	"	"	0.0	37.6	19.9	1131	1571	0.72
	B3-L-1	"	"	"	"	"	"	"	1.0	37.1	19.4	1545	1561	0.99

*1 載荷方法A:4辺支持-正方形載荷板(100×100mm)、B:2辺支持-長方形載荷板(100×1200mm)

*2 2方向の鉄筋に対する平均値

*3 コンクリート標準示方書の押抜きせん断耐力算定式

して造粒した後、高温で焼成した独立空隙型低吸水性の高性能人工軽量粗骨材である。その物性を表-2に示す。

(2) PVA 短繊維

短繊維には主に鋼繊維と合成繊維の2種類があり、本研究では合成繊維のうちPVA短繊維を用いた。PVA短繊維は、鋼繊維に比べ体積混入率を同一とした場合の補強効果は劣るものの、密度が小さいためコンクリートとの分離抵抗性が高く、コンクリート重量の増加を抑えることが可能である。また、作業性や耐食性にも優れている。腐食環境の厳しい栈橋上部工を対象としているため、耐食性は短繊維選択の主な要因となった。さらに、PVA短繊維は、合成繊維の中においても引張強度が強く、コンクリートとの付着性や耐アルカリ性に優れている。実験に用いたPVA短繊維は、直径0.66mm、長さ30mmのものである。その物性を表-3に示す。

(3) コンクリートの配合

コンクリートは、普通重量のコンクリートと軽量コンクリートを使用し、粗骨材種類により圧縮強度が異なることを考慮して、配合強度を基準として配合を定めた。使用したコンクリートは、セメント種類を普通ポルトランドセメント、配合条件を普通コンクリートではスランプ18cm、空気量4.5%、粗骨材最大寸法20mm、軽量コンクリートではスランプフロー450mm、空気量5.5%、粗骨材最大寸法15mmとした。コンクリートの単位容積質量は、普通コンクリートが2290kg/m³、軽量コンクリートが1770kg/m³である。示方配合を表-4に示す。短繊維は、コンクリート体積の1.0%（外割り）で混入した。

(4) 材料試験結果

試験体製作に使用したコンクリートの圧縮強度とヤング率を表-1に示す。これらは、試験体と同様の条件で養生した直径100mm、高さ200mmの円柱供試体により求めた。上述のように配合強度を同程度としたものの、試験

体A1-L-0およびA2-L-0の製作に使用したコンクリートでは圧縮強度が他のものに比べて大きくなった。この理由は、明らかではないが、本検討はこの強度差を考慮して実施した。引張側鉄筋の降伏強度を表-1に示す。A2シリーズには材質SD295の鉄筋を使用し、それ以外のシリーズではSD490の鉄筋を使用した。

表-2 軽量骨材の物性値

項目	単位	物性値
絶乾密度	kg/m ³	1180
24時間吸水率	%	2.69
寸法	mm	5~15
形状	—	碎石状

表-3 短繊維の物性値

項目	単位	物性値
直径	mm	0.66
標準長	mm	30
繊維度	dtex *	4440
アスペクト比	—	45.5
密度	kg/m ³	1300
引張強度	N/mm ²	880
ヤング率	kN/mm ²	29.4

*1dtex：糸長10000mの糸質量が1gであること

表-4 コンクリートの配合

コンクリート種類	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G
普通	53.2	47.8	181	340	833	940
軽量	45.0	47.3	165	367	823	413

* 混和剤：普通—AE減水剤 0.85kg/m³：軽量—高性能AE減水剤 5.14kg/m³

2.2 実験方法

(1) 実験ケースおよび試験体概要

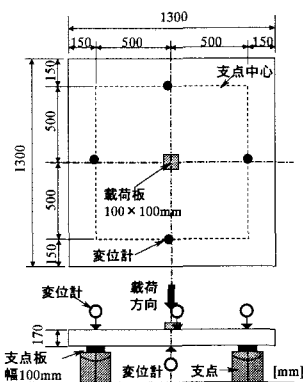
実験ケースおよび実験パラメータを表-1に示す。主要なパラメータの1つが載荷方法である。載荷方法は、図-1に示すAとBの2種類とした。載荷方法Aは、支点間距離を1000mmとした4辺単純支持（2方向スラブ）のもと、100mm×100mmの正方形載荷板に荷重を加えた。載荷方法Bは、支点間距離を1000mmとした2辺単純支持（1方向スラブ）のもと、支点と平行方向を長手方向として配置した100mm×1200mmの長方形載荷板に荷重を加えた。実際のスラブ構造では固定支持である場合が多いが、今回の実験では基礎的なデータを得るために、両載荷方法とも単純支持とし、支持点での試験体の浮上かりを拘束しなかった。また、支点間の距離は、著者らが行ったRCはりの実験結果⁶⁾を考慮して、有効高さに対する載荷点と支点の距離の比が3~4程度となるように設定した。

他の実験パラメータは、有効高さと鉄筋比（鉄筋径、材質）である。載荷方法Aの試験体寸法および配筋を図-2に示す。載荷方法Aでは鉄筋の降伏が短繊維の押抜きせん断特性改善効果に与える影響を検討するために、A1シリーズでは鉄筋が降伏点に達する前に押抜きせん断破壊するように材質SD490、径D19（鉄筋比0.016）の鉄筋を配置した。A2シリーズでは鉄筋が降伏点に達した後に押抜きせん断破壊するように材質SD295、径D13（鉄筋比0.007）の鉄筋を配置した。有効高さ120mmおよび引張側鉄筋ピッチ150mmは両シリーズで一定とした。

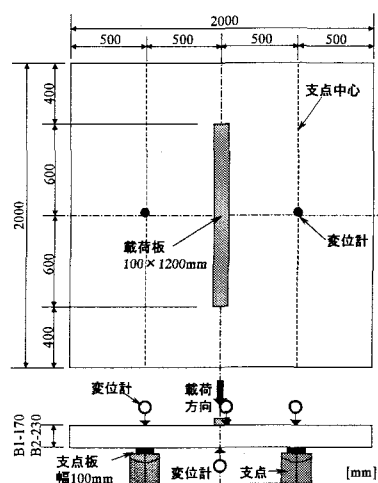
載荷方法Bでは短繊維混入による押抜きせん断特性の改善効果により栈橋上部工のスラブ厚を小さくすることを考え、スラブ厚が補強効果に与える影響を検討するため、有効高さをB1シリーズで120mm、B3シリーズで180mmとした。B1シリーズでは引張側鉄筋（D19）を2方向に150mmピッチで配置し、B3シリーズでは100mmピッチで配置することにより鉄筋比を0.016とした。なお、ここでの有効高さとは鉄筋比は、2方向の鉄筋に対する平均値である。

