

鉄筋コンクリート部材の外観状況における残存性能の推定に関する検討

The study on the residual performance in the appearance of reinforced concrete member

北武コンサルタント株式会社

北武コンサルタント株式会社

独立行政法人土木研究所寒地土木研究所

○正会員 佐々木 徹也

正会員 渡辺 忠朋

正会員 三田村 浩

1. はじめに

構造物が地震により被災した場合、一般には地震による構造物の損傷状況から残存性能を推定し、補修・補強の必要性などを判断しなければならない。

本研究では、既往の実験結果を基に被災後の損傷状況から残存性能を推定する検討を行った。

被災構造物の残存性能を推定する場合、被災後の損傷状況から構造物の最大応答履歴を推定し、それを基に残存性能を推定することが必要となる。

通常の鉄筋コンクリート柱部材が地震の影響を受けた場合の力学特性を破壊モード毎に模式的に図-1に示す。

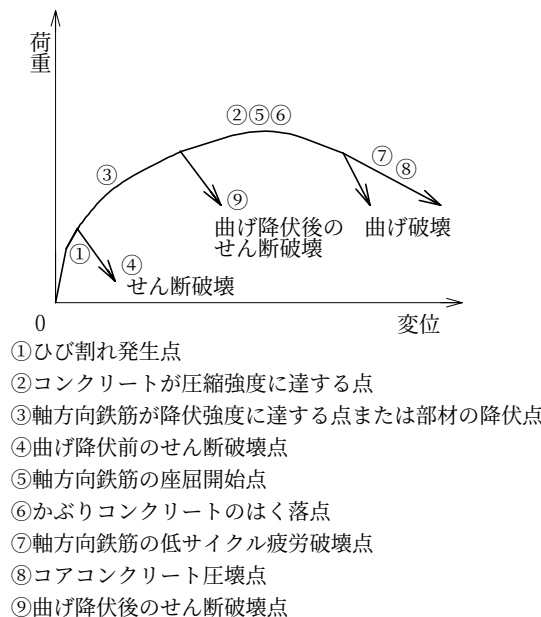


図-1 鉄筋コンクリート柱部材が地震の影響を受けた場合の力学特性¹⁾

構造物の力学特性と構造物の損傷状態は、密接に関係があることが分かる。これは、構造物の最大応答履歴状態に対応するものであるが、被災後は慣性力が零の状態であり、静的荷重試験に置き換えれば荷重を除荷した状態と等しいと考えられる。

そこで、最大荷重履歴ごとに荷重が除荷された状態の損傷状況の相関関係を把握できれば、最大荷重履歴を推定することが可能となる。

これらの相関関係を推定するためには、数値計算による方法と、荷重実験結果による方法が考えられる。しかし、数値計算方法を用いて直接損傷状況を評価することは現状では困難であるため、荷重実験結果を基に推定す

る方法を用いることとした。以下に、その概要を示す。

2. 実験概要^{2), 3)}

2.1 試験体諸元

試験体 2.0-N は、躯体高 2.0m、断面寸法 0.38×1.14m の長方形断面(辺長比 1:3)であり、引張主鉄筋比は $P_t=0.45\%$ 、横拘束筋の体積比は $\rho_s=0.2\%$ である。

実験時のコンクリートの平均圧縮強度は $f'_c=31.5\text{MPa}$ 、平均弾性係数は 3.18GPa 、鉄筋は SD345 材を用い、その平均降伏点強度は 389MPa であった。上部工反力相当として、 154kN を鉛直力として作用させた。図-2 に試験体の形状・配筋概要図を示す。

試験体 4.0-N は、道路橋で一般的に見られる壁式 RC 橋脚を想定し、実橋脚に極力近い規模のものを用いた。

試験体形状は、躯体高 4.0m、断面寸法 $0.80\times 2.40\text{m}$ の長方形断面(辺長比 1:3)であり、引張主鉄筋比は $P_t=0.38\%$ 、横拘束筋の体積比は $\rho_s=0.24\%$ である。図-3 に試験体の形状・配筋概要図を示す。

試験体に用いたコンクリートは、呼び強度 24MPa の普通コンクリートである。鉄筋は SD345 材を用いた。その平均降伏点強度は 390MPa であった。上部工反力相当として、 747.3kN を鉛直力として作用させた。

2.2 試験体の力学特性

各試験体の力学特性を表-1 に示す。いずれの試験体も曲げ破壊形態を有している。

2.3 荷重試験条件

交番荷重は、軸方向鉄筋の降伏ひずみを材料試験より得られた $1,890\mu$ と設定し、橋脚基部の鉄筋ひずみが降伏ひずみに達した時点の荷重点変位を降伏変位 δ_y 、その時点の荷重を降伏荷重 P_y とし、 $2\delta_y$ 、 $3\delta_y$ ・・・と変位振幅を漸増させて、各変位振幅毎に 3 回繰り返し荷重する方法とした。

