

既存 RC 建物の耐震診断基準における割線剛性を用いた S_D 値の非弾性ねじれ応答への有効性検証

Evaluation of torsional sensitivities in the Japanese seismic assessment guidelines for reinforced concrete buildings subjected to inelastic torsion

大阪大学大学院工学研究科 助教 鈴木有美

（研究計画ないし研究手法の概略）

【研究の背景および目的】

過去の地震被害調査では、鉄筋コンクリート造（以下 RC 造）建物が大部分の損傷が軽微であるにもかかわらず、著しい部分的損傷のために起こる局所崩壊が報告されてきており¹⁾、その主要因として建物のねじれ応答や層崩壊が指摘されている。

地震時にねじれ応答が発生すると、建物の中でも脆弱な部分の変形が増大することで該当部分の構造部材が荷重を支えきれなくなり、図 1 に示すような局所崩壊に至る。このような応答は異なる剛性が非対称に配置されることで起こる偏心が一般的な要因である一方、偏心がなくほぼ整形な建物であってもねじれ応答により局所的に損傷が大きくなる現象も地震被害調査で確認されてきている²⁾。これは地震時に構造部材が弾性限界を超えた非弾性域での挙動を示し、全体の剛性やねじれ抵抗力のバランスが変化することで生じる「非弾性ねじれ応答」が原因であると考えられており、従来の偏心率の評価によりねじれ応答が予測できない危険性があることを示している。

2017 年改訂版の既存 RC 造建物の耐震診断基準³⁾では、偏心率の算定に割線剛性を用いることで初版より定式化されていた弾性剛性に基づく偏心率と比べて部材の非弾性域での挙動を考慮しやすくなった。建物の偏心率は形状係数 S_D として評価結果に反映される為、偏心率に追随する形状係数 S_D の有効性も検証する必要があるが、特に非弾性ねじれ応答を示す建物について、実験的研究の数が少なく適用例や検証数が不十分である。さらに、大地震時の被害を最小限するためには耐震診断において偏心率に基づく構造耐震指標 I_s 値の低減率は適切に評価される必要があるものの、割線剛性を決定する層間変形角の定義が簡略化されていることから実際の偏心率とかけ離れた偏心率評価になる危険性を含んでおり、 I_s 値の評価にどの程度影響があるか不明確である。

以上の背景に基づき、本研究では 2017 年改訂版の RC 造建物の耐震診断基準における建物の偏心率と形状指数の評価方法について、割線剛性を用いた剛性偏心率の非弾性ねじれ応答への適用性と、割線剛性を用いた S_D 値（A・B・C 法の偏心低減率）の非弾性ねじれ応答に対する有効性の解明を目的とする研究を実施した。



図 1—ねじれ応答による局所崩壊¹⁾

非弾性ねじれ応答に関する研究は実験・解析両面において世界的に数が少なく、非弾性ねじれを考慮する上で十分な議論をするためのデータが揃っていない。本研究の研究代表者は近年 RC 建物の非弾性ねじれ応答に関する研究を実験・解析や耐震診断の多角的な視点から継続して行ってきており^{例 4)}、本研究は、割線剛性に基づく偏心率と S_D 値が実際の偏心率や性能低減に対しどの程度整合性を示すのか、過去の実験データを用いて検証したものである。

【研究方法】

研究代表者が過去に行った非弾性ねじれ応答の振動台実験の実験データ⁴⁾で一般公開済のもとに、同試験体に弾性剛性と割線剛性に基づく偏心率と S_D 値を求め、非弾性ねじれ応答時が実際に起こった建物の偏心率と S_D 値の整合性を評価した。また、耐震性能指標 I_s 値を返信システムおよび偏心システムと同等の無偏心システムに対して求めることで形状指標の影響を検討した。