コンクリート種類と短繊維混入率の組合せは、A1およびA2シリーズでは短繊維無混入の普通コンクリート（□-N-0）、短繊維を1.0%混入した普通コンクリート（□-N-1）、無混入の軽量コンクリート（□-L-0）、1.0%混入した軽量コンクリート（□-L-1）の4種類であり、B1およびB3シリーズでは無混入の軽量コンクリートと短繊維を1.0%混入した軽量コンクリートの2種類である。なお、試験体名は、以下の通りに定めた。

A1-N-1	コンクリート種類 および混入率	N-0: 普通コンクリート, 0.0%
		N-1: 普通コンクリート, 1.0%
		L-0: 軽量コンクリート, 0.0%
		L-1: 軽量コンクリート, 1.0%
	鉄筋比 および有効高さ	1: 0.016, 120mm
		2: 0.007, 120mm
		3: 0.016, 180mm
	載荷方法	A: 4辺支持-正方形載荷板
		B: 2辺支持-長方形載荷板



a) 載荷方法 A



b) 載荷方法 B

図-1 載荷方法および計測位置

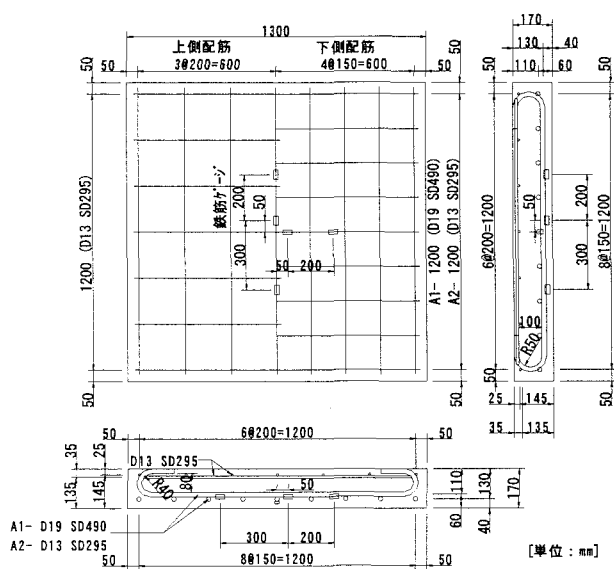


図-2 試験体寸法および配筋（A1, A2 シリーズ）

(2) 載荷方法および計測方法

載荷は、前述したように4辺単純支持の載荷方法Aと2辺単純支持の載荷方法Bで行った。載荷方法Bでは、2

方向に配置してある鉄筋のうち下側鉄筋が支点軸と直交するように試験体を設置して荷重した。荷重は荷重を単調増加させて、荷重がピーク荷重の 5 割程度に低下した時点で終了した。

計測は、荷重、荷重点変位、支点変位、鉄筋ひずみについて行った。図-1に示すように、支点変位は荷重方法 A では 4 箇所、荷重方法 B では 2 箇所計測した。鉄筋ひずみは、図-2に示す中心軸上の引張側鉄筋で計測した。

3. 実験結果

3.1 破壊形態

ここでは、各実験パラメータが破壊過程やひび割れ発生状況などに与える影響を荷重方法 A と荷重方法 B に分けて記述する。

(1) 荷重方法 A

荷重方法 A で実験を行った 8 体のうち、A1 シリーズの 4 体は鉄筋が降伏点に達する前に押抜きせん断破壊し、A2 シリーズの 4 体は降伏点に達した後に押抜きせん断破壊した。A1 シリーズの破壊過程は、初めに曲げひび割れが発生し、続いて 4 辺のうち 1 辺に斜めひび割れが発生しはじめる。その後、試験体の上面において荷重板に沿ってひび割れが発生し、荷重板は試験体の周辺よりも落ち込み、斜めひび割れが荷重板を取り囲むことでコーン状の破壊面が形成され、それと同時に破壊に至った。

押抜きせん断破壊した試験体の典型的なひび割れ発生状況として、A1-N-0 と A1-N-1 のひび割れ発生状況を図-3 a) と b) に示す。図は荷重終了時の下面のひび割れ発生状況である。図中のグリッドは 200mm×200mm であり、破線で囲まれた影付き部分は荷重板と支点の支圧板を表している。荷重板を囲む点線は、土木学会・コンクリート標準示方書・構造性能照査編⁷⁾ (以下、示方書と記す。) の算定式で 45° の破壊面で想定されるひび割れ位置を示す。

図中の太線は、ひび割れ幅が 1.0mm 程度以上である押抜きせん断破壊により卓越したひび割れであり、細線は、それ以外のひび割れである。影付き部分は、はく落が生じた部分である。太線のひび割れは、荷重板の端から 220~400mm の位置に発生し、荷重板からひび割れまでの距離がスラブ厚の 1.3~2.4 倍にあたり、破壊面の鉄筋軸方向に対する角度が示方書の想定 45° よりも大きいと推測される。脆弱部での破壊を考え、ひび割れ位置の最小値から算定される設計断面の周長 u_p は示方書の 1.2 倍に相当し、後述する押抜きせん断耐力の実験値と計算値の比に近い値となった。

両ケースを比較すると、短繊維を混入した A1-N-1 のひび割れが密であり、かぶりコンクリートのはく落が抑制されている。また、A1-N-1 では太線の外側や内側に複数のひび割れが見られるが、これは短繊維の架橋効果により、ひび割れが 1 本に局所化せず荷重の増加にともない新たなひび割れを発生させたためと考えられる。

