

鉄筋コンクリート部材のせん断損傷評価指標の開発

Development of Shear Damage Index of Reinforced Concrete Members

牧 剛史*

Takeshi MAKI*

According to the results of past experiments for shear failure of reinforced concrete beams, this paper proposed the integrated damage index for shear in terms of the detailed strains at gauss points obtained from the finite element analysis. The proposed index and its limit values for diagonal cracking and ultimate states were verified for RC column subjected to reversed cyclic loading.

Keywords: RC Member, Shear Failure, Damage Index, Finite Element Analysis

1. はじめに

1995年の兵庫県南部地震で被災した鉄筋コンクリート（以下RC）製の高速道路橋脚や鉄道高架橋には、曲げ降伏後にせん断破壊したものが多く含まれていた。大都市域の主要構造物には既に耐震補強が施されたものの、依然として耐震補強されていない構造物は数多く残っている。地震後に改訂された現行設計基準¹⁾では、曲げ降伏後の靱性を確保する設計体系となり、曲げ耐力の2倍程度のせん断耐力が事実上確保されるものの、せん断に対しては依然として耐力による評価に留まっているのが現状である。靱性能の異なる曲げ破壊型RC部材のせん断損傷過程を定量的に評価することは、新設構造設計はもとより、既設構造物の耐震診断においても非常に有用である。

以上の背景をふまえ、本研究では既存のせん断耐力式に代わる損傷評価指標の提案を目的とした。複雑な

形状寸法を有する構造物や地中構造物などの耐震診断を非線形有限要素解析（以下FEM）によって行うことを念頭に置き、FEMで得られるガウス点ひずみに基づいたせん断損傷指標について検討を行った。

2. RC梁のせん断損傷指標の提案

2.1 せん断破壊を生じるRC梁試験体の選定

既往の研究²⁻⁸⁾における各種RC梁のせん断破壊実験の中から解析対象を選定した。せん断破壊は寸法効果を有するため、試験体の形状寸法（有効高さ）が広く分布するように、かつ側方鉄筋やせん断補強筋の効果を検討することが可能な試験体を選定した。また、せん断耐力の影響因子であるコンクリート強度やせん断スパン比の検討範囲が不十分であったため、これらのパラメータを変化させた仮想ケースを追加した。選定した試験体の諸元、既往のせん断耐力算定式³⁾を用いた計算結果および実験結果をTable 1に示す。

2.2 二次元FEM解析手法およびせん断損傷指標

本研究では、二次元非線形有限要素解析コードWCOMD^{9,10)}を用いた。本コードは分散ひび割れモデルに基づくRCの履歴依存型非線形材料構成則が導入され、各種RC構造物に対する適用性が既に検証され

*埼玉大学大学院 理工学研究科 環境科学・社会基盤部門

Department of Civil and Environmental Engineering, Graduate School of Science and Engineering, Saitama University, 255 Shimo-Okubo, Sakura-ku, Saitama, Saitama 338-8570, Japan

受付年月日 2007年4月16日

Table 1 Analytical Cases for RC Beams

解析 Case	参考文献番号	部材幅 b (mm)	有効高さ d (mm)	せん断スパン比 a/d	f _c (MPa)	引張鉄筋		側方鉄筋	せん断補強鉄筋		荷重方法	計算値			実験値		
						降伏強度 (MPa)	鉄筋比 (%)		降伏強度 (MPa)	鉄筋比 (%)		V _{c,cal} (kN)	V _{s,cal} (kN)	P _{s,cal} (kN)	V _{c,exp} (kN)	V _{s,exp} (kN)	P _{s,exp} (kN)
1	3	600	2000	3.0	28.0	999	0.28	-	-	-	1点	972	0	972	804	0	804
2	3	600	2000	3.0	27.1	999	0.14	-	-	-	1点	762	0	762	764	0	764
3	2	1000	2000	3.0	28.5	370	0.40	-	-	-	等分布	1838	0	1838	1778	0	1778
4	2	1500	3000	3.0	24.3	360	0.41	-	-	-	等分布	3567	0	3567	3597	0	3597
5	6	250	231	3.0	29.7	346	0.74	D10*4	-	-	1点	151	0	151	127	0	127
6	6	400	370	3.0	29.7	353	0.81	D16*4	-	-	1点	353	0	353	307	0	307
7	6	800	740	3.0	29.7	351	0.80	D32*4	-	-	1点	1187	0	1187	1037	0	1037
8	7	400	350	3.0	27.8	698	1.84	-	747	0.16	2点	329	288	616	145	130	275
9	5	200	260	3.8	22.7	358	3.71	-	-	-	1点	138	0	138	144	0	144
10	4	200	260	3.8	23.7	358	3.71	-	356	0.25	1点	140	78	218	144	102	246
11	8	200	250	3.0	36.9	720	3.04	-	372	0.42	2点	166	131	297	150	231	381

