

論文 繰り返し載荷履歴の影響を考慮した RC 造建物の地震損傷評価

市川 大真*1・田嶋 和樹*2・長沼 一洋*3

要旨: 本研究の目的は、地震時の RC 造建物の損傷度を簡易的に評価するため、損傷スペクトルを用いた損傷評価体系を確立することである。この手法の損傷状態を表す損傷指標は、Park らの損傷カテゴリーに基づいて評価している。しかし、この損傷カテゴリーは入力地震動の影響について十分に検討されていない。また、異なる入力地震動において、履歴挙動が一致しなくても同程度の損傷指標を示し、損傷指標の物理的意味が不明瞭などの問題点が挙げられる。そこで、本報では仮想 RC 造骨組を構築して解析的に損傷状態と損傷指標を相対的に評価した。その結果、地震時の履歴エネルギー吸収量に影響があることを確認した。

キーワード: 損傷スペクトル, 損傷指標, 地震応答解析, 履歴エネルギー

1. はじめに

国内における既存鉄筋コンクリート(以下、RC)造建物の損傷評価手法は、耐震診断の考え方に基づいているが、地震動特性の影響が十分に考慮されていない。そこで、筆者らは3段階構成(第1段階:1質点系による簡易損傷評価,第2段階:骨組モデルによる損傷評価,第3段階:3次元FEM解析による損傷評価)の迅速かつ高精度な損傷評価手法の構築を目指している¹⁾。第1段階では、Bertero and Bozorgnia²⁾により提案された損傷スペクトルという手法を採用しており、入力地震動によってRC造建物に生じる損傷程度の概略値を把握することができる。

ここで、損傷スペクトルを用いた損傷評価の問題点として、①建物の損傷状態を表す損傷カテゴリーは入力地震動の影響について十分に検討されていないこと、②異なる入力地震動において地震時の履歴挙動が一致しなくても損傷指標が同程度の値を示す場合があること³⁾、などが挙げられる。そこで、本研究では上述の問題点に着目し、仮想RC造骨組モデルを構築し、解析的に損傷スペクトルによる損傷評価結果と骨組の損傷状態の物理的意味を明確にした損傷指標の改良を試みる。

2. 損傷スペクトル

2.1 損傷スペクトルの概要

損傷スペクトルとは、建物を等価1質点系でモデル化し、弾性1次固有周期T(sec)と損傷指標DIの関係を表したものである(図-1)。縦軸に示される損傷指標はParkら⁴⁾の損傷カテゴリーと対応させることにより具体的な損傷状態を評価する。本研究ではBertero and Bozorgnia²⁾によって提案されたDI₂式を採用している。以下にDI₂式を示す。

$$DI_2 = [(1-\alpha_2)(\mu - \mu_e)/(\mu_{mon} - 1)] + \alpha_2(E_H / E_{Hmon})^{1/2} \quad (1)$$

*1 日本大学大学院 理工学研究科建築学専攻 (学生会員)

*2 日本大学 理工学部建築学科准教授 博士(工学)(正会員)

*3 日本大学 理工学部建築学科教授 博士(工学)(正会員)

