

論文 超軽量人工骨材コンクリートはりのせん断挙動

三井 雅一^{*1}・福澤 公夫^{*2}・曹 世鉉^{*3}・山本 達^{*4}

要旨：圧縮強度が 35N/mm^2 程度，単位容積質量が 1300kg/m^3 程度の超軽量人工骨材コンクリートと同程度の圧縮強度を有する普通骨材コンクリートを用いたせん断補強鉄筋を有する RC はりのせん断挙動について実験的に検討を行った。さらに，非線形有限要素法解析によりせん断挙動のシミュレーションを試みた。その結果，せん断耐力算定時のコンクリート分担分の算出には単位容積質量により決定される低減率が有効であること，主鉄筋およびせん断補強鉄筋を埋込み鉄筋要素とした非線形解析によりせん断補強鉄筋量の増加に伴う RC はりの詳細なせん断挙動のシミュレーションが可能であることを示した。

キーワード：超軽量人工骨材，せん断補強鉄筋，引張軟化曲線，非線形 FEM 解析

1. はじめに

近年，土木構造物の大型化や建築物の高層化に伴い，コンクリートの自重軽減が求められており軽量コンクリートの研究が活発に行われている。また，廃ガラスや真珠岩などを原料とする造粒型人工軽量骨材の開発が注目されている。これらは，これまでの人工軽量骨材に比べ表面が緻密であるとともに独立気泡を有しているため強度が高く低吸水性であり，超軽量人工骨材と称される。超軽量人工骨材を用いたコンクリート（以下，超軽量コンクリートという）は，普通骨材を用いたコンクリート（以下，普通コンクリートという）と比較して，脆度係数（圧縮強度/引張強度）が高く，破壊エネルギーが小さく，極めて脆性的であることが知られている。このような力学的特性は，超軽量人工骨材コンクリートを構造部材として適用した場合，とくにせん断耐力について大きな影響を示すことが考えられる。そこで，本研究では圧縮強度 35N/mm^2 ，単位容積質量が 1300kg/m^3 程度の超軽量コンクリートと同程度の圧縮強度を有する普通コンクリートを用いたせん断補強鉄筋を有

する RC はりを作製し，そのせん断挙動について実験的に比較を行う。さらに，各材料の非線形材料特性を実験に基づく値を用いるとともに，主鉄筋およびせん断補強鉄筋を埋込み鉄筋要素としてモデル化する有限要素法（FEM）解析を行い，RC はりの力学的挙動のシミュレーションを試みた。

2. 実験概要

2.1 試験体の形状

図-1に試験体の形状，寸法および配筋を示す。有効高さ d は 250mm ，せん断スパン比 a/d は 2.4 である。せん断補強鉄筋のひずみを測定するため，ゲージレングス 5mm のワイヤストレインゲージを図-1に示すような位置に貼付した。表-1に供試体の一覧を示す。表に示すように，試験の因子として，コンクリートの種類およびせん断補強鉄筋比 p_w を取り上げた。図-1に示すように，せん断補強鉄筋は U 型スターラップとした。なお，主鉄筋には異形棒鋼 SD390（ $D22 : f_y = 432\text{N/mm}^2$ ， $D25 : f_y = 435\text{N/mm}^2$ ）を使用し，せん断補強鉄筋には鉄線 SWM-C（