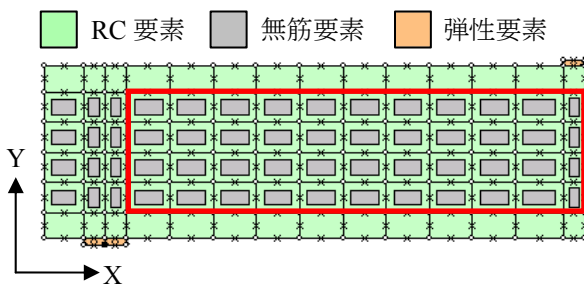


Fig. 1 Finite Element Mesh (Case 7)

ている。メッシュ分割の例として、Case 7のメッシュを Fig. 1 に示す。含有鉄筋量や厚さが異なる要素の重ね合わせによって、奥行き方向の鉄筋の粗密を擬似的に再現できる¹¹⁾。すなわち本コードは、RC部材の配筋状態を要素分割に忠実に反映させ、ある程度粗い要素分割によって適切な解析結果が得られるように構成されているものである。

せん断損傷指標として、要素のせん断変形を代表する偏差ひずみの第二不変量 J_2' を用いた。各要素のガウス積分点における J_2' は、式(1)によって求められる。

$$J_2' = \sqrt{\left\{ \varepsilon_x^2 + \varepsilon_y^2 + 2\left(\gamma_{xy}/2\right)^2 \right\} / 2} \quad (1)$$

ここに、 $\varepsilon_x, \varepsilon_y$: X 方向および Y 方向直ひずみ、 γ_{xy} : 工学せん断ひずみである。式(1)で得られた各ガウス点における J_2' をガウス積分して要素の平均値とし、各要素体積を考慮した上で、さらに RC 部材においてせん断損傷が卓越すると考えられる領域における平均値を算出した。ここで、せん断損傷が卓越する領域とは、例えば Fig. 1 中の太線で囲まれた範囲（引張・圧縮鉄筋を有しないせん断スパン内全要素）を指す。

以上の手順により、荷重ステップ毎の平均 J_2' （以下、単に J_2' と記す）を、せん断損傷指標として提案した。

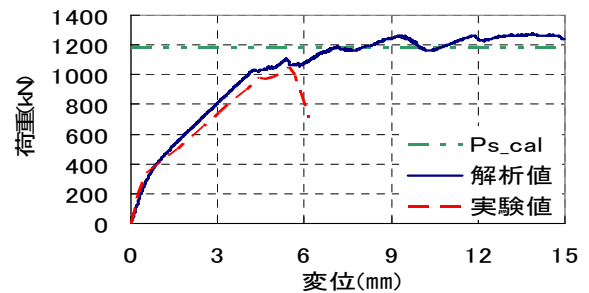


Fig. 2 Load-Displacement Relationship (Case 7)