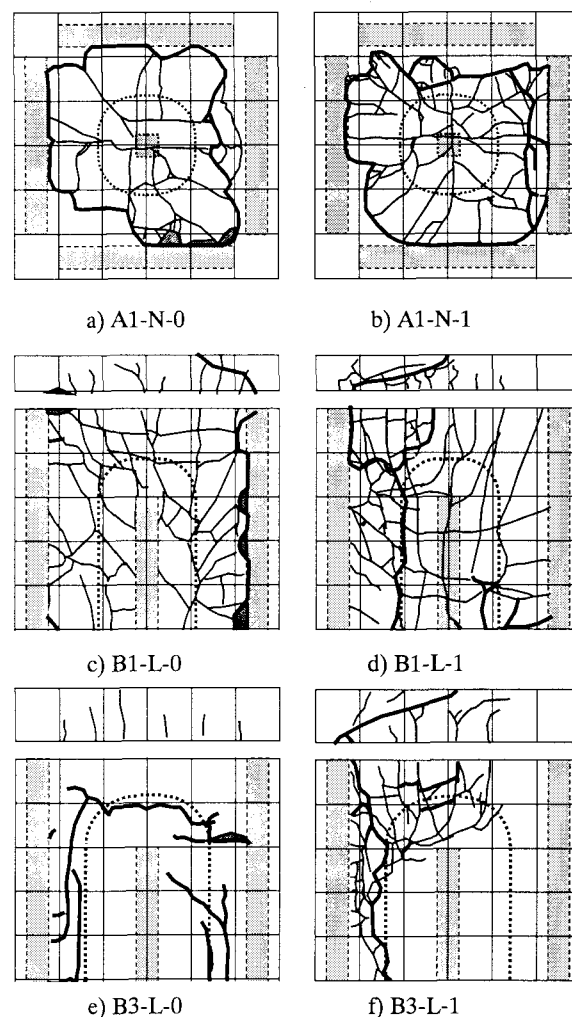


図-3 ひび割れ発生状況

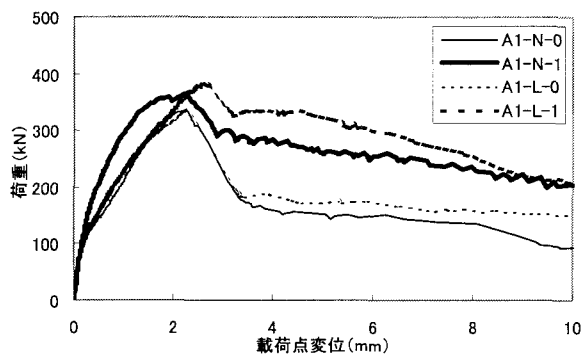
(2) 荷重方法 B

荷重方法 B で荷重した 4 体のひび割れ発生状況を図-3 c)~f) に示す。図は、支点に直交する中心軸から半分の図である。図-3 c), d) の B1-L-0 と B1-L-1 の破壊過程は、曲げひび割れが数本発生した後、太線のように RC はりで典型的に見られるような斜めひび割れが発生し、そのひび割れが荷重面に貫通することで荷重が急激に低下した。両ケースのひび割れ発生状況を比較すると B1-L-1 でひび割れが密になった。

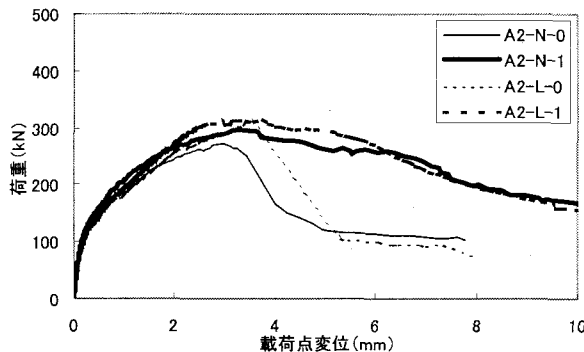
B3 シリーズでは、B1 シリーズに比べ試験体の部材厚が大きかったことにより、荷重初期の曲げひび割れの発生が見られず、図-3 e), f) のように斜めひび割れのみが卓越して発生した。B3-L-0 の荷重終了後の破壊形態は、荷重板が試験体に沈み込み、図-3 e) に示すように荷重板端部から 200~300mm 離れた想定破壊面に近い位置にひび割れが発生しており、押抜きせん断破壊となった。一方、B3-L-1 の破壊形態は、図-3 f) に示すように押抜きせん断破壊のような荷重板を囲む位置にひび割れが見られたも

の、最終的には RC はりにおける斜めひび割れに似たひび割れの発生で荷重が低下した。B3-L-1 では、短繊維がひび割れ面で応力を負担し、外側に新たなひび割れを発生させたことで、自由縁にひび割れが到達し、B3-L-0 と破壊形態が異なると考えられる。

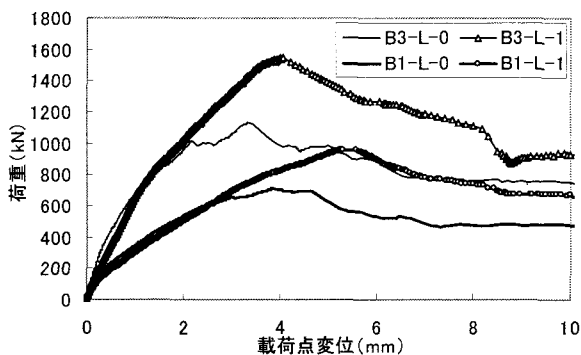
荷重方法 A では荷重ピーク後に載荷板を囲むコーン状のひび割れが形成されたが、荷重方法 B では B-3-0 を除き、コーン状のひび割れが形成されなかった。斜めひび割れは、両荷重方法とも支点付近の 1 辺から発生しはじめたが、荷重方法 A では自由縁が存在しないため、この斜めひび割れが載荷板を囲むように進展した。それに対して、B-3-0 を除く荷重方法 B では斜めひび割れが自由縁に貫通して荷重が低下しはじめたため、斜めひび割れが片側のみに形成される状況となった。



a) A1 シリーズ



b) A2 シリーズ



c) B1, B3 シリーズ

図-4 荷重-変位関係

3.2 荷重-変位関係

載荷実験において計測した荷重と載荷点変位の関係から、各ケースの剛性や押抜きせん断耐力などについて記述する。図-4に荷重-変位関係を示す。

(1) 荷重方法 A

図-4 a)および b)に A1 および A2 シリーズの荷重-変位関係を示す。A1 シリーズでは、短繊維を混入した A1-N-1 と A1-N-0 の初期剛性は同じで、ひび割れ後に A1-N-0 の剛性が低下したが、軽量コンクリートを使用した A1-L-0 と A1-L-1 の剛性はほとんど変わらなかった。短繊維を混入した A1-N-1 と A1-L-1 の最大荷重が無混入のケースに比べ大きくなり、最大荷重後の変位増加に対する荷重減少の傾きが緩やかであった。

A2 シリーズでは、最大荷重までの剛性は、いずれのケースも同様の傾向を示した。最大荷重は、短繊維を混入したケースで若干大きくなり、最大荷重後の変位増加に対する荷重減少の傾きが A1 シリーズと同様に緩やかであった。普通コンクリートと軽量コンクリートを比較すると、A1-N-1 と A1-L-1 でひび割れ後の剛性の差が見られたものの、それ以外に明確な差が見られなかった。

(2) 荷重方法 B

図-4 c)に B1 および B3 シリーズの荷重-変位関係を示す。初期剛性は、両シリーズともに短繊維混入と無混入のケースで同様であった。B1-L-0 では変位 3mm 程度、B3-L-0 では 2mm 程度で載荷板が試験体の周囲より落ち込みはじめ、斜めひび割れまたはコーン状の破壊面が形成されはじめたと推察され、その後の荷重増加がほとんど見られなかった。それに対して、短繊維を混入した B1-L-1 および B3-L-1 では、その後も荷重が上昇し続け、最大荷重 960kN および 1545kN まで達した。最大荷重後は、短繊維混入と無混入のケースの変位増加に対する荷重減少の傾きはほぼ同様であった。