*1 茨城大学 研究員 サテライト・ベンチャー・ビジネス・ラボラトリー，工博（正会員）

*2 茨城大学 教授 工学部都市システム工学科，工博（正会員）

*3 茨城大学大学院 博士前期課程 理工学研究科 都市システム工学専攻

*4 クリスタルクレイ（株）取締役

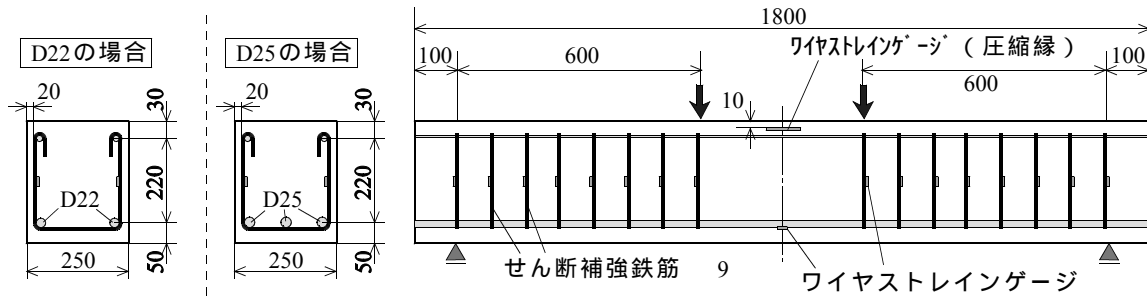


図-1 試験体の形状，寸法および配筋

表-1 試験体一覧 *せん断スパン $a=600\text{mm}$ における本数

No.	種類	コンクリート				主鉄筋		せん断補強筋	
		単位容積質量 [kg/m^3]	圧縮強度 f_c' [N/mm^2]	弾性係数 E_c [N/mm^2]	引張強度 f_t [N/mm^2]	径， 本数	鉄筋比 p_t [%]	径， 本数*	鉄筋比 p_w [%]
N-1	普通	2290	29.0	23900	2.58	D22, 2	1.24	9, 0	0.00
N-2		2290	29.0	23900	2.58	D22, 2	1.24	9, 3	0.17
N-3		2270	27.6	25412	2.07	D25, 3	2.43	9, 6	0.42
N-4		2270	27.6	25412	2.07	D25, 3	2.43	9, 8	0.59
L-1	軽量	1370	34.2	12568	1.77	D22, 2	1.24	9, 0	0.00
L-2		1370	34.2	12568	1.77	D22, 2	1.24	9, 3	0.17
L-3		1260	36.2	11670	1.48	D25, 3	2.43	9, 6	0.42
L-4		1260	36.2	11670	1.48	D25, 3	2.43	9, 8	0.59

表-2 使用材料

材料	名称	記号	仕様
セメント	普通ポルトランドセメント	C	密度： 3.16g/cm^3
細骨材	高性能人工軽量骨材	SG	密度： 0.72g/cm^3 ，24h 吸水率：8.2%，廃ガラス，造粒型
	砕砂	SC	密度： 2.65g/cm^3 ，24h 吸水率：1.6%， $FM: 2.79$
粗骨材	高性能人工軽量骨材	GA	密度： 1.20g/cm^3 ，24h 吸水率：3.0%，真珠岩，造粒型
	砕石	GC	密度： 2.60g/cm^3 ，吸水率：0.99%， $G_{max}=20\text{mm}$
混和剤	AE 剤	AE	アニオン系界面活性剤
	高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系，高強度用

$f_y=500\text{N/mm}^2$) を使用した。

2.2 使用材料および配合

表-2に試験体の作製に用いた材料を示す。粗骨材は，真珠岩を原石とする造粒型超軽量人工骨材である。また，細骨材は，廃ガラスを使用した造粒型超軽量人工骨材である。

表-3に各コンクリートの配合を示す。なお，超軽量コンクリートには，所定スランプの確保および材料分離の抑制のため，高性能 AE 減水剤を使用した。

表-3 コンクリートの配合

種類	W/C	s/a	設計空気量	スランプ				
	[%]	[%]	[%]	[cm]				
普通	55.0	43	5.0	18				
超軽量	35.0	49	5.0	18				
種類	単位量 [kg/m^3]							
	W	C	S		G		Ad.	
			SG	SC	GA	GC	AE*	SP
普通	191	346	-	759	-	953	17.3	-
超軽量	214	612	199	-	255	-	-	1.22

* 単位 [g/m^3]