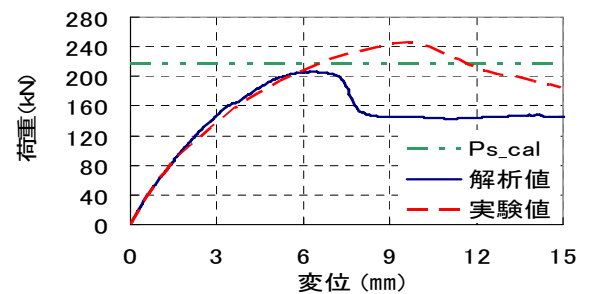
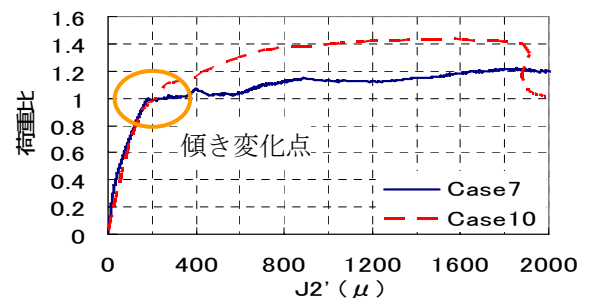


Fig. 3 Load-Displacement Relationship (Case 10)

Fig. 4 Load Ratio- J_2' Relationships (Case 7, 10)

2.3 鉄筋コンクリート梁の解析結果

解析結果の一例として Case 7, Case 10 の解析と実験の比較結果を Fig. 2, Fig. 3 に示す。せん断補強鉄筋を有しない Case 7 では、最大荷重の実験値 $P_{s,exp}$ まで、せん断補強鉄筋を有する Case 10 は、解析の最大荷重は $P_{s,exp}$ より小さいものの、せん断耐力式³⁾によるせん断耐力 $P_{s,cal}$ 程度までは精度良く再現できている。

次に Case 7, Case 10 の荷重比- J_2' 曲線を Fig. 4 に示

す。縦軸は実験での斜めひび割れ発生荷重 V_{c_exp} で除して正規化した荷重比とする。せん断補強鉄筋を有しない Case 7は V_{c_exp} に到達すると J_2 が急激に増加している。せん断補強鉄筋を有する Case 10は V_{c_exp} 付近で傾きが緩やかになり、最大荷重に到達した。このように傾きが変化する点は全ての解析ケースにおいて見られた。そこで、荷重- J_2 曲線の傾き変化点の J_2 を全解析ケースについて抽出し、そのステップにおける荷重を Table 2 にまとめた。Table 2 では荷重を各ケースの V_{c_exp} および斜めひび割れ発生荷重の計算値 V_{c_cal} に対する比を併せて示している。荷重比は Case 5を除いていずれも 0.8~1.1 程度となっており、 J_2 が 230μ 程度に到達すると斜めひび割れが発生するものと考えられる。そこで、斜めひび割れ発生耐力 V_c に対応する J_2 の限界値を 230μ と設定した。

Table 2 Evaluated J_2 Values for Diagonal Cracking Load

	$J_2' (\mu)$	荷重(kN)	荷重/ V_{c_exp}	荷重/ V_{c_cal}
Case1	257.9	935.0	1.16	0.96
Case2	272.3	740.4	0.97	0.97
Case3	256.4	1499.0	0.84	0.82
Case4	229.7	2960.7	0.82	0.83
Case5	223.4	114.6	0.90	0.76
Case6	248.4	326.0	1.06	0.92
Case7	187.5	1028.1	0.99	0.87
Case8	248.1	176.0	1.22	1.07
Case9	239.2	143.9	1.00	1.04
Case10	159.9	132.7	0.92	0.81
Case11	234.1	198.6	1.32	1.20
平均値	232.4	-	1.02	0.93

Table 3 Evaluated J_2 Values for Maximum Load

	$J_2' (\mu)$	荷重(kN)	荷重/ P_{s_exp}	荷重/ P_{s_cal}
Case8	1214	285.7	1.04	0.93
Case10	1162	204.1	0.83	0.94
Case11	1114	304.8	0.80	1.01
平均値	1163	-	0.89	0.96