3.3 耐荷性能の改善効果

荷重-変位関係において見られたように、短繊維を混入したケースの最大荷重が混入していないケースのものに比べ、大きくなった。ここでは、耐荷性能の改善効果の検討として各ケースの最大荷重を比較した。

実験では表-1に示したようにコンクリートの圧縮強度に無視できない差が生じたため、押抜きせん断耐力の実験値 $V_{pc,exp}$ を計算値 $V_{pc,cal}$ で無次元化した値（以下、押抜きせん断耐力比または耐力比と記す）で比較を行った。押抜きせん断耐力の計算値には、以下に示す示方書の算定式を用いた。

$$V_{pc} = 0.2 f_c^{1/2} (100p)^{1/3} (1000/d)^{1/4} (1 + 1/(1 + 0.25u/d)) u_p d \quad (1)$$

ここに、 f_c ：コンクリートの圧縮強度(N/mm²)， u ：載荷面の周長(mm)， u_p ：設計断面の周長(mm)（載荷面から $d/2$ 離れた位置で算定）， d ：有効高さ(mm)， p ：鉄筋比

(1) 載荷方法 A

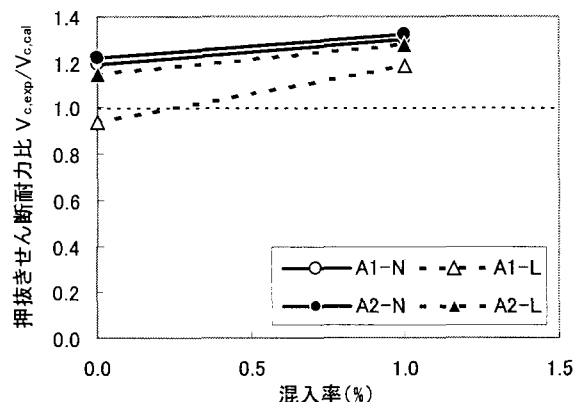
図-5 a)に A1 シリーズおよび A2 シリーズの押抜きせん断耐力比を示す（詳細：表-1）。A1 シリーズの普通コンクリートを用いたケースでは、混入率 0.0%の A1-N-0 の耐力比が 1.19 となり、実験値が計算値を上回った。これに対して、混入率 1.0%の A1-N-1 の耐力比は、1.30 となり、A1-N-0 の耐力比より 9%上回った。

一方、軽量コンクリートを用いた A1-L-0 の耐力比は 0.94 となり、A1-N-0 の耐力比の 79%になった。はりにおける軽量コンクリートのせん断強度は、示方書において普通コンクリートの 70%の値を用いて設計することとなっており、一般に普通コンクリートに比べて小さくなる。今回の実験においても軽量コンクリートの押抜きせん断耐力が小さくなったものの、示方書に示されるはりの場合に比べると低下割合は小さくなった。この要因として、4 辺単純支持であることから、はりの場合よりも試験体中央部の変形が進まず、斜めひび割れ幅が比較的小さくなり、粗骨材のかみ合わせにより抵抗するせん断耐力の低下が軽減されたためと推察される。

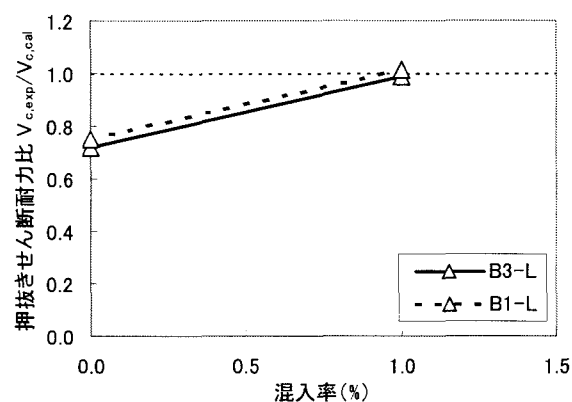
これに対して、短繊維を混入した A1-L-1 の耐力比は、1.18 となり、A1-L-0 に比べ 26%の増加となり、普通コンクリートの増加割合よりも大きくなった。加えて、A1-L-1 の耐力比は、普通コンクリートを用いた A1-N-0 の耐力比をと同程度となり、軽量コンクリートを用いた場合の耐力低下を回復させることが可能であった。

また、コンクリート種類の違う A1-N-1 と A1-L-1 の耐力比が近い値になった。この理由は、短繊維の効果がコンクリートのひび割れ発生後、モルタルに埋め込まれた部分の付着により、外力に抵抗することであることから、粗骨材種類の影響が現れなかったためと考えられた。このことから、短繊維を混入した軽量コンクリートの力学性能は、押抜きせん断耐力に限らず、普通コンクリートと同様に評価できる可能性を示した。

A2 シリーズでは、軽量コンクリートの耐力比が普通コンクリートと同程度となった。これは、鉄筋が降伏することで曲げひび割れが支配的になり、押抜きせん断破壊の直前まで斜めひび割れ幅が小さく、A1 シリーズと同様に粗骨材のかみ合わせによる影響を受けなかったためと考えられる。短繊維混入による耐力比の増加割合は、普通コンクリートで 9%、軽量コンクリートで 11%となった。この結果は、既往の実験結果⁸⁾と同程度の増加割合となり、短繊維混入による押抜きせん断耐力の改善効果が得られた。また、ここでも短繊維を混入した普通コンクリートと軽量コンクリートで耐力比が近い値になったことより、短繊維の効果がコンクリート種類にあまり影響されないことが示された。



a) A1, A2 シリーズ



b) B1, B3 シリーズ

図-5 押抜きせん断耐力比

(2) 載荷方法 B

図-5 b)に B1 および B3 シリーズの押抜きせん断耐力比を示す（詳細：表-1）。B3 シリーズの混入率 0.0%の耐力比が 0.72 であり、計算値に比べ実験値が小さくなった。この原因として、軽量コンクリートを用いたことも一つとして考えられるが、示方書には自由縁を有する 1 方向スラブでは、4 辺単純支持の 2 方向スラブを仮定した示方書の算定式に比べて押抜きせん断耐力が低下することが示されておりこの影響も考えられる。これに対して、混入率 1.0%では耐力比が 0.99 となり、短繊維混入により耐力比が 38%増加しており、短繊維の効果が表れている。

一方、有効高さを B3 シリーズの 3 分の 2 の 120mm にした B1 シリーズでは、混入率 0.0%の耐力比が 0.75 であるのに対して、混入率 1.0%では 1.01 になり、短繊維混入による荷重の増加割合は 36%であった。両シリーズとも耐力比の増加割合が同程度となり、軽量コンクリートを 1 方向スラブに用いた場合の耐力の低下を短繊維混入により回復可能であることを確認できた。また、有効高さ 120mm で短繊維を混入した B1-L-1 の最大荷重が 960kN