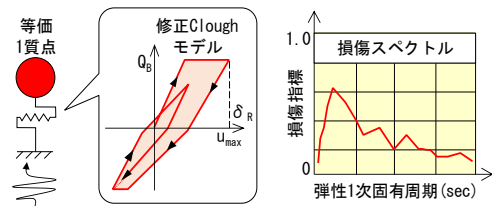


図-1 損傷スペクトルの概要

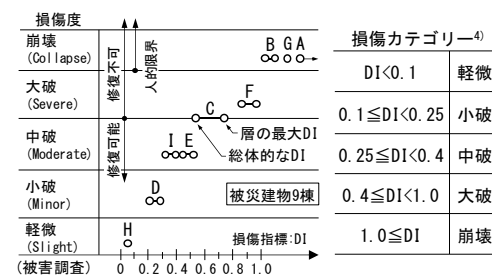


図-2 Park らの損傷カテゴリー

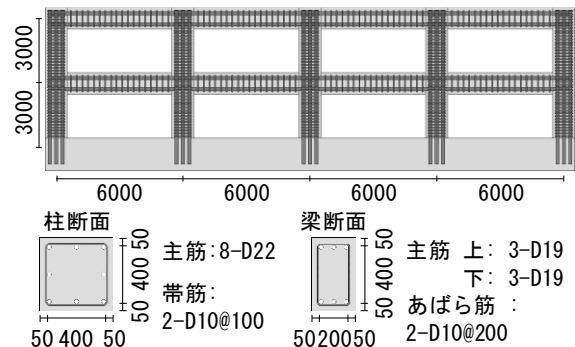


図-3 仮想2層4x2スパン骨組の概要

ここで、 μ : 変位塑性率, μ_e : 降伏時変形に対する最大弾性変形の比, μ_{mon} : 単調水平載荷時の終局塑性率, E_H : 地震時の履歴エネルギー吸収量, E_{Hmon} : 単調水平載荷時の履歴エネルギー吸収量, α_2 : 定数である。また、DI₂の導出過程および詳細なパラメータの設定方法は、参考文献(1)および(2)を参照されたい。

2.2 損傷カテゴリーおよび損傷指標の問題点

現行の損傷カテゴリーは、Park ら⁴⁾による被災した9棟のRC造建物の被害調査結果と損傷指標の関係性から設定(図-2)しており、入力地震動の影響について十分な検討がされていない。また、既往の研究³⁾では異なる入力地震動において、履歴挙動が一致しなくても損傷指標が同程度になることを確認しており、損傷指標の物理的意味が不明瞭である問題点も挙げられる。これらに際して、仮想RC造骨組を用いて解析的に検討する。

3. 仮想RC造骨組モデルの構築

2016年の熊本地震の被害調査結果⁵⁾より、1970年代に建設された建物において甚大な被害が生じていた。そこで、本研究における解析対象の仮想RC造骨組は、1970年代当時の一般的な構造設計手法により設計された2層4×2スパンRC造建物(図-3)を想定しており、全ての柱および梁は同一断面としている。また、解析対象が仮想骨組であるため、FEM解析結果を真と仮定し、異なる解析手法を用いて相対的評価を試みた。

3.1 解析モデルの概要

数値解析にはファイバー解析およびFEM解析を用いており、損傷スペクトルの損傷評価手法を考慮して1質点系モデルを比較対象として用いた。

まず、ファイバー解析(図-4)は、数値解析コードOpenSees⁶⁾を用いた。柱はファイバー要素、梁は塩原ら⁷⁾の手法に基づいて、両端塑性ヒンジ長さ(部材断面せい¹/2)がファイバー要素で中間領域が弾性体から構成されるBeamWithHinges要素を用いており、保有水平耐力計算に基づいて梁に協力幅として1mのスラブ筋を考慮した。基礎および柱梁接合部は剛域、スラブは剛床仮定として、ファイバー部材が強度上昇しないように梁の弾性体は軸方向力が十分小さいものとした。また、柱脚には、既往の研究⁸⁾に基づく方法で接合部サブ要素を導入し、柱主筋の抜け出しを考慮した。

FEM解析(図-5)は対称性を考慮して1/2でモデル化し、コンクリートは六面体要素、主筋はトラス要素、せん断補強筋およびスラブ筋は埋込鉄筋でモデル化した。また、コンクリート-鉄筋間の付着すべり挙動を考慮するため、4節点接合要素により表現した。

1質点系解析では、修正Cloughモデル(トリリニア型)の復元力特性を採用している。第1折れ点は、柱部材の曲げひび割れ点としており、第2折れ点は柱脚主筋が降伏した点としている(図-6)。また、1質点系モデルであるため、限界耐力計算に基づいて有効質量に変換した。