終局変位は、各変位振幅の 1 回目荷重時における正負いずれかの荷重荷重が降伏荷重 P_y を下回った時点と定義している。

2.4 試験体損傷状況

2.0-N 試験体の損傷形態は、 $1\delta_y$ 荷重時に高さ方向に 100mm 程度の間隔で水平ひび割れが発生した。 $3\delta_y$ 荷重以降では柱基部のみに損傷が集中し、 $5\delta_y$ 荷重時には基部付近のかぶりコンクリートに部分的な剥離が見られた。その後、 $6\delta_y$ から $7\delta_y$ 荷重にかけて、かぶりコン

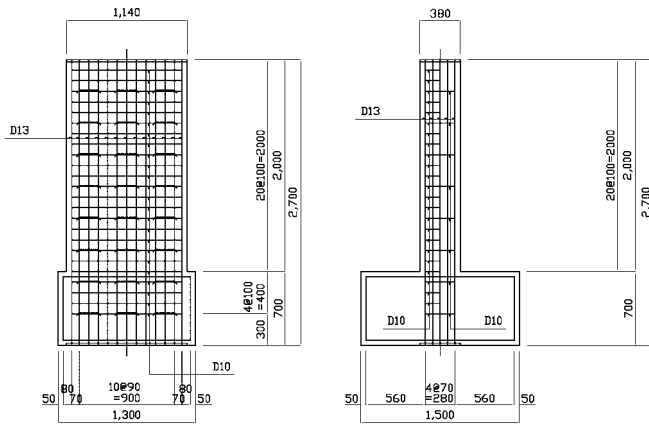


図-2 試験体(2.0-N)の形状・配筋概要図

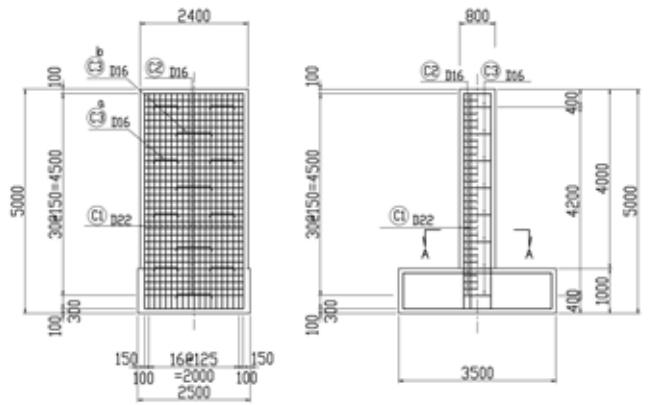


図-3 試験体(4.0-N)の形状・配筋概要図

表-1 試験体の力学特性

試験体	M_y (kNm)	M_u (kNm)	L_a (m)	V_{cd} (kN)	V_{sd} (kN)	V_{yd} (kN)	$V_{my} = M_y / L_a$	$V_{mu} = M_u / L_a$	V_{my} / V_{yd}	V_{mu} / V_{yd}
4.0-N	2194.1	2471.0	4.205	895.2	867.5	1762.7	521.8	587.6	0.296	0.333
2.0-N	238.3	277.1	2.205	254.4	318.5	572.9	108.1	125.7	0.189	0.219

記号について：
 M_y : 曲げ降伏耐力 M_u : 曲げ耐力 L_a : せん断スパン
 V_{cd} : せん断補強鋼材を用いない棒部材の設計せん断耐力
 V_{sd} : せん断補強鋼材により受け持たれる棒部材の設計せん断耐力
 V_{yd} : 棒部材の設計せん断耐力
 $V_{my} = M_y / L_a$
 $V_{mu} = M_u / L_a$

クリートが剥落し、 $8\delta_y$ 載荷時に主鉄筋が破断することで荷重が低下し、終局状態に至った。かぶりコンクリートの剥落は、基部から 200mm 程度の区間で生じている。

基準試験体である 4.0-N 試験体は、 $1\delta_y$ 載荷時に高さ方向に 200~300mm 程度の間隔で水平ひび割れが発生した。

その後、 $4\delta_y$ 載荷までは水平ひび割れが増加、進展し、 $5\delta_y$ 載荷時に斜めひび割れに移行した。

$6\delta_y$ 載荷時には圧縮側の基部においてかぶりコンクリ

ートの小片剥離が目立つようになり、 $7\delta_y$ 載荷時にはかぶりコンクリートが広範囲で膨らみ出した。

$8\delta_y$ 載荷時にはかぶりコンクリートが広範囲で剥落して急激に荷重が低下し、 $9\delta_y$ 載荷時に荷重が P_y を下回り終局に至った。なお、かぶりコンクリート剥落範囲は、基部から 800mm 程度の範囲であった。