3. 実験結果および考察

3.1 ひび割れ状況および破壊性状

図-2に試験体の終局時のひび割れ発生状況の

一例を示す。また，表-4に試験結果一覧を示す。各はりの破壊形式は表-4に示すように，N-4 試験体を除いて全ての試験体では斜め引張破壊と

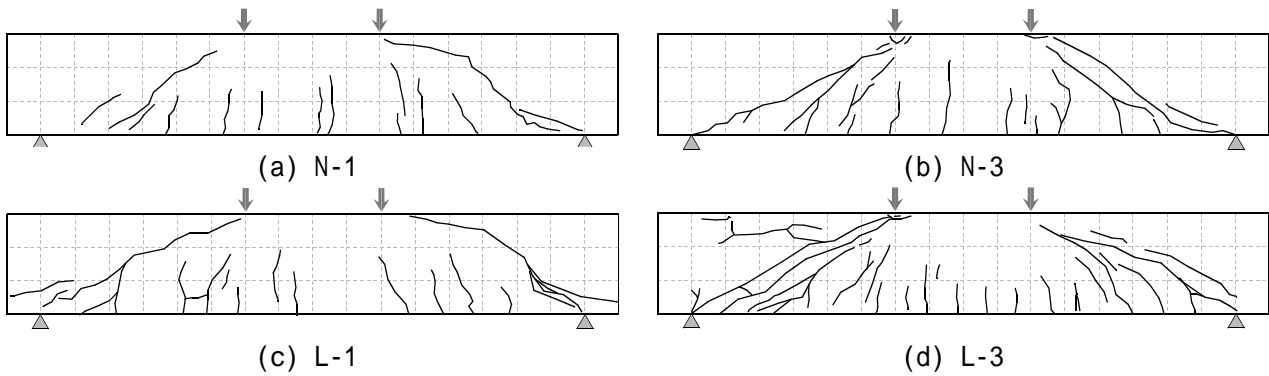


図-2 終局時のはりのひび割れ図

表-4 試験結果一覧

種類	No.	破壊形式	せん断耐力 [kN]				$\left 1 - \frac{V_{u,exp}}{V_{u,cal}}\right $	$\left 1 - \frac{V_{u,exp}}{V_{u,cal'}}\right $	$\left 1 - \frac{V_{u,exp}}{V_{u,FEM}}\right $
			実験値 $V_{u,exp}$	計算値 $V_{u,cal}$	計算値 $V_{u,cal'}$	解析値 $V_{u,FEM}$			
普通	N-1	斜め引張	217	156	170	216	0.39	0.28	0.00
	N-2	斜め引張	258	248	262	246	0.04	0.02	0.05
	N-3	斜め引張	458	425	442	420	0.08	0.04	0.09
	N-4	曲げ	422	437*		438	(0.03)		(0.04)
超軽量	L-1	斜め引張	88	111	91	93	0.21	0.03	0.05
	L-2	斜め引張	188	203	183	205	0.07	0.03	0.08
	L-3	斜め引張	314	376	352	312	0.16	0.08	0.01
	L-4	斜め引張	391	468	444	411	0.16	0.12	0.05
平均						0.16	0.09	0.05	

* 曲げ耐力 [kN]

なった。せん断補強鉄筋比 p_w を 0.59 % とした試験体では、超軽量コンクリートのはり (L-4) にてせん断破壊を想定して設計をした関係上、普通コンクリートのはり (N-4) では曲げ耐力がせん断耐力を下回る結果となり、N-4 は曲げ破壊となった。また、N-3 にて実験値が N-4 より大きくなっているが、主鉄筋は N-4 にて降伏しているのに対し、N-3 では降伏していないことから、せん断破壊と判断した。