であり、180mmで無混入の B3-L-0 の最大荷重 1131kN に近い値になっていることから、短繊維を混入することでスラブ厚さを小さくできることを示した。栈橋上部工のスラブに短繊維補強した軽量コンクリートを適用した場合、軽量コンクリートの使用によるコンクリート密度の減少と PVA 短繊維の混入によるコンクリート量の減少の両方を軽量化の手段として考えることが可能となる。

3.4 鉄筋ひずみの抑制効果

図-6 に荷重増加に対する鉄筋ひずみの履歴を示す。鉄筋ひずみは、引張側下段鉄筋の載荷点直下で計測したひずみである。荷重は、コンクリートの圧縮強度に差が生じたため、実験における荷重を計算耐力で除して無次元化した値（荷重比）を用いた。

(1) 荷重方法 A

図-6 a) の A1 シリーズにおいて、荷重比が 0.2 付近で曲げひび割れが発生するまではすべてのケースで同様の傾向を示した。ひび割れ発生後、短繊維混入と無混入のケースにひずみの差が生じており、荷重比が大きくなるにつれて両者のひずみ差が大きくなった。荷重比 0.5 以上では、コンクリート種類に関わらず、混入のケースのひずみが無混入のケースのものに比べ $200 \sim 300 \times 10^{-6}$ 程度小さくなった。

図-6 b) の A2 シリーズにおいて、普通コンクリートでは荷重比 0.4 付近、軽量コンクリートでは荷重比 0.2 付近で曲げひび割れが発生し、いずれのケースも荷重比の増加に対するひずみ増加の傾きが大きくなった。普通コンクリートでは、短繊維混入と無混入のケースのひずみ差がほとんど見られなかったが、軽量コンクリートでは荷重比 0.6 付近からひずみの差が生じはじめ、その差は最大 500×10^{-6} 程度となった。これらの短繊維混入による鉄筋ひずみの低減は、曲げひび割れ面における引張力を鉄筋とともに短繊維が負担し、鉄筋にかかる引張力を減少させたためと考えられる。

(2) 荷重方法 B

図-6 c) の B1 および B3 シリーズでは、荷重比が 0.1 以下で曲げひび割れが発生している。B1 シリーズでは曲げひび割れ発生後の短繊維混入と無混入ケースのひずみ差は、荷重比 0.6 付近で 300×10^{-6} 程度であった。B3 シリーズではひずみの差がほとんど表れなかった。これは、図-3 e)~f) のひび割れ状況からも分かるように、計測位置で曲げひび割れが卓越しなかったためと考えられる。

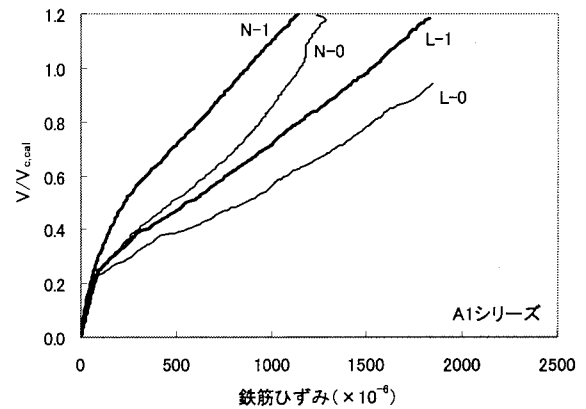
3.5 実験のまとめ

PVA 短繊維による RC スラブの補強効果を検討するために、荷重方法を 2 種類に変えた荷重実験を実施した。短繊維混入により、ひび割れ分散性および耐荷性能が改善され、短繊維混入が RC スラブの押抜きせん断特性の改善に有効であることが確認できた。

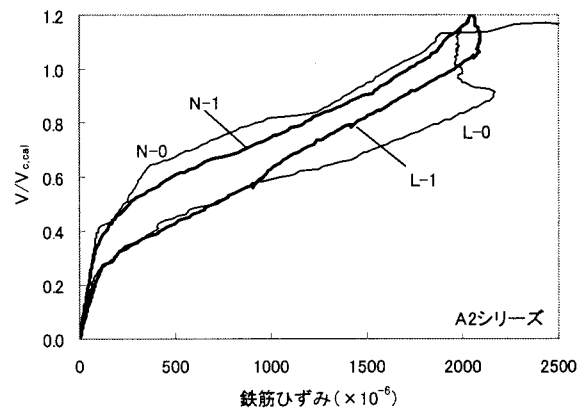
荷重方法 A では短繊維を混入したコンクリートの押抜

きせん断耐力は、コンクリート種類にあまり影響されなかった。軽量コンクリートの押抜きせん断耐力が普通コンクリートのものに比べ小さくなるため、短繊維混入による補強効果は、普通コンクリートに比べ軽量コンクリートの方が大きくなった。

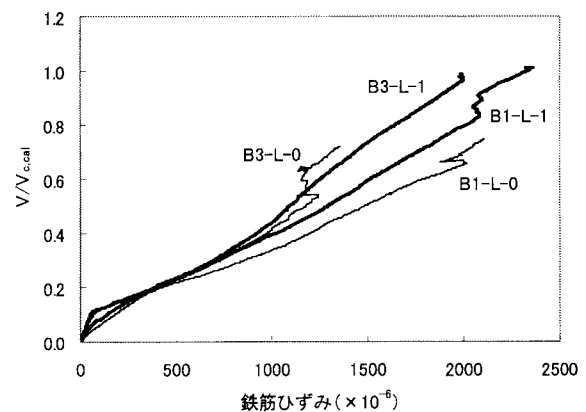
荷重方法 B では、軽量コンクリートを用いた 1 方向スラブの押抜きせん断耐力の低下を回復するために短繊維が有効であることが確認できた。



a) A1 シリーズ



b) A2 シリーズ



c) B1, B3 シリーズ

図-6 鉄筋ひずみ

4. 有限要素解析による短繊維補強効果の検証

4.1 検証の概要

(1) 検証方法

PVA 短繊維の混入が軽量コンクリート製 RC スラブの押抜きせん断特性の改善に有効であることが載荷実験により確認された。しかしながら、栈橋上部工などの実構造物の形状寸法は様々であるため、押抜きせん断特性の改善効果も異なってくる。そのため、解析により補強効果を確認する必要がある。

今回、対象とする RC スラブの押抜きせん断特性の再現には、3次元でのモデル化が必要である。現在、鉄筋コンクリートを対象とした解析技術に関して盛んに研究が行われており、はりや壁などの2次元解析に対しては十分な解析精度が得られている。3次元解析に対しては検討例が少ないものの、普通コンクリートを対象として、精度の良い結果が得られはじめている⁹⁾。