4.0-N 試験体を例に、荷重変位曲線と損傷が顕著な変位ループの荷重 0 点での残留損傷状況を図-4 に示す。

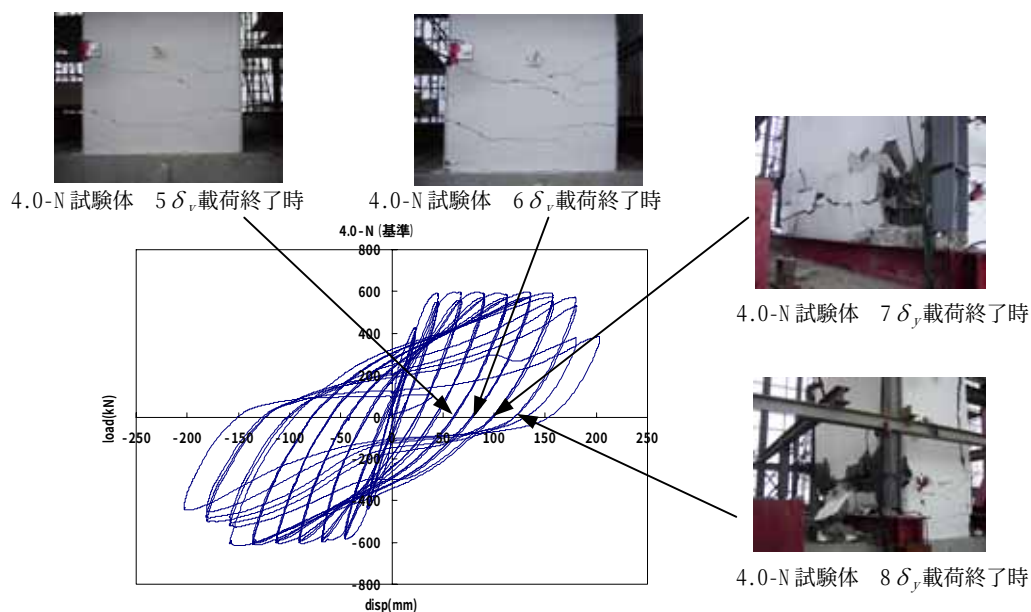


図-4 4.0-N 試験体における荷重履歴と損傷状態の関係（曲げモード）

3. 外観状況による残存性能の推定の考え方

通常の被災後の構造物調査では、外観の損傷状況を基本として調査が行われる。一般の外観調査において目視可能な損傷状態として、以下の損傷状態を指標として、最大応答履歴を推定してよいと考えられる。

- ・残留曲げひび割れの有無
- ・コンクリートの損傷の有無
- ・軸方向鉄筋の座屈の有無

前述した载荷試験時の荷重履歴と除荷時の目視可能な損傷状況に基づけば、表-2に示すような関係にある。

表-2 曲げ破壊形態を有するRC部材の
最大応答時損傷と残留損傷の関係

	力学現象	最大荷重時損傷	残留損傷
領域A	軸方向鉄筋降伏	曲げひび割れ (水平ひび割れ)	無損傷
領域B		曲げひび割れ (水平ひび割れ)	残留曲げひび割れ
領域C	コンクリート終局ひずみ	コンクリートの 軽微な損傷	かぶりコンクリートの 軽微な損傷
領域D		コンクリート 剥落	かぶりコンクリート 剥落
領域E		軸方向鉄筋の 座屈	軸方向鉄筋の 座屈

4. 残存性能推定に関する検討

4.1 変形性能の推定方法

外観の損傷状態から構造物の最大応答履歴の範囲を、前述の方法で概ね推定することが出来る。しかし、被災後の構造物の耐震性能を推定するためには、部材の応答履歴を考慮した残存性能を推定する必要がある。

その場合、部材の変形性能をあらかじめ精度良く推定することが必要となる。部材の変形性能を精度良く推定できれば、外観損傷から想定される最大応答履歴を考慮した損傷部材の残存性能を推定することが可能となる。