3.2 地震応答解析結果

入力地震動は、最大速度を50kineに基準化したEI Centro NSを用いており、長辺方向への1方向入力とした。

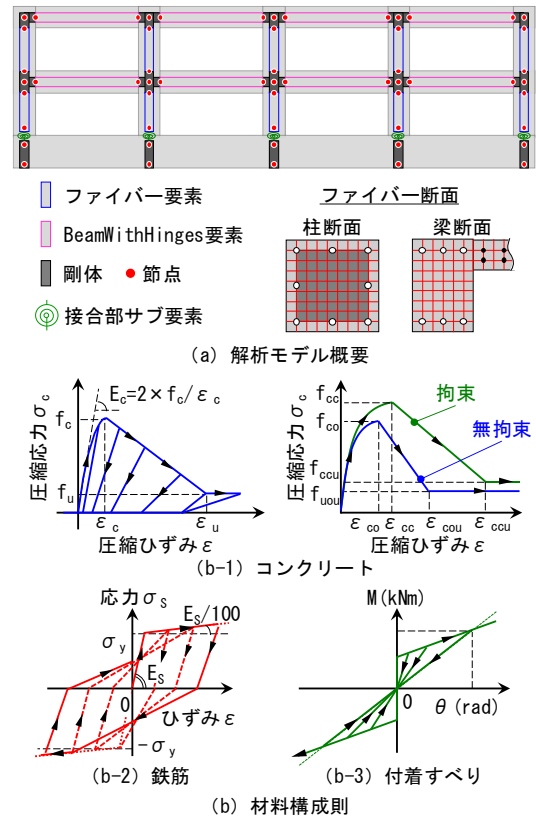


図-4 ファイバー解析モデルの概要⁸⁾

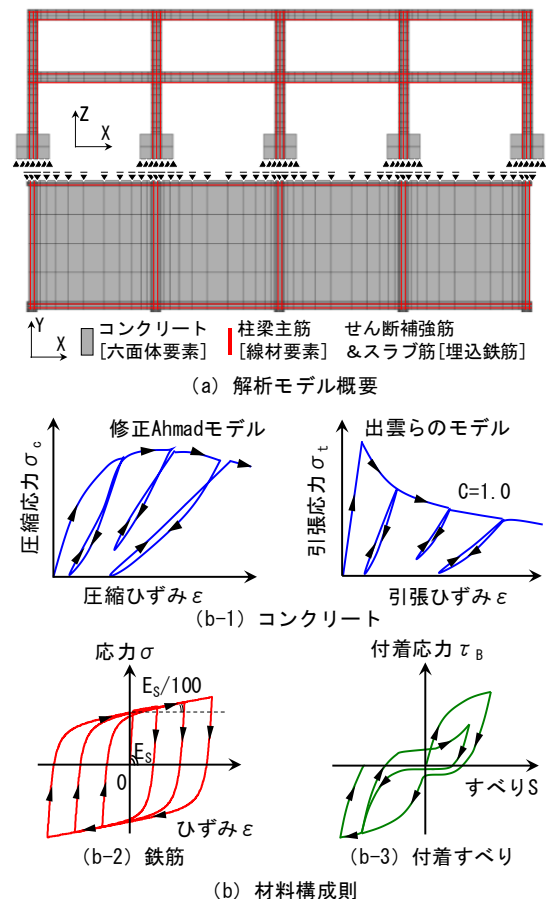


図-5 FEM解析モデルの概要^{9) 10) 11)}

減衰定数は 3%としており、解析区間は最大加速度前後の 10 秒間としている。

図-7 に解析結果における Q_B-R 関係を示す。FEM 解析結果はファイバー解析および 1 質点解析に比べて最大耐力が若干大きい。これは、解析条件においてスラブのモデル化の違いが影響している。ファイバー解析の場合、協力幅として 1m のスラブ筋を考慮しており、1 質点解析はファイバー解析に基づいて復元力特性を設定している。一方、FEM 解析では最大耐力時に 2 階梁端部でスラブ筋の大きな負担応力が確認できる(図-8)。そのため、最大耐力は FEM 解析結果が突出したと考えられる。しかしながら、全体的に顶部応答および剛性は概ね同等の値を示す結果となった。

ここで、相対的に損傷状態を比較するため、各解析結果における主筋の降伏状況について確認する(図-9)。なお、FEM 解析結果についてはスラブ筋の降伏状況も併せて示している。ファイバー解析の 2 階梁端の降伏は FEM 解析より多いことが確認できる。これは、前述したスラブのモデル化の違いが影響していると考えられる。ファイバー解析ではスラブ筋の負担応力を梁主筋が過大に負担しており、FEM 解析に比べて早期に 2 階梁端に降伏が見られたと推察できる。しかし、FEM 解析における全ての 2 階梁端について、スラブ筋の降伏が確認できる。

また、柱および梁主筋の降伏を塑性ヒンジと仮定した場合、どちらも崩壊機構は未形成であることが考えられ、主筋降伏の数には違いが見られるが、スラブ筋の降伏状況も踏まえて考えると、解析手法の違いに関わらず概ね同様の結果であることが確認できた。