本研究では、3次元有限要素解析による実験結果の再現性を確認するとともに、軽量コンクリートおよびPVA短繊維を用いた場合の解析精度や問題点を検討した。解析の対象とした実験ケースは、A1シリーズの普通コンクリートを用いたA1-N-0、軽量コンクリートを用いたA1-L-0、短繊維補強・軽量コンクリートを用いたA1-L-1である。

(2) 解析方法

図-7に解析モデルおよび境界条件を示す。A1シリーズのRCスラブ試験体では載荷条件、支持条件、形状寸法に对称性が見られることから、解析モデルは対称条件を考慮して1/4モデルとした。試験体、載荷板および支圧板は、8節点アイソパラメトリック要素を用いてモデル化し、鉄筋は埋込み式離散鉄筋でモデル化した。なお、鉄筋とコンクリートの付着は完全付着とした。ひび割れモデルには、RCスラブの押抜きせん断解析の既往の研究⁹⁾で良い結果が得られている回転ひび割れモデルを用いた。

4.2 応力-ひずみモデル

(1) 圧縮側コンクリート¹⁰⁾

コンクリートの破壊基準は、圧縮-圧縮-圧縮領域において Menetrey-Willam 塑性規準¹¹⁾を用い、引張-引張-引張領域において Rankin 規準を用いた。それ以外の領域では、1軸引張強度 f_t と1軸圧縮強度 f_c を直線で結んだ規準とした。

圧縮側コンクリートのピーク前までの応力-ひずみ関係は、圧縮強度 f_c の3分の2までは線形として与え、そこからピークまでの間はパラボラ曲線形状のモデルを使用した。ピーク後の軟化域の関係は、直径100mm、高さ200mmの円柱供試体を用いた圧縮強度試験より求めた。図-8に圧縮強度試験より得られた応力とひずみを最大応力とその点のひずみで無次元化した関係を示す。圧縮軟化モデルは、実験結果より変曲点と最大応力の10%の点を取り、それらの点を直線で結び、応力ゼロ時の点ま

で延長したモデルである。

(2) 引張側コンクリート

引張側コンクリートのピーク前までの応力-ひずみ関係は、引張強度 f_t に到達するまで線形弾性とした。ここでの引張強度は、著者らの既往の研究¹²⁾でコンクリート種類や短繊維の有無に関わらず、示方書の算定式 $f_t=0.23f_c^{2/3}$ に従うことが確認されており、この式を用いて圧縮強度から算定した。

ピーク後の軟化域の構成則は、既往の論文¹³⁾で報告した RILEM 法に準拠して求めた引張軟化曲線よりモデル化した。引張軟化曲線は、切欠きを有した試験体の曲げ試験により荷重、支間中央変位、開口ひび割れ幅を求め、それらの値から修正J積分法¹⁴⁾にしたがって算定した。短繊維無混入の普通コンクリートおよび軽量コンクリートのモデルは、折曲がり点の応力を軟化開始応力の4分の1にする1/4モデルとした。

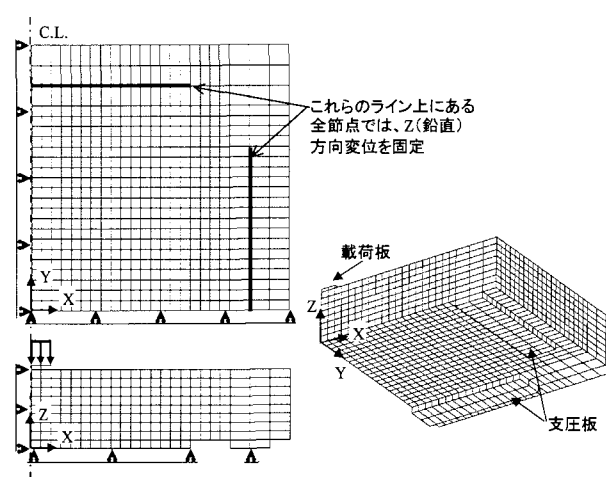


図-7 解析に用いた要素分割と境界条件

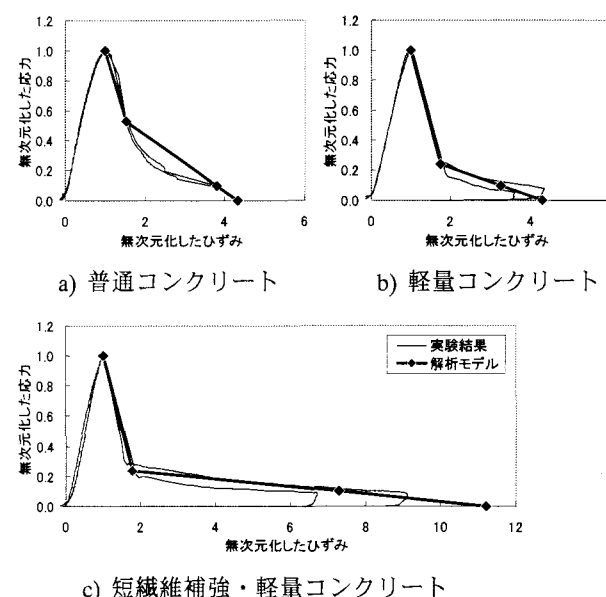


図-8 圧縮軟化モデル

短繊維を混入した軽量コンクリートのモデルには、通常のコンクリートのモデルに短繊維の効果を足しあわせることを考えた。1/4 モデルの限界ひび割れ幅に相当するひび割れ幅での応力の平均値を折曲がり点の応力として、応力－ひび割れ幅関係に囲まれた面積と得られた破壊エネルギーが一致するひび割れ幅まで応力を一定とした。短繊維混入率 1.0%の軽量コンクリートの算定結果および引張軟化モデルを図－9に示す。

(3) 鉄筋

鉄筋の応力－ひずみ関係には、降伏後にひずみ硬化し、ひずみ 0.1 の点が引張強度 (668N/mm^2) となり、その後応力が一定値を取るトリリニア型のモデルを用いた。降伏強度は、強度試験により得られた値を用い、ヤング係数は、 200kN/mm^2 とした。

4.3 解析結果

(1) 荷重－変位関係

解析から得られた荷重－変位関係を図－10に示す。図－10 a)の普通コンクリートの解析結果と実験結果を比較すると、解析におけるひび割れ発生後の剛性が実験に比べて若干低く、最大荷重時の変位に 1.0mm 程度の差が生じた。解析の最大荷重は、実験の 335kN に対して 312kN と若干小さくなった。剛性が低くなった原因は、鉄筋とコンクリートの付着を完全付着としたため、ひび割れ分散性が良くなり、実験に比べて多くのひび割れが生じたためと考えられる。