ここでは、部材性能の推定方法として、道路橋示方書⁴⁾の方法と土木学会耐震性能照査編⁵⁾の2つの方法を用いて検討を行うこととした。

4.2 残存性能の推定モデル

(a) 道路橋示方書の方法⁴⁾

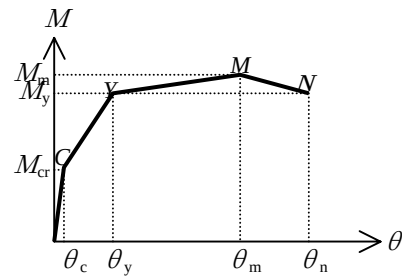
単柱式鉄筋コンクリート橋脚のひび割れ水平耐力 P_c 、降伏水平耐力 P_y および終局水平耐力 P_u ならびに降伏変位 δ_y および終局変位 δ_u は、【道路橋示方書・同解説V 2.2】に規定するタイプIおよびタイプIIの地震動それぞれに対して、【道路橋示方書・同解説V 10.3】により算出するものとする。

コンクリートの応力度—ひずみ曲線および終局ひずみは【道路橋示方書・同解説V 10.4】の規定による。

(b) 土木学会示方書の方法⁵⁾

曲げモーメント分布が直線的に変化する部材は、部材の非線形性を部材端部の曲げモーメントと部材角の関係により表す。ここで、部材角は部材の非線形性を部材端

部に集約した材端ばねの回転角を指す。この場合、曲げモーメントと部材角の関係は、図-5のようなテトラリニアモデルにより表す。



M_{cr} : 曲げひび割れ発生時の曲げモーメント

M_y : 降伏時の曲げモーメント

M_m : 最大曲げモーメント

θ_c : 曲げひび割れ発生時の部材角

θ_y : 降伏時の部材角

θ_m : M_m を維持できる最大の部材角

θ_n : M_y を維持できる最大の部材角

図-5 部材端部の曲げモーメントと部材角の関係

図-5 に示す各折れ点の曲げモーメントおよび部材角は、【土木学会;コンクリート標準示方書（耐震性能照査編）】により算定する。

(c) 推定結果

2つの方法による部材の変形性能の計算値と実験値との関係を図-6、図-7に示す。

道路橋示方書の方法は構造物の変形性能を過小評価する傾向であり、土木学会の方法は比較的精度良く推定できることが分かる。

これより、被災後のRC部材の残存性能は、土木学会のRC部材の変形性能算定手法を用いて算定することが可能と考えられる。

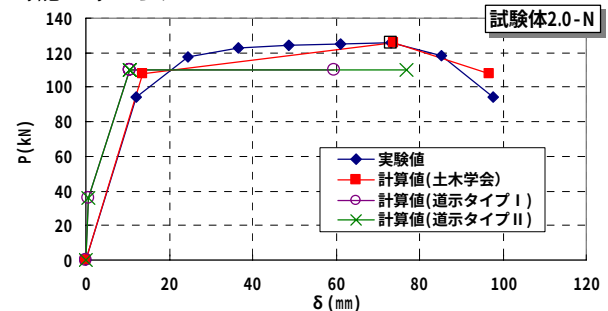


図-6 試験体2.0-N (D10-4組-100ctc)

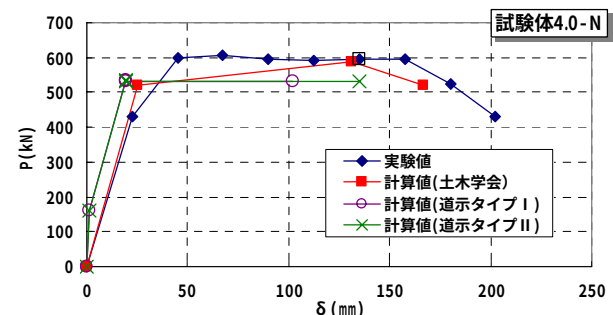


図-7 試験体4.0-N (D16-4組-150ctc)

4.3 残存性能の推定方法

4.2 (c) から土木学会の変形性能の推定方法が比較的精度がよいことが明らかになった。その方法から得られる骨格曲線と、3.の実験結果に基づいた外観状況による最大応答値の推定方法との組み合わせにより残存性能を推定することができると考えられる。推定に用いる部材モデルを表-3に示す。

(a) TYPE1

外観状況が残留ひび割れがない状態では、部材は曲げ降伏まで応答したと考え、残存性能は、初期載荷剛性を曲げ降伏時の再載荷剛性とした履歴特性を有する部材として評価する。(図-8(a)参照)

(b) TYPE2

残留曲げひび割れがある状態およびかぶりコンクリートに損傷があるが、軸方向鉄筋の座屈が発生していない状態では、部材は最大荷重保持点まで応答したと考え、残存性能は、初期載荷剛性を最大荷重保持点時の再載荷剛性とした履歴特性を有する部材として評価する。