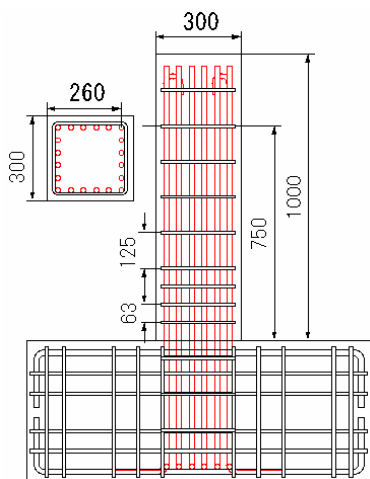


Fig. 5 Details of RC Column Specimen

b (mm)	300	
a (mm)	750	
a/d	2.88	
f_c (MPa)	49.7	
軸方向鉄筋	鉄筋径	D16*20
	降伏強度 (MPa)	378.4
	鉄筋比 (%)	1.53
せん断補強鉄筋	鉄筋径	D10
	降伏強度 (MPa)	384.5
せん断耐力	V_{c_cal} (kN)	163.9
	V_{s_cal} (kN)	99.2
	P_{s_cal} (kN)	263.1
曲げ耐力 P_{u_cal} (kN)	P_u/P_s	1.11

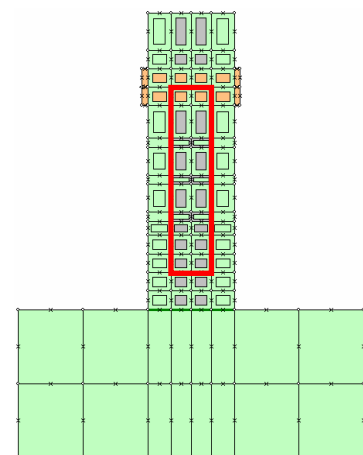


Fig. 6 Finite Element Mesh

次に、せん断補強された試験体の解析ケースでは、いずれも実験上の破壊荷重 P_{s_exp} まで達しなかったため、解析上での最大荷重時をせん断破壊点とし、そのステップにおける J_2 によって評価した。最大荷重時の J_2 の値を、その時の荷重および P_{s_exp} , P_{s_cal} に対する荷重比とともに Table 3 に示す。この結果に基づき、せん断補強された RC 部材のせん断耐力 V_s に対する J_2 の限界値を 1160μ と設定した。

3. RC 柱の FEM 解析による提案指標の検証

3.1 解析対象とした RC 柱の正負交番荷重実験概要

次に、前節で設定した損傷指標と限界値の妥当性を、RC 柱の正負交番荷重実験を用いて検証する。実験に用いた試験体諸元および配筋図を Fig. 5 に示す。せん断補強鉄筋は D10 異形鉄筋を 125mm 間隔で配置し、基部から高さ 250mm までは 62.5mm 間隔で配置した。載荷高さは基部から 750mm とし、曲げ降伏後のせん断破壊を生じるように設計した。軸圧縮応力を 1MPa 一定下で、降伏変位 $\delta_y=7\text{mm}$ の整数倍 ($n \cdot \delta_y$) の 3 回繰り返し水平変位を与える正負交番荷重を行った。実験では、 $0.5\delta_y$ で斜めひび割れ発生、 $1\delta_y$ で軸方向鉄筋、せん断補強筋が共に降伏した。 $2\delta_y$ で最大荷重および斜めひび割れ貫通、 $4\delta_y$ でせん断破壊に至った。