4. 入力地震動をパラメータとした地震応答解析

本章では、表-1 に示すような計 43 波の入力地震動において、パラメトリックに地震応答解析を実施し、入力地震動の違いが損傷指標の推移に及ぼす影響について考察する。なお、3 章でモデル化の妥当性を確認したため、本章からはファイバー解析に基づいて検討を進める。

図-10 に地震応答解析結果から算出した損傷指標 (DI_2) - 最大応答時の顶部変形角 (R_{max}) 関係を示す。定性的に、最大応答値が大きくなることで損傷指標が増大することを確認できる。しかし、地震種別ごとに比較すると、近似線を境に東北地方太平洋沖地震の解析結果が過大評価となり、熊本地震および主要地震波は過小評価となっている。この要因として、地震波の継続時間の影響が考えられる。既往の研究⁹⁾より、直下型地震の傾向を示す入力地震動と海溝型地震のような継続時間の長い入力地震動では、算出される損傷指標の内訳(変形項、エネルギー項)の割合が異なることを報告している。今回の解析結果で過大評価した入力データは、東北地方太

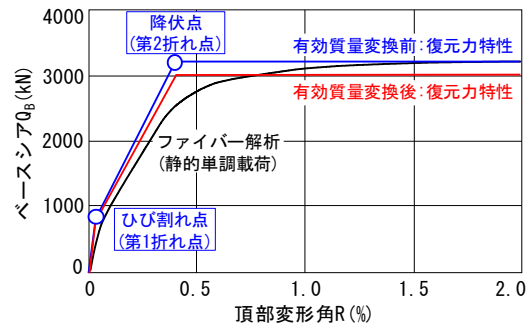


図-6 1 質点解析モデルの概要

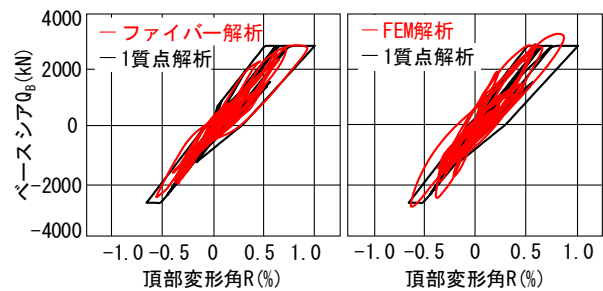


図-7 地震応答解析結果

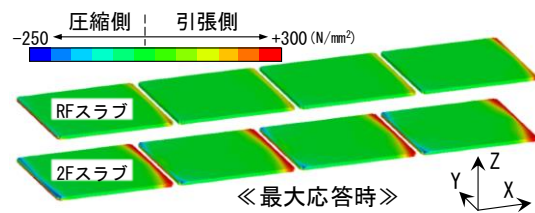


図-8 スラブ筋の応力図

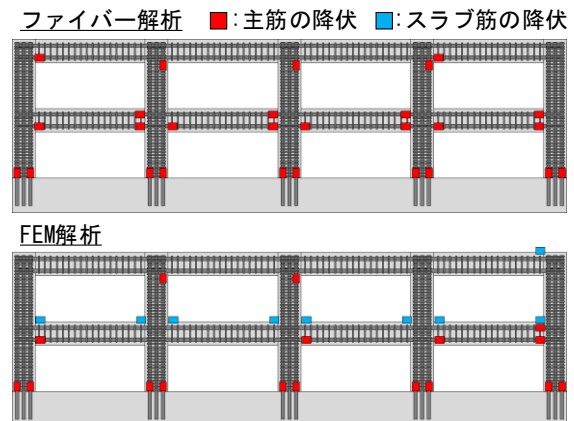


図-9 主筋およびスラブ筋降伏図

平洋沖地震で継続時間が長い入力地震動である。一方、熊本地震および主要地震波は、直下型地震の傾向で比較的継続時間が短く、入力が大きくなるのは最大加速度付近のみである。そのため、地震時の履歴エネルギー吸収に伴う損傷の影響は小さく、継続時間の長い入力地震動よりも変形項の割合が大きくなると考えられる。