(図-8(b)参照)

(c) TYPE3

コンクリートの顕著な損傷があり、軸方向鉄筋の座屈が発生している状態では、部材は降伏荷重保持点まで応答したと考え、残存性能は、降伏荷重保持点時の再載荷剛性とした履歴特性を有する部材として評価する。

(図-8(c)参照)

なお、履歴特性は武田モデルを用いる。また、再載荷時の剛性の算定方法を以下に示す。

$$K_d^+ K_0 \cdot \left| \frac{\delta_{\max}^+}{\delta_{y2}} \right|^{-\beta}$$

ここに、

- K_d : 戻り勾配 (第2折れ点を越えた場合)
- K_0 : 戻り勾配 (第2折れ点を越えない場合)
- $\delta_{\max}$: 最大変形
- δ_{y2} : 降伏変形

5. 結論

外観状況による残存性能の推定方法についての検討を行った。

その結果、一般の外観調査において目視可能な損傷状態を指標として、構造物の最大応答履歴の範囲を、概ね推定することが出来た。また、部材の変形性能は、土木学会の変形性能の推定方法が比較的精度がよいことが明らかになった。それを組み合わせることにより、外観損傷から想定される最大応答履歴を考慮した損傷部材の残存性能を推定することが可能になると考えられる。

参考文献

- 1) たとえば土木学会：コンクリート技術シリーズ 48 コンクリート構造物の耐震性能照査技術－現状と将来展望－I 応答値・限界値の算定技術 平成14年12月
- 2) 北海道開発土木研究所 構造研究室：橋梁構造物の補修補強に関する調査検討業務報告書、平成15年2
- 3) 北海道開発土木研究所 構造研究室：橋梁構造物の

補修補強に関する調査検討業務報告書、平成15年12月

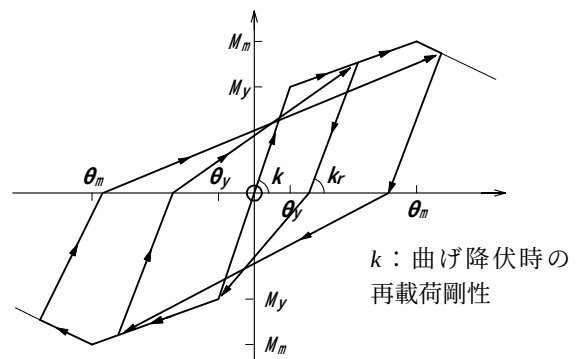
4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、平成14年3月

5) 土木学会：コンクリート標準示方書（耐震性能照査編）2002年制定

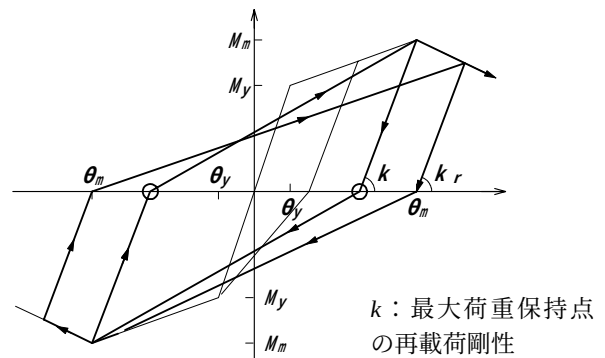
表-3 残留損傷状態と残存性能の推定モデル

外観状況	推定最大応答	残存性能推定モデル*1
残留ひび割れ無し	曲げ降伏	TYPE1
残留曲げひび割れ有り	最大荷重点	TYPE2
かぶりコンクリート損傷あり、座屈無し	最大荷重点	TYPE2
かぶりコンクリート損傷あり、座屈あり	降伏荷重保持点変位	TYPE3

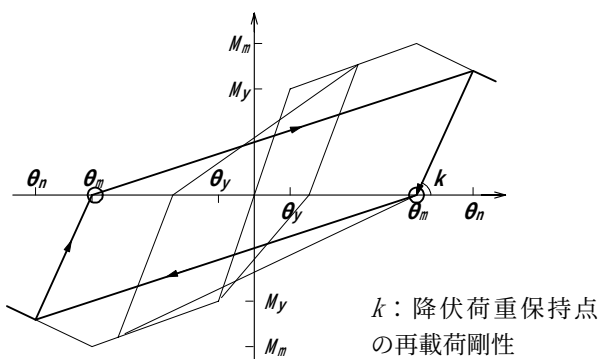
注)*1 図-8 参照



(a) TYPE 1



(b) TYPE 2



(c) TYPE 3

図-8 残存性能推定履歴モデル