3.2 FEM 解析メッシュおよび解析結果

要素分割図を Fig. 6 に示す。要素分割方法は前節 RC 梁の解析と同様に行った。解析と実験における荷重一

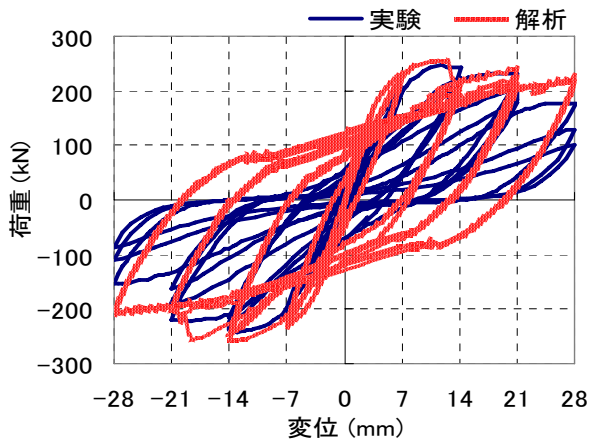
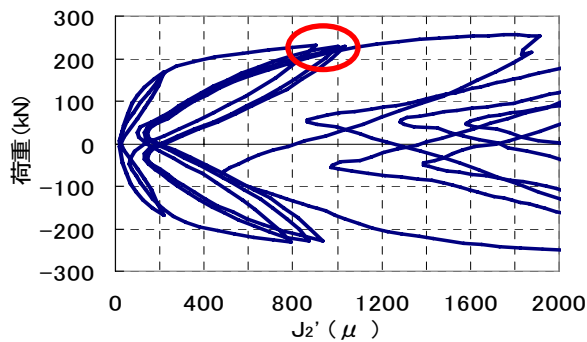


Fig. 7 Load-Displacement Relationships

Fig. 8 Load- J_2 Relationships

変位関係の比較結果を Fig. 7 に示す。2 δ_y までは精度良く再現されているが、3 δ_y の2ループ目以降の荷重の低下が再現されていない。しかし、2 δ_y で最大荷重を示す点はほぼ一致していることから、本結果を用いて提案指標を検証することとした。

3.3 提案したせん断損傷指標の検証

得られた荷重- J_2 曲線を Fig. 8 に示す。傾き変化点の J_2 の値は270 μ 、荷重値は175kNであった。前節で提案した J_2 の限界値230 μ および荷重の計算値 $V_{c,cal}$ (163.9kN)のいずれよりも若干大きい。また、最大荷重時の J_2 は1500 μ 程度であり、提案値1160 μ よりもかなり大きな値となった。これらの原因は、提案指標は繰返し変形に伴う累積残留ひずみの影響を考慮していないためと考えられ、今後さらなる検討が必要である。

4. まとめ

本研究では、RC梁のせん断破壊実験のFEM解析を行い、偏差ひずみ二次不変量の空間平均値に基づくせ

ん断損傷指標とその限界値を提案した。これをRC柱の交番載荷解析で検証した結果、提案した限界値は過小評価されることが明らかとなった。したがって、損傷指標に繰返し変形に伴う累積残留ひずみの影響を考慮する必要があると考えられ、今後の課題である。

参考文献

- 1) 例えば、日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，1996.12
- 2) 井畔，塩屋，野尻，秋山：等分布荷重下における大型鉄筋コンクリートはりのせん断強度に関する実験的研究，土木学会論文集，No.348/V-1，1984.8
- 3) 二羽，山田，横沢，岡村：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，No.372/V-5，pp.167-176，1986.8
- 4) 山谷，檜貝，足立，中村：せん断補強筋を有するRC梁の有限要素法解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.3，pp.415-420，1999
- 5) 山谷，中村，飯塚，檜貝：回転ひび割れモデルによるRC梁のせん断挙動解析，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.2，pp.359-364，1996
- 6) 土屋他：梁のせん断耐力と斜めひび割れの3次元分布に及ぼす側方鉄筋の効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.3，pp.997-1002，2001.7
- 7) 土屋智史：三次元非線形構造解析手法を用いた耐震性能評価システムの構築，東京大学学位論文，pp.73-78，2001.7
- 8) Witchukreangkrai, E. et al.: Evaluation of Shear Crack Width in partially Prestressed Concrete Members, Proceedings of the Japan Concrete Institute, Vol.28, No.2, pp.823-828, 2006
- 9) 岡村，前川：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技法堂出版，1991
- 10) Pimanmas, A., Maekawa, K. Okamura, H.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, Spon Press, 2003
- 11) An, X. et al.: Numerical Simulation of Size Effect in Shear Strength of RC Beams, 土木学会論文集，No.564/V-35, pp297-316, 1997.5