そこで、算出される損傷指標が概ね同等の値を示した KMM006NS および MYG004EW に着目して詳細に考察する。図-11 に各地震応答解析結果におけるベースシア (Q_B) - 頂部変形角 (R) 関係を示す。最大応答値は、KMM006NS の方が 2 倍程度大きい。また、MYG004EW は最大応答値付近で繰り返し履歴を描いており、継続時間の長さを踏まえると履歴エネルギー吸収量に伴う損傷指標の増大が著しいと考えられる。一方、KMM006NS は卓越した入力加速度により大きな履歴を描いているが、その後は剛性が低下し小さな履歴を描いている。そのため、MYG004EW に比べて履歴エネルギー吸収量に伴う累積的な損傷指標の増大は小さいと考えられる。

ここで、解析結果における骨組の損傷状態について柱および梁の主筋降伏状況を確認する (図-12)。KMM006NS の方が MYG004EW よりも降伏している主筋の数が多くっており、主筋の降伏を塑性ヒンジと仮定した場合、MYG004EW は崩壊機構が未形成であり、KMM006NS は崩壊機構を形成していると考えられる。また、1 階柱脚における内柱のコアコンクリートの応力-ひずみ関係 (図-13) を確認すると、KMM006NS のみコアコンクリートが圧縮軟化域に達している。

さらに、地震応答解析後に静的単調載荷した結果を図-14 に示す。明らかに KMM006NS の剛性が低く、残余耐震性能の観点から損傷状態を推定すると、KMM006NS における損傷の方が著しいと言える。しかし、現行の損傷カテゴリに当てはめると両者の損傷状態は共に「大破」判定である。

以上のことから、現行の損傷指標の場合、損傷指標が同程度の値を示したとしても実際の骨組の損傷状態に必ずしも直結しない可能性がある。

5. 改良損傷指標の提案

4 章において、現行の損傷指標における地震時の履歴エネルギー吸収量に伴う累積的な損傷指標の増大は、過大評価に繋がる可能性を確認した。また、既往の研究¹²⁾ではエネルギー吸収性能において繰り返し回数と損傷に密接な関わりがあることを報告している。

そこで、本章では履歴エネルギー吸収に関する RC 造骨組の損傷の寄与について、Mehanny and Deierlein ら¹³⁾のエネルギーに基づく損傷指標式に着目して現行の損傷指標の改良を試みる。

5.1 Mehanny and Deierlein らにおける損傷指標の概念

Mehanny and Deierlein らはエネルギーに基づく損傷指標と塑性率に基づく損傷指標の 2 つを提案しており、Park らの損傷指標の問題点である連続的に作用する繰り返し荷重の影響を考慮するにあたり、主要半サイクル (PHC : Primary Half Cycle) と従属半サイクル (FHC :

表-1 入力地震動の概要

地震種別	入力地震動					
	種別	方向	種別	方向		
熊本地震 ※原波	KMMH16	NS	KMMH03	NS		
		EW		EW		
	KMM008	NS	KMM011	NS		
		EW		EW		
	KMM006	NS	OIT009	NS		
		EW		EW		
東北地方 太平洋沖 地震 ※原波	MYG004	NS	FKSH10	NS		
		EW		EW		
	MYG012	NS	IWT010	NS		
		EW		EW		
	MYG013	NS	IBRH11	NS		
		EW		EW		
TCGH16	NS	MYGH10	NS			
	EW		EW			
主要 地震波	JMAKobe	原波	El Centro	50kine		
		NS		EW	75kine	
		NS		EW	100kine	
	JMAKobe	原波	Hachinohe	原波		
		EW		NS	50kine	
		EW		NS	75kine	
	El Centro	NS	原波	NS	100kine	
			NS		75kine	
		NS	50kine		NS	100kine
			NS			75kine