3.2 せん断耐力の検討

表-4に実験における最大荷重時の作用せん断力 $V_{u,exp}$ とせん断耐力の計算値 $V_{u,cal}$ を示す。せん断耐力は、式(1)に示す修正トラス理論により算出した。せん断耐力のコンクリート分担分 V_c は二羽らによる算定式¹⁾(式(2))を用い、せん断補強鉄筋が受け持つせん断耐力 V_s は土木学会コンクリート標準示方書設計編(以下、示方書と呼ぶ)に基づいた(式(3))。

$$V_u = V_c + V_s \quad (= V_{u,cal}) \quad (1)$$

$$V_c = 0.20 f_c'^{1/3} d^{-1/4} p_t^{1/3} b_w d \quad (0.75 + 1.4 / (a/d)) \quad (2)$$

$$V_s = A_w f_{wy} d (\sin \alpha_s + \cos \alpha_s) / s_s \quad (3)$$

ここに、 V_u ：せん断耐力

V_c ：せん断耐力のコンクリート分担分

V_s ：せん断耐力のせん断補強鉄筋分担分

f_c' ：コンクリートの圧縮強度

d ：有効高さ (=0.25m)

p_t ：主鉄筋比

b_w ：ウェブ幅 (=0.25m)

A_w ：区間 s_s におけるせん断補強鉄筋の総断面積

f_{wy} ：せん断補強鉄筋の降伏強度

α_s ：せん断鉄筋が部材軸となす角度

s_s ：せん断補強鉄筋の配置間隔

表-4には実験値 $V_{u,exp}$ と計算値 $V_{u,cal}$ との差の計算値 $V_{u,cal}$ に対する比率を示す。その値は、

N-4 を除く全平均で 16 %と比較的大きい。これは、超軽量コンクリートの差が大きいため結果と思われる。せん断耐力の算定において、式(2)のコンクリート分担分 V_c においては示方書にて軽量コンクリートは一律、70 %低減することが規定されており、 $V_{u,cal}$ の計算においても使用した。このことは、超軽量人工骨材は、その種類や使用量によりコンクリートの物性も大きく変化するため一律の低減値を用いて評価することは難しいことを示している。そこで、前田ら³⁾は低減率 η を単位容積質量 ρ により評価する算定式(式(4)、 ρ の単位は kN/m^3)を提案している。

$$\eta = 0.053\rho - 0.12 \quad (4)$$

この低減率 η を用いてせん断耐力 $V_{u,cal}'$ を求めた結果を表-4に示す。表-4に示すように、超軽量コンクリートの場合、計算値 $V_{u,cal}'$ が実験値 $V_{u,exp}$ に近づく傾向が確認された。なお、普通コンクリートについても若干ながら同様の傾向を確認できる。

4. 有限要素法解析によるシミュレーション

4.1 解析の概要

コンクリートの材料特性は、図-3に示すようにモデル化を行った。圧縮域については、普通コンクリートでは、 $0.85 f_c'$ に至るまでを二次放物線とし終局ひずみを 0.35%とした。また、超軽量コンクリートは、高剛性の変位制御試験機により圧縮特性を測定したが最大応力に至るまでほぼ線形の挙動を示し軟化域はほとんど測定できなかったことに基づき、 $0.85 f_c'$ に至るまで直線的な関係とした。また、引張域については、両コンクリートともに引張強度までは弾性体とした。軟化域は、予め CT 試験を行い引張荷重 P と開口変位量 $CMOD$ を測定し、多直線近似法により得られた引張軟化曲線に基づき決定した。図-4に得られた引張軟化曲線を示す。図から分かるように、普通コンクリートに比べ、超軽量コンクリートは軟化開始時の引張応力が低