本研究で検討した偏心システム（剛性偏心、損傷偏心、および変形性能偏心）の概念図を図 2 (a)~(c)に、対応する無偏心システムを図 2 (d)~(f)に示す。なお、対象建物は重量偏心を有しておらず、建物の重心（同図中の CM）は平面の図心に位置する。対象模型の 1 階を構成する各柱について、試験体 1 の靱性柱を C-D1（Column-Ductile-Specimen1 の意）、試験体 2 の靱性柱を C-D2、同じく試験体 2 の脆性柱は、せん断補強筋の直径に基づき C-ND10 および C-ND6（それぞれ D10 および D6 を使用）と定義した。また、柱 C-D1-inf は、URM 壁が取りついた柱を表している。

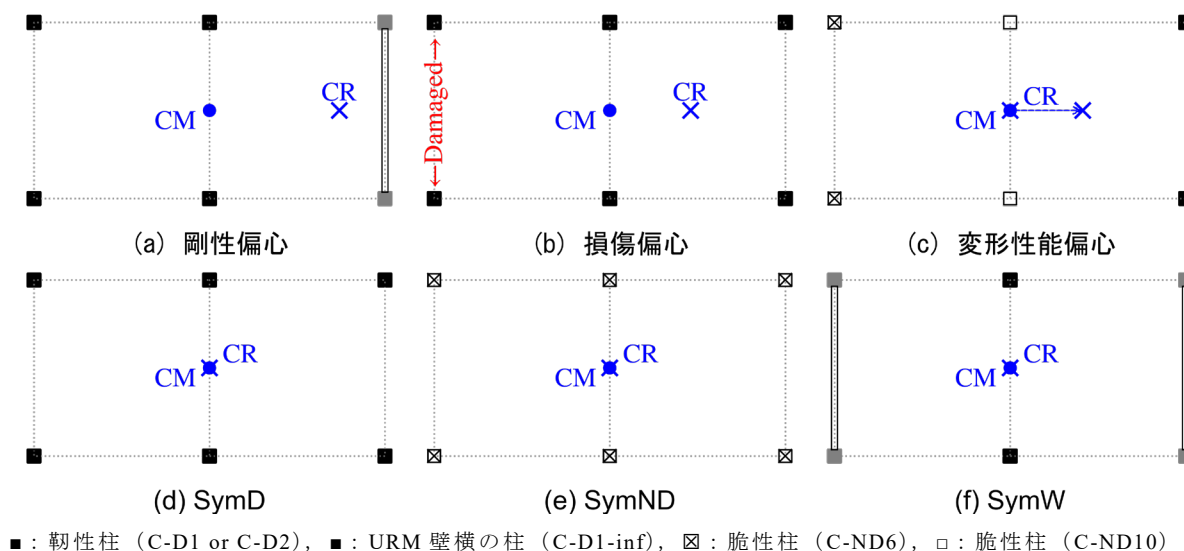


図 2 対象建物 1 階の平面略図を用いた偏心・無偏心システム模式図

図 2(a)に示す剛性偏心システムでは、偏在配置された URM 充填壁により建物 1 階の剛心（図中の CR）が充填壁側に移動することで水平剛性偏心が発生する。一方、図 2(b)に示す損傷偏心では、図 2(a)の剛性偏心を実験したのち、剛性偏心の要因となっていた URM 充填壁を除去した結果、先の実験でのねじれ応答で応答変形が大きかった構面の柱部材の損傷により偏心が発生する。ここで、明らかな耐力劣化の生じていない損傷 RC 柱部材について、経験した塑性率 μ におおよそ比例した剛性の低減が起こることが既往の研究⁵⁾で確認されていることから、図 2(b)で示す損傷偏心は剛心 CR が損傷の少ない構面寄りに位置することで

発生する水平剛性偏心とみなすことができる。また、図 2(c)に示す変形性能偏心は、脆性部材の劣化挙動が発生するまでおおむね無偏心である。脆性部材の劣化挙動が発生すると、脆性部材の性能曲線は負勾配となることから、該当構面の剛性と水平抵抗力はともに低下する。したがって、剛心 CR は変形性能の高い靱性柱のある構面側へ移動し偏心が発生する。

本研究では、式 (1) で定義される耐震診断基準の S_D のうち、 q_{2l} を本研究における「ねじれ偏心に関わる形状指標 S_{Dh} 」として定義し検討を行った。

$$S_D = q_{2a} \times q_{2b} \times q_{2c} \times q_{2d} \times q_{2e} \times q_{2f} \times q_{2h} (\times q_{2j}) \times q_{2k} \times q_{2l} \times q_{2n} \quad (1)$$