図－10 b)の軽量コンクリートでは、解析における剛性が実験とほぼ一致したものの、実験では変位が 2mm を越えたあたりで荷重が急激に低下するのに対して、解析ではその傾向が見られず、荷重が徐々に増加して変位が 5mm 付近で最大荷重となった。解析の最大荷重は、実験の 336kN に対して、徐々に荷重が上昇したため 354kN と若干大きくなった。

一方、図－10 c)の短繊維を混入した軽量コンクリートでは、実験のピーク点までの剛性が実験と解析で一致したものの、最大荷重は実験 383kN に対して解析 552kN と 5 割近く大きくなった。

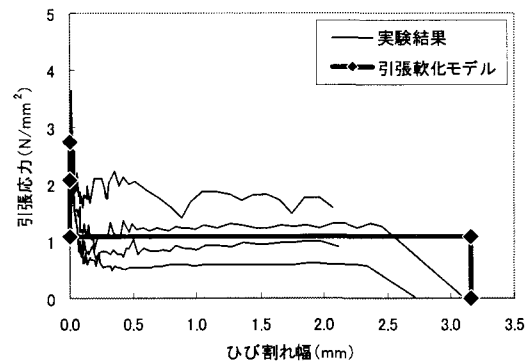
(2) 鉄筋ひずみ

図－11に解析より得られた鉄筋ひずみの履歴を示す。縦軸には、前述した荷重比を用いた。実験結果と解析結果に差が生じている原因は、解析の鉄筋とコンクリートを完全付着としたため、ひび割れ分散性が良くなり、鉄筋ひずみがスラブ全体にわたり平均化したためと推察される。解析のひずみを比較すると、同じ荷重比で短繊維の有無により 200×10^{-6} 程度のひずみの差が生じており、実験で得られた短繊維の効果を解析でも確認することができた。

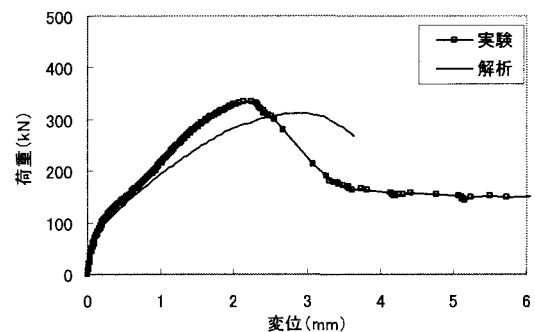
(3) 解析結果に関する考察

3次元有限要素解析により、すべてのケースの剛性、短繊維無混入のケースの最大荷重、普通コンクリートのケ

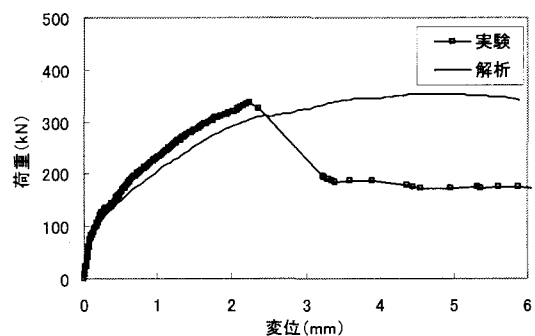
ースにおける最大荷重時の変位をある程度、再現することが可能であった。実験と解析に大きな差異が生じた項目について原因を以下に考察する。



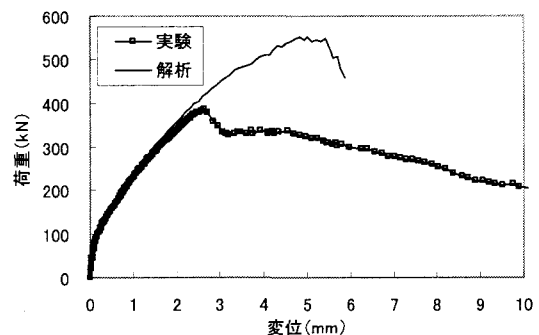
図－9 引張軟化モデル



a) A1-N-0 (普通コンクリート, 混入率 0.0%)



b) A1-L-0 (軽量コンクリート, 混入率 0.0%)



c) A1-L-1 (軽量コンクリート, 混入率 1.0%)

図－10 解析による荷重－変位関係

普通コンクリートの解析ではピーク後の急激な荷重の低下を再現することができたが、軽量コンクリートの解析では再現できなかった。解析における普通コンクリートと軽量コンクリートの違いは、軽量コンクリートの圧縮強度が大きいこととヤング係数が小さいことである。圧縮強度が大きいことから引張強度と折曲がり点応力が大きくなる。また、圧縮強度が大きいこととヤング係数が小さいことから圧縮側の限界ひずみが大きくなり、普通では 10000×10^{-6} であるのに対して軽量では 13300×10^{-6} である。

解析において、両ケースの破壊モードは、引張側鉄筋が降伏ひずみに達していないため、せん断破壊型であると判断できる。それらのピーク点からの荷重低下は、載荷板周りの要素において圧縮ひずみが限界値に達することで始まっている。このことから、ピーク点変位の差は、軽量の引張側の応力が大きいことで、斜めひび割れに起因した載荷板周りの圧縮ひずみの増加が抑制されたこと、圧縮側の限界ひずみが大きいことで載荷板周りの応力が保持されたことにより生じたと推察される。

短繊維を混入したケースでは、実験のピーク点までの剛性が良く一致したが、実験と解析の最大荷重に大きな差異が見られた。破壊挙動について、実験では数本のひび割れが卓越した。それに対して、解析結果を見ると、ひび割れた要素がせん断スパン内で幅広く生じ、ひび割れ幅が大きくならなかった。そのため、解析におけるひび割れ幅と図-9に示す引張軟化モデルを対応させると破壊面で引張応力が保持されたと判断でき、斜めひび割れの圧縮縁への進展および貫通を妨げ、荷重を上昇させたと考えられる。

ピーク後の荷重の低下は、図-12のひび割れ発生状況に示すように斜めひび割れが載荷板付近に到達することで、圧縮側のコンクリートひずみが急激に増加し、載荷板近くのコンクリートの圧壊により起こったと考えられる。なお、図-12は、最大荷重点付近におけるひび割れ発生状況であり、ひび割れ幅 0.1mm 未満のひび割れを除いたものである。

短繊維補強した軽量コンクリートの解析を精度良く行うためには、多軸応力状態の再現やひび割れモデルの選定などの再検討が必要と考えられる。多軸応力状態の再現では、応力-ひずみモデルを一軸応力状態の強度試験から設定しているが、短繊維混入のケースでは変形（ひずみ）が大きな領域まで応力状態を表現する必要があるため、同じ構成則では十分ではなかった可能性がある。