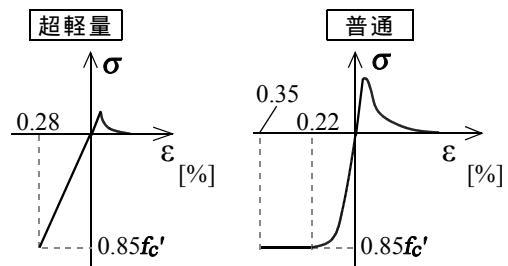


図-3 コンクリートの材料特性のモデル化

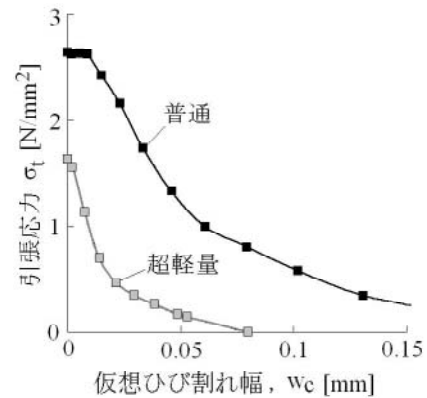
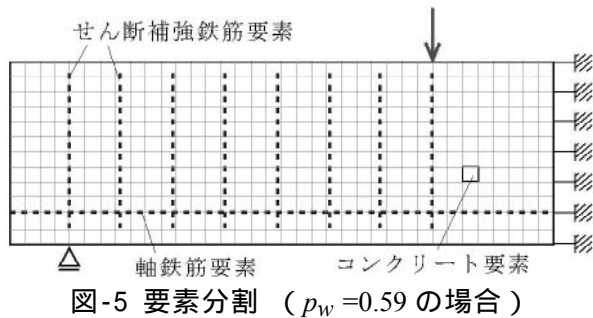


図-4 各コンクリートの引張軟化曲線

く、破壊進行領域がない。さらに引張軟化曲線にて囲まれる面積で表される破壊エネルギー G_f が極めて小さい特徴を有する。

また、コンクリートの材料特性としてひび割れ後のせん断剛性 G_c をコンクリートの種類に応じた一定の係数(以後、せん断剛性低減係数 β と称す。 $0 < \beta < 1$)を乗じて低減させた。ひび割れ後のせん断剛性 G_c は、ひび割れ面の凹凸による噛み合い作用の程度により変化する。超軽量コンクリートのように骨材を貫通して破面を形成する場合には、その破面には凹凸が少なくなりせん断剛性低減係数 β は低い値となる。本研究では、この低減係数 β の感度解析を行い、その結果より普通コンクリートでは 3.0×10^{-2} 、超軽量コンクリートでは 4.6×10^{-3} を得た。なお、コンクリート要素は、分散ひび割れモデルを定義し、 $25 \times 25 \text{mm}$ の平面応力 4 節点固体要素を使用した(図-5参照)。

鉄筋は、主鉄筋およびせん断補強鉄筋ともに埋込み鉄筋要素を用いた。この要素は、節点を共有するコンクリート要素へ鉄筋の剛性を付加



することの可能な要素であり，コンクリート要素の節点との連続性を確保する必要がなく自由な位置に配置することの可能な特長を有する。なお，この鉄筋要素とコンクリート要素とは完全付着とした。本解析には非線形 FEM 解析コード，DIANA Ver7.2 を使用した。

4.2 解析結果および考察

表-4に FEM 解析により得られたせん断耐力 $V_{u,FEM}$ を示す。修正トラス理論により求めた計算値 $V_{u,cal}$ と比較しても分かるように非線形材料特性を導入した FEM 解析にてせん断耐力を正確に得られることが分かる。

図-6に荷重の増加に伴うひび割れ状況の変化について，実験による観察結果と解析による結果とを比較する。図-6のひび割れ状況の比較から分かるように，初期のひび割れ発生位置，曲げスパンにおける曲げひび割れ性状，せん断スパンにおける曲げせん断ひび割れ性状そして支点と載荷点とを結ぶせん断ひび割れ性状を FEM 解析にて正確にシミュレートできることが分かる。

図-7に荷重とたわみ関係，コンクリートの圧縮縁，主鉄筋および各せん断補強鉄筋のひずみの関係について実験値と解析値との比較を示す。荷重の増加に伴うたわみ，コンクリートの圧縮縁および主鉄筋，せん断補強鉄筋のひずみの増加傾向を FEM 解析にて正確に再現することが可能である。