ただし、 $q_{2i} = 1 - (1 - G_i) \times R_{2i} \quad \dots \quad i = a, b, c, d, e, f, (j), k, l, n$
 $q_{2i} = 1.2 - (1 - G_i) \times R_{2i} \quad \dots \quad i = h$

(実験調査によって得られた新しい知見)

以上に示した評価過程で得た偏心率の算定結果を表 2 に示す。また、 S_{Dh} の評価結果を表 4 に、 S_{Dh} を文献 4) の最大地震応答値と対応させたものを図 3 に示す。

本研究で得られた結果を以下で総括する。

□ 改訂前の耐震診断基準と改訂後の A 法の比較より割線剛性を用いた評価は、水平剛性偏心と剛性低減を文献) により考慮した損傷偏心の偏心率 l に影響することが確認されたものの、検討対象は $l > 0.15$ となり、形状指標自体に与える影響は限定的であることが確認された。

□ 割線剛性を用いることによる形状指標への影響について、偏心システム別に以下の知見を得た。

剛性偏心：算定方法により水平剛性偏心に関わる形状指標の評価結果が異なり、A 法、B 法、C 法の順に形状指標が小さくなることが確認された。

損傷偏心：改訂版の割線剛性を用いても偏心率として評価に反映されず形状指標への影響はなかった。しかし、損傷した部材の剛性低減を例えば文献 5) 等により適切に考慮すれば、形状指標に偏心の影響が反映できる可能性を示した。

変形性能偏心：割線剛性を用いることにより偏心を形状指標へ反映することはできなかった。

□ 捩れ応答との比較では、非弾性ねじれ応答を考慮した損傷偏心と変形性能偏心への特筆すべき相関はみられなかった

なお、これらは海外の既存 RC 造建物を対象とした実験研究に対して検討した限定的な結果であり、極めて柔な細長柱に対して耐震診断基準で示されている「基準となる変形角」の定義と現実の変形角に整合性が取れていない可能性があり、柱の破壊性状の判定基準や日本国内の既存 RC 建物に対する検討は今後の課題であり、本研究の延長として検討を進めている。

表 1 偏心率の算定結果

偏心要素	l , 改訂前	l , A 法	R_{eY} , B 法 (弾性剛性)	R_{eY} , B 法 (割線剛性)
剛性偏心	0.428	0.226	0.342	0.590
損傷偏心	0	0	0	0
損傷偏心, 剛性低減 ⁵⁾	0	0.158	0	0.396
変形性能偏心	0	0	0	0

表 2 水平方向偏心に関わる形状指標 S_{Dh} 値算定結果

偏心要素	S_{Dh} , 改訂前	S_{Dh} , A 法	S_{Dh} , B 法 (弾性剛性)	S_{Dh} , B 法 (割線剛性)	S_{Dh} , C 法
剛性偏心	0.8	0.8	0.67	0.67	0.43
損傷偏心	1	1	1	1	1
損傷偏心, 剛性低減 ⁵⁾	-	0.8	-	0.67	0.62
変形性能偏心	1	1	1	1	1