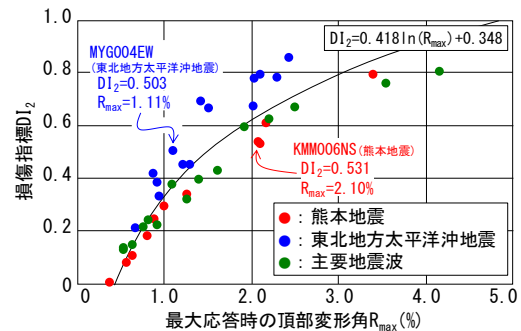


図-10 損傷指標(DI₂) - 最大応答(R_{max})関係

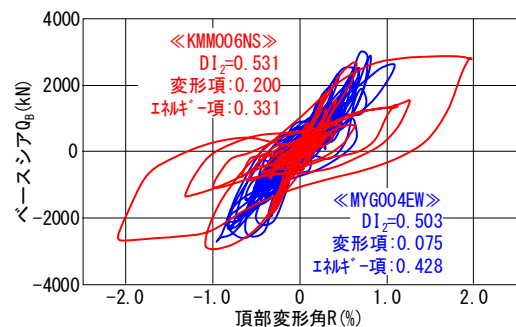


図-11 ベースシア(Q_B) - 頂部変形角(R)関係

Follower Half Cycle) を図-15 (a) に示すように定義している。PHC は経験最大変形を有する任意の半サイクル、FHC は PHC の後に続く変形の小さい半サイクルである。主要半サイクル PHC_i が有する最大変形値 θ_i を超過する半サイクルが続くとき、新たな主要半サイクル θ_{i+1} が確立される。なお、半サイクルを基準としているのは、正負の変形を別々に扱うためである。PHC は損傷の進展に

大きな影響を及ぼし、FHCは損傷に対する寄与が比較的少ないと考え、荷重サイクルの作用順序とその損傷進展に対する影響を反映することにより、損傷指標に繰り返し荷重の影響を考慮している。以下に、Mehanny and Deierlein 13)のエネルギーに基づく損傷指標式を示す。

$$D_E^+ = \frac{(\sum_{i=1}^{n^+} E_{PHC,i}^+)^{\alpha} + (\sum_{i=1}^{n^+} E_{FHC,i}^+)^{\beta}}{(E_T^+)^{\alpha} + (\sum_{i=1}^{n^+} E_{FHC,i}^+)^{\beta}} \quad (2)$$

$$D_E^- = \frac{(\sum_{i=1}^{n^-} E_{PHC,i}^-)^{\alpha} + (\sum_{i=1}^{n^-} E_{FHC,i}^-)^{\beta}}{(E_T^-)^{\alpha} + (\sum_{i=1}^{n^-} E_{FHC,i}^-)^{\beta}} \quad (3)$$

$$D_E = \sqrt[\gamma]{(D_E^+)^{\gamma} + (D_E^-)^{\gamma}} \quad (\geq 1.0 : \text{崩壊}) \quad (4)$$

ここで、n : PHC および FHC の番号、 $E_{PHC,i}$: PHC に対応する履歴エネルギー吸収量、 $E_{FHC,i}$: FHC に対応する履歴エネルギー吸収量、 E_T : 単調載荷時の履歴エネルギー吸収量、 α, β, γ : キャリブレーション係数である (±の符号によって正負を区別している)。

5.2 損傷指標の改良

改良する損傷指標は、Mehanny and Deierlein らの PHC と FHC の分類による履歴エネルギー吸収量に伴う損傷の重み付けを考慮しており、エネルギー項の分子と分母のそれぞれに FHC の履歴エネルギー吸収量を入れることで、経験する最大応答値以下の損傷の重み付けを軽減している。改良した損傷指標 (DI_d) 式を以下に示す。

$$DI_d = [(1 - \alpha_2)(\mu - \mu_e) / (\mu_{mon} - 1)] + \alpha_2 [(E_{H,PHC} + E_{H,FHC}) / (E_{Hmon} + E_{H,FHC})]^{1/2} \quad (5)$$

ここで、 $E_{H,PHC}$: PHC に対応する地震時の履歴エネルギー吸収量、 $E_{H,FHC}$: FHC に対応する地震時の履歴エネルギー吸収量である (図-15 (b))。

5.3 改良損傷指標の適用性

図-16に4章と同様のパラメトリックな地震応答解析結果から算出された改良損傷指標 (DI_d) - 最大応答時の頂部変形角(R_{max})関係を示す。まず、全体的な傾向として現行の損傷指標 (DI₂) における結果 (図-10) と同様に、最大応答値が大きくなることで損傷指標が増大することを確認できる。さらに、今回の改良損傷指標では入力地震動の違いに関わらず概ね近似式に沿っていることが確認できる。この結果について詳細に確認するため、4章で着目した KMM006NS および MYG004EW の異なる傾向の入力地震動において、その妥当性を検証する。