とくに，各せん断補強鉄筋のひずみ挙動は，そのせん断補強鉄筋の位置による変化および曲げせん断ひび割れの進展に伴うひずみの増加傾

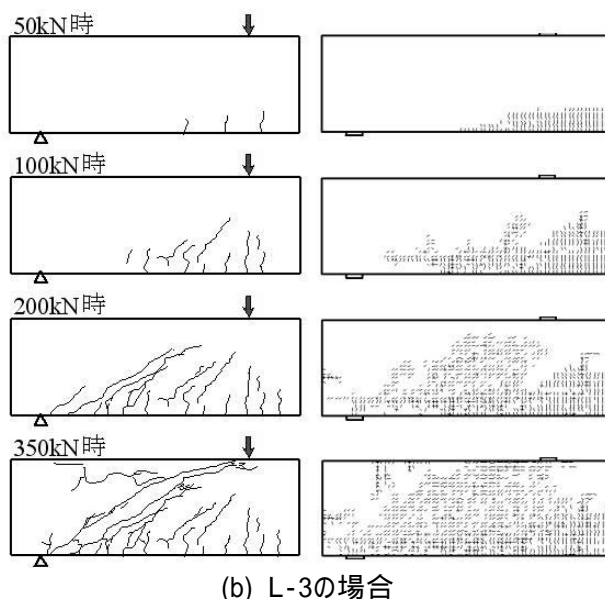
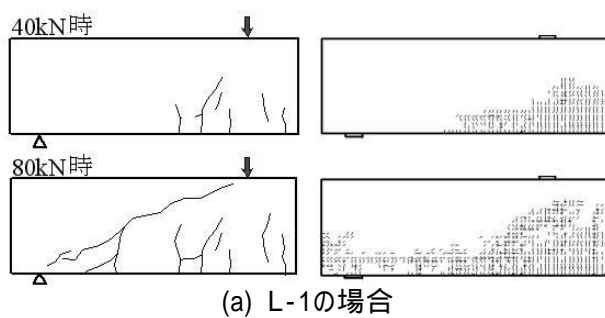


図-6 ひび割れ性状の比較 (左:実験, 右:解析)

向を正確にシミュレートできることが確認できる。なお，普通コンクリートを含め，他の試験体についても同様に FEM 解析にて実際の挙動を精度良くシミュレートできることを確認した。以上より，コンクリートおよび鉄筋の非線形材料特性を正確に導入し，さらに主鉄筋およびせん断補強鉄筋を埋込み鉄筋要素としてモデル化した本研究の非線形 FEM 解析は，普通コンクリートおよび超軽量コンクリートともにせん断補強鉄筋を有する RC はりの力学的挙動を再現する手法として高い有用性があるといえる。