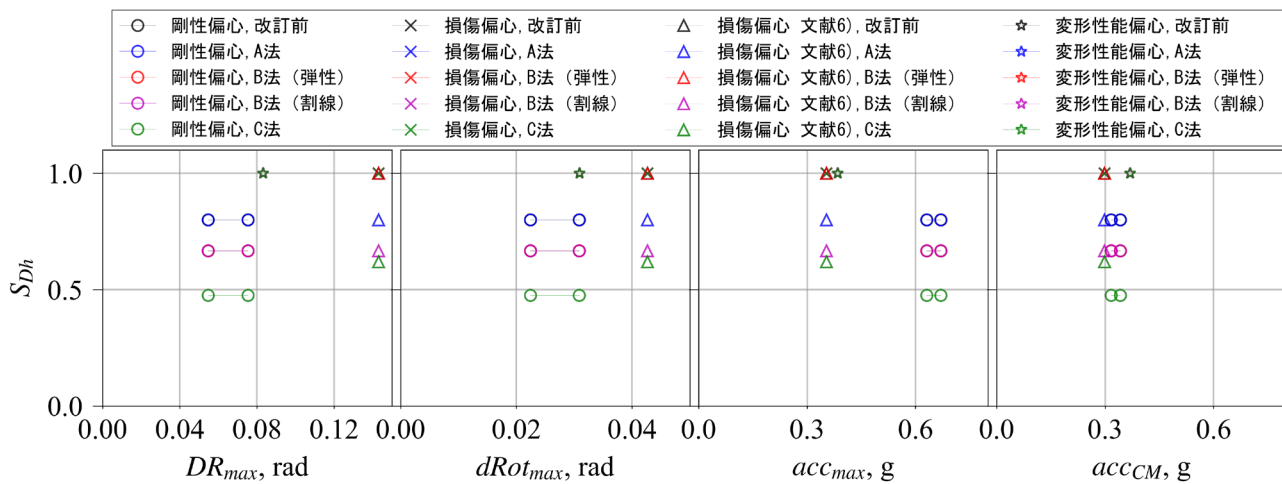


図 3 水平剛性偏心に係る形状指標の算定結果

表 3 構造耐震指標 (I_s) の算定結果

偏心要素	$I_s = E_0 S_D$, 2017年改訂版				$I_s = E_0 S_D$ 2001年改訂版
	A 法	B 法 (弾性)	B 法 (割線)	C 法	
剛性偏心	0.251	0.078	0.087	0.103	0.226
損傷偏心	0.287	0.158	0.120	0.199	0.259
損傷偏心, 剛性低減 ⁶⁾	0.230	-	0.080	0.123	-
変形性能偏心	0.287	0.157	0.120	0.198	0.258
SymD	0.288	0.324	0.120	0.199	0.259
SymND	0.251	0.283	0.105	0.174	0.226
SymW	0.338	0.380	0.141	0.235	0.304

【参考文献】

- 1) NCREE (2016) The February 6, 2016 ML-6.6 Meinong, Taiwan Earthquake and Lessons Learned.
- 2) Kam et al. (2011) Seismic performance of reinforced concrete buildings in the 22 February Christchurch (Lyttelton) earthquake. *Bulletin of the NZSEE*, 44(4), 239-278.
- 3) 日本建築防災協会 (2020) 2017年鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・同解説 (改訂版4刷), 一般財団法人日本建築防災協会/国土交通大臣指定耐震改修支援センター
- 4) T. Suzuki, K. J. Elwood, A.Y. Puranam, H.-J. Lee, F.-P. Hsiao, S.-J. Hwang (2020): Shake-table Test of Seven-story Reinforced Concrete Structures with Torsional Irregularities. *Designsafe-CI*, <https://doi.org/10.17603/ds2-q6cf-mb79>, <https://doi.org/10.17603/ds2-94sa-7r36>
- 5) Marder et al. (2020) Post-earthquake assessment of moderately damaged reinforced concrete plastic hinges. *Earthquake Spectra*.36(1):299-321. doi:10.1177/8755293019878192
- 6) 川瀬ら(2014) 割線剛性を用いた層降伏型 RC+S 建物の F_s 値算定法の提案, 日本建築学会構造系論文集, 79, No.703, 1347-1354.
- 7) 壁谷澤ら(2018)日本建築防災協会 既存鉄筋コンクリート造建築物の耐震診断基準・耐震改修設計指針・適用の手引き 2017年改訂の概要, コンクリート工学, Vol. 56, No.7, pp 555-560.
- 8) MBIE et al. (2017) The Seismic Assessment of Existing Buildings. <https://www.eq-assess.org.nz>

(発表論文)

鈴木有美:ねじれ偏心を有する鉄筋コンクリート造建物の地震応答と耐震診断基準における割線剛性を用いた形状指標の対応性検証,第16回日本地震工学シンポジウム論文集,2023.11.