図-17に現行の損傷指標 (DI₂) および改良損傷指標 (DI_d) の比較を示す。KMM006NS の場合は、どちらの損傷指標においても 0.4 を超えており、損傷カテゴリでは「大破」判定となっている。一方、MYG004EW の場合は、現行の損傷指標では 0.4 を超えているため「大破」判定であるが、改良損傷指標では 0.4 を下回っており「中破」判定となった。

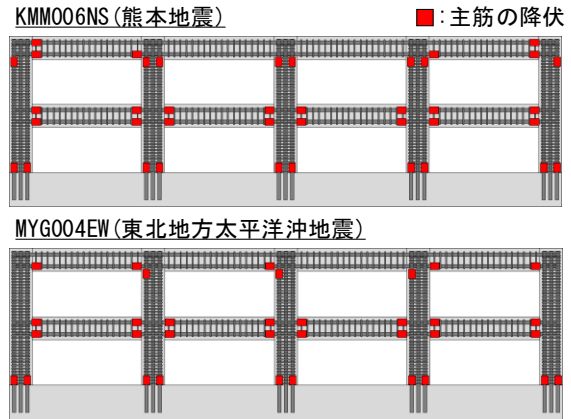


図-12 柱および梁の主筋降伏図

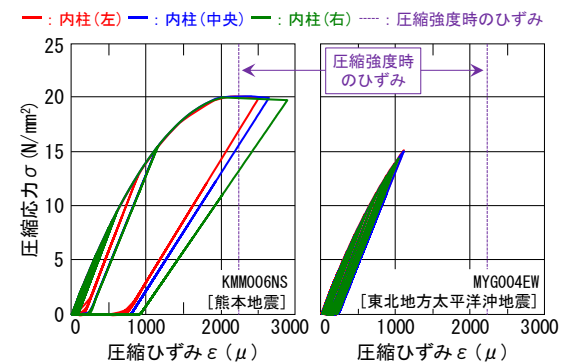


図-13 1階柱脚コアコンクリートのσ-ε関係

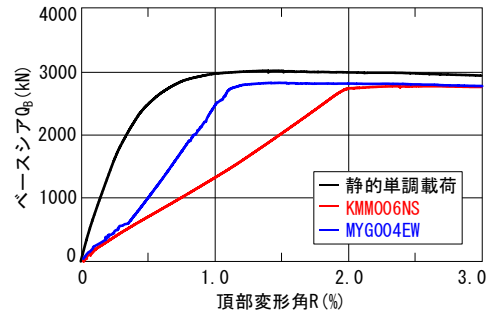


図-14 地震応答解析後の静的単調載荷結果

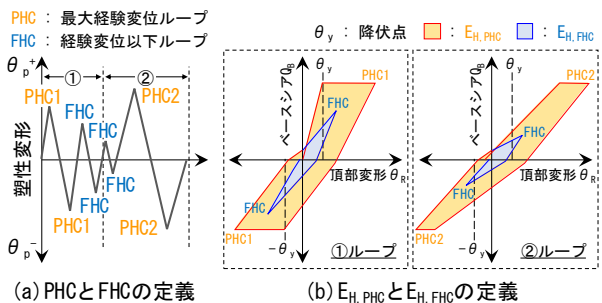


図-15 繰り返し載荷履歴に伴う各指標の定義 13)

以上より、4章における損傷状態の比較から考えると、改良損傷指標 (DI_d) が示す損傷カテゴリの損傷度は、概ね良好な傾向を捉える結果となった。

6. まとめ

本報では、損傷スペクトルを用いた RC 造建物群の簡易損傷評価手法の構築を目的として、解析的な検討を実施した結果、以下の知見を得た。

- (1) 入力地震動をパラメータとした地震応答解析の結果、現行の損傷指標 (DI_2) の場合は地震時の履歴エネルギー吸収量の影響を過大に評価する傾向があり、損傷指標が同程度の値を示したとしても損傷状態に必ずしも直結しない可能性がある。
- (2) 履歴ループに応じて、地震時の履歴エネルギー吸収量に伴う損傷への重み付けを考慮した損傷指標の改良を試みた。その結果、骨組の損傷状態と改良損傷指標 (DI_d) が示す損傷度は概ね同程度であり、入力地震動の影響を考慮できる可能性を示した。