5. 結論

本研究では，圧縮強度が 35N/mm^2 程度で，単位容積質量が 1300kg/m^3 程度の超軽量人工骨材コンクリートと同程度の圧縮強度を有する普

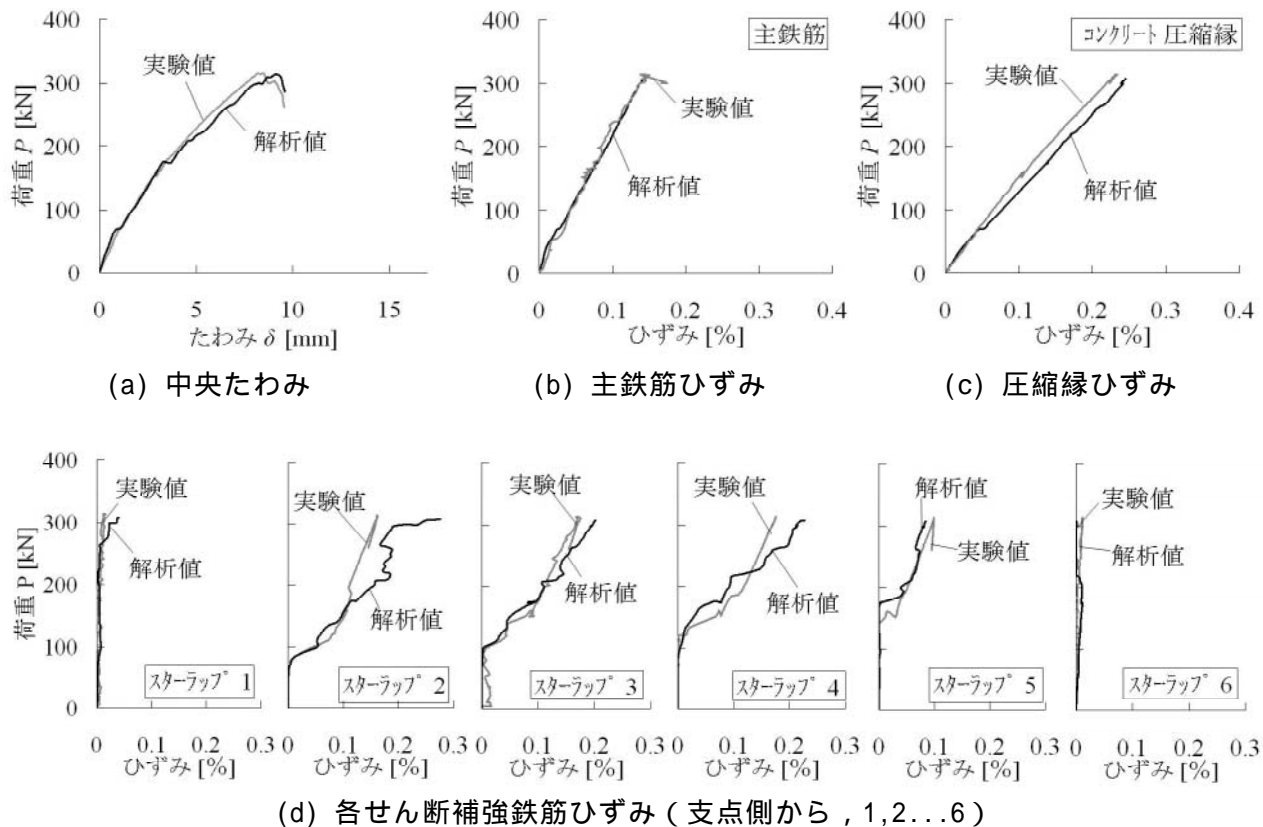


図-7 実験値と非線形FEMによる解析値との比較 (L-3 の場合)

通コンクリートを用いたせん断補強鉄筋を有する RC はりのせん断挙動を実験的に比較するとともに、非線形 FEM 解析によりそれらの挙動のシミュレーションを試みた。本研究により得られた知見を以下にまとめる。

- (1) せん断耐力のコンクリート分担分について
コンクリート標準示方書では、軽量コンクリートについて一律、70%の低減率を設けている。しかし、本研究にて用いた超軽量人工骨材コンクリートのように単位容積質量が小さく、その特性が著しく脆性的な挙動を示す場合に対しては過大評価してしまう。そこで、既往の研究より得られている単位容積質量と低減率との関係から低減率を求めると約 57%となった。
- (2) 実験に基づき得られた材料の非線形特性を導入するとともに主鉄筋およびせん断補強鉄筋を埋込み鉄筋要素としてモデル化した本研究の非線形 FEM 解析は、普通コンクリート

および超軽量人工骨材コンクリートともに、ひび割れの進展状況、鉄筋およびコンクリートのひずみ、はりの変形、終局せん断耐力などの挙動を正確に再現できる。

参考文献

- 1) 二羽淳一郎, 山田一宇, 横沢和夫: せん断補強鉄筋を用いない RC はりのせん断強度式の再評価, 土木学会論文集, 第 372 号, V-5, pp.167-176, 1986.
- 2) 下野一行, 柏原茂, 佐藤勉, 松岡茂: 高強度材料を用いた RC 梁部材のせん断耐力に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.21, No.3, pp.175-180, 1999.
- 3) 前田拓郎, 日比野憲太, 高木宣章, 児島孝之: 高品質軽量骨材を用いた RC はりのせん断特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.913-918, 2001.