また、今回の解析では分布ひび割れモデルを使用した分散ひび割れモデルに比べてひび割れの局所化を捉えにくい特徴がある。また、分布ひび割れモデルのうち回転ひび割れモデルを選定したが引張軟化モデルが直接影響する特徴を有しており、適切なひび割れモデルを選定する必要がある¹⁵⁾。

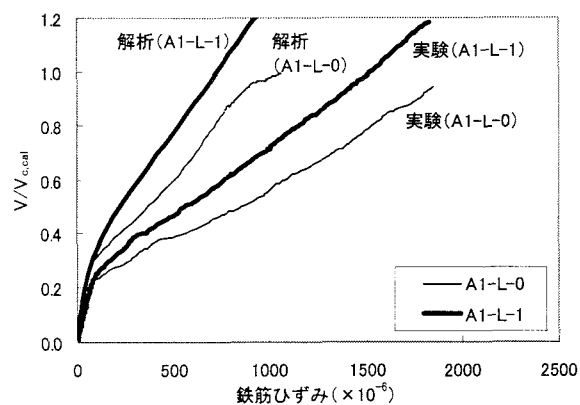


図-11 解析による鉄筋ひずみ

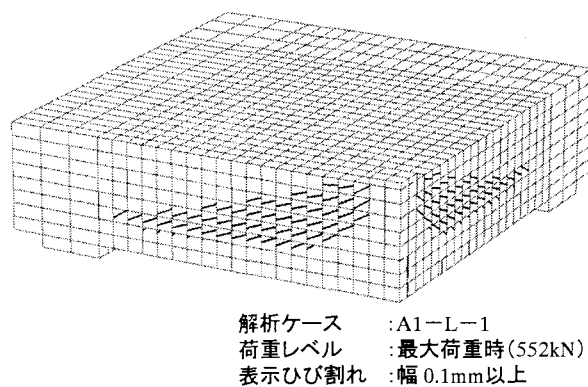


図-12 解析におけるひび割れ発生状況

5. まとめ

本研究では、PVA 短繊維により補強した RC スラブの載荷実験および 3 次元有限要素解析を用いた実験の再現を行い、以下に示す知見が得られた。実験に関する知見は、限られた混入率やコンクリート強度、主鉄筋比などをもとに検討したもので、各実験ケースで 1 体の実験結果であり定性的な結果にとどまったが、信頼性のある結果が得られたと考えている。

- (1) 軽量コンクリートを用いた RC スラブの押抜きせん断耐力は、普通コンクリートを用いたものよりも小さくなった。その減少割合は RC はりのせん断耐力の場合よりも小さかった。
- (2) RC スラブの押抜きせん断挙動について、PVA 短繊維の混入により、ひび割れ分散性および耐荷性能が改善された。
- (3) 短繊維を混入したコンクリートの押抜きせん断耐力は、コンクリート種類にあまり影響されなかった。軽量コンクリートの押抜きせん断耐力が普通コンクリートのものに比べ小さくなるため、短繊維混入による補強効果は、普通コンクリートに比べ軽量コンクリートの方が大きくなった。

- (4) 3次元有限要素解析を用いて、実験における普通コンクリートと軽量コンクリートの最大荷重を再現することができた。そのため、栈橋上部工などの実構造物の押抜きせん断耐力を評価することができる可能性を示した。
- (5) 短繊維補強した軽量コンクリートの解析において、実験の最大荷重までの剛性は再現できたものの、最大荷重に大きな差が生じた。短繊維補強コンクリートを対象とした解析を精度良く行うためには、ひび割れモデルや材料構成則を含めて検討する必要がある。

謝辞

本研究を実施するにあたりご協力を頂きました港湾空港技術研究所の加藤絵万研究官、高橋良輔研究官、山内浩研修員、長岡技術科学大学の佐伯奈都美氏（元実務訓練生）、（株）計算力学研究センターの三輪健治氏に厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 佐々木敏也，谷口俊一，依田佐知子，柳井修司：東北新幹線沼宮内橋への軽量コンクリートの適用，コンクリート工学，Vol.40，No.2，pp.47-55，2002.2.
- 2) 横田弘，山田昌郎，・田秀則，横沢和夫，舟橋政司，原夏生，三輪俊彦，岡本享久，榎木隆，二羽淳一郎：高性能軽量コンクリートの港湾構造物への適用に関する基礎的研究，港湾技研資料，No.967，2000.9.
- 3) 横田弘，山田昌郎，山路徹，横沢和夫，三輪俊彦：高性能軽量コンクリートによる港湾構造物建造に関する考察，軽量コンクリートの性能の多様化と利用の拡大に関するシンポジウム論文集，日本コンクリート工学協会，pp.153-158，2000.8.
- 4) 例えば，舟橋政司，原夏生，横田弘，二羽淳一郎：繰返し荷重を受ける高性能軽量コンクリートはりの曲げ耐力，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.2，pp.1477-1482，2002.6.
- 5) 佐伯奈都美，岩波光保，伊藤始，横田弘：高性能人工軽量骨材コンクリートを用いたRCはりのせん断耐力，土木学会第59回年次学術講演会講演概要集，No.V-480，pp.957-958，2004.9.
- 6) 伊藤始，岩波光保，横田弘：PVA短繊維で補強したRCはりのせん断耐力評価に関する実験的研究，土木学会論文集，No.774，V-65，pp.123-138，2004.11.
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書・構造性能照査編，pp.65-75，2002.
- 8) 三上浩，岸徳光，田口史雄，栗橋祐介：ビニロン短繊維を混入した四辺支持RC版の押し抜きせん断性状に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.1555-1560，2004.6.
- 9) 八若幹彦，檜貝勇，中村光，斉藤成彦：3D-FEMによるRCスラブの押し抜きせん断破壊性状の解析，構造工学論文集，土木学会，No.47A，pp.1339-1346，2001.
- 10) 計算力学研究センター・ATENA理論マニュアル，2004.2.
- 11) Menetrey P., Willam K. J. : Tri-axial failure criterion for concrete and its generalization, ACI Structural Journal, Vol.92, No.3, pp.311-318, 1995.
- 12) 横田弘，伊藤始，岩波光保，加藤絵万：短繊維混入によるコンクリート構造物の力学性能改善効果の定量評価，港湾空港技術研究所資料，No.1071，2004.3.
- 13) 伊藤始，岩波光保，横田弘：ビニロン短繊維により補強した軽量コンクリートL型部材の力学性能，構造工学論文集，土木学会，No.50A，pp.979-990，2004.3.
- 14) 内田裕市，六郷恵哲，小柳治：曲げ試験に基づく引張軟化曲線の推定と計測，土木学会論文集，No.426，V-5，pp.203-212，1991.2.
- 15) 土木学会：コンクリート構造物の非線形解析技術研究小委員会成果報告書，コンクリート技術シリーズ 50，pp.88-104，2003.1.

(2004年9月17日受付)