謝辞

本研究では、防災科学技術研究所の K-NET および Kik-net で観測された地震動を利用しました。また、研究の遂行にあたり、日本大学白井伸明名誉教授より多くのご助言を戴きました。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 市川大真, 今井究, 田嶋和樹, 長沼一洋: 連続的な地震入力の影響と損傷の変動性を考慮した RC 造建物群の損傷評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.2, pp.685-690, 2017
- 2) Bozorgnia, Y. and Bertero, V. V.: Damage Spectra: Characteristics and Applications to Seismic Risk Reduction, Journal of Structural Engineering, ASCE, pp.1330-1340, Oct., 2003.
- 3) 市川大真, 蓮池類, 田嶋和樹, 長沼一洋: 損傷スペクトルを用いた RC 造建物群の損傷評価(その1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.557-560, 2017.8
- 4) Park, Y. J., Ang, A.H. S.: Seismic Damage Analysis of Reinforced Concrete Buildings, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.111, No.4, April, 1985.
- 5) 田嶋和樹, 他: RC 建物の被害調査-代表的な損傷状態から考察するいくつかの課題, 平成 28 年度日本大学理工学部 学術講演会予稿集, pp.7-8, 2016.12
- 6) Open System for Earthquake Engineering Simulation - Home Page, <http://opensees.berkeley.edu/>
- 7) 劉奕敏, 塩原等, 長江拓也, 松森泰造: 実大四層 RC 骨組の三次元振動台実験の地震応答解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.34, No.2, pp.85-90, 2012
- 8) 田嶋和樹, 他: 脆性部材の破壊が RC 造骨組の耐震性能に及ぼす影響, コンクリート工学年次論文集,

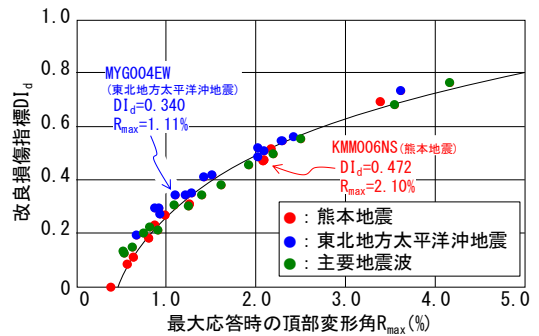


図-16 改良損傷指標(DI_d)—最大応答(R_{max})関係

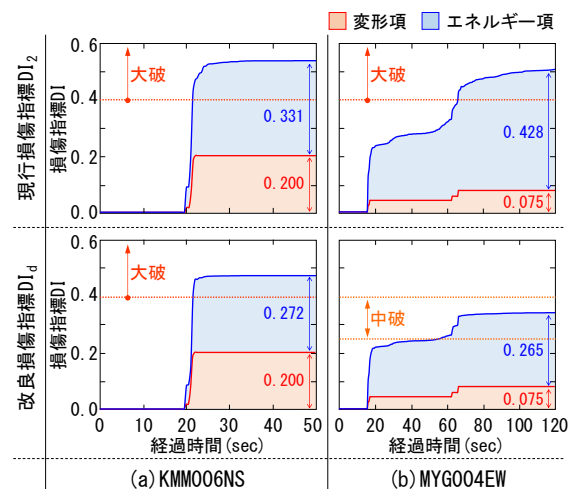


図-17 各損傷指標の内訳

- 9) 長沼一洋: 三軸圧縮下のコンクリートの応力~ひずみ関係, 日本建築学会構造系論文集, 第 474 号, pp.163-170, 1995.8
- 10) 出雲淳一ら: 面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル, コンクリート工学論文, No.87.9-1, pp.107-120, 1987.9
- 11) Naganuma, K., Yonezawa, K., Kurimoto, O. and Eto, H.: Simulation of nonlinear dynamic response of reinforced concrete scaled model using three-dimensional finite element method, 13th World Conference on Earthquake Engineering, Paper No.586, August., 2004.
- 12) 向井智久, 畑洋和, 野村設郎: 曲げ降伏する RC 部材の地震時損傷とエネルギー吸収量算定式の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第 617 号, pp.145-151, 2007.7
- 13) Mehanny, S.S.F. and Deierlein, G.G.: Modeling of assessment of seismic performance of composite frames with reinforced concrete columns and steel beams, Rap. No.135, The John A. Blume Earthquake Engineering Center, Stanford Univ., 2000.