

材料劣化を考慮した既設RC橋脚の耐震性能に関する一検討

名古屋和史¹・石川義樹¹・前原康夫²

¹正会員 工修 八千代エンジニアリング㈱ 総合事業本部 橋梁部（〒161-8575 東京都新宿区西落合2-18-12）

²正会員 八千代エンジニアリング㈱ 総合事業本部（〒161-8575 東京都新宿区西落合2-18-12）

1. はじめに

現在、既設橋梁における耐震性能の照査および耐震補強は、兵庫県南部地震直後の一様の補強法に一線を画して個々の橋梁の条件に応じて補強設計検討を行うことを原則としている¹⁾。また、古い時代の橋梁等では、配筋等が不明の場合も考えられるため原則として配筋状況を調査・推定した結果をもとに耐震性能の照査を実施する必要がある¹⁾。

しかしながら、対象とする既設橋梁において材料劣化が認められた場合でもそれを補修・補強設計における解析モデルに考慮する事例は少ない。これは、鉄筋コンクリート（RC）を構成する材料の劣化というマイクロな領域問題が構造物全体の挙動や性能を対象とするマクロな領域問題に及ぼす影響を明確に説明できない現状があることに帰着する。また、劣化の原因を特定することは、非常に困難であるうえ複合劣化に関する性状の把握も今後の課題となっている²⁾のが実状である。

材料劣化を考慮した構造性能に関する既往の研究は、丸山らの鉄筋が腐食したRC部材の曲げ性状³⁾の検討、加藤らの構造安全性能評価手法の開発⁴⁾⁵⁾、小林の耐震性に関する研究⁶⁾などがある。これらの研究は、材料レベルの劣化メカニズムに着目したものと構造物レベルの挙動に着目したものに大別されるが、構造物の耐震性能の問題は後者に属する。その多くは実験によりコンクリートと鉄筋の付着強度の低下現象や、鉄筋の断面欠損による耐荷力やじん性の低下現象を明らかにし、解析でその挙動を再現することにより解析手法の妥当性の確認や開発を行っているものがほとんどである。また、後者の問題に対する解析手法としては、有限要素法（FEM）を主体としており、材料非線形および幾何非線形およびびびり進展を考慮することによりその精度を高めている。

このような現状を踏まえて本研究では、耐震性能の一つの指標となる曲げ変形性能に着目し、材料劣化に関して後述する各種パラメータの変化がRC橋脚の耐震性能

に与える影響を解析的に明らかにした。また、解析モデルの概略化とその適用に関する一検討を行った。

2. 検討対象

本研究で対象としたRC橋脚は、図-1に示す道路橋の耐震設計に関する資料⁷⁾に記載されるP1橋脚とした。ただし、支承構造は既設橋梁で広く普及している鋼製支承を想定して固定とした。さらに材料劣化を想定する領域を一般的に塑性化する橋脚躯体部に限定することにより明確な差異を表現できるようにするため直接基礎に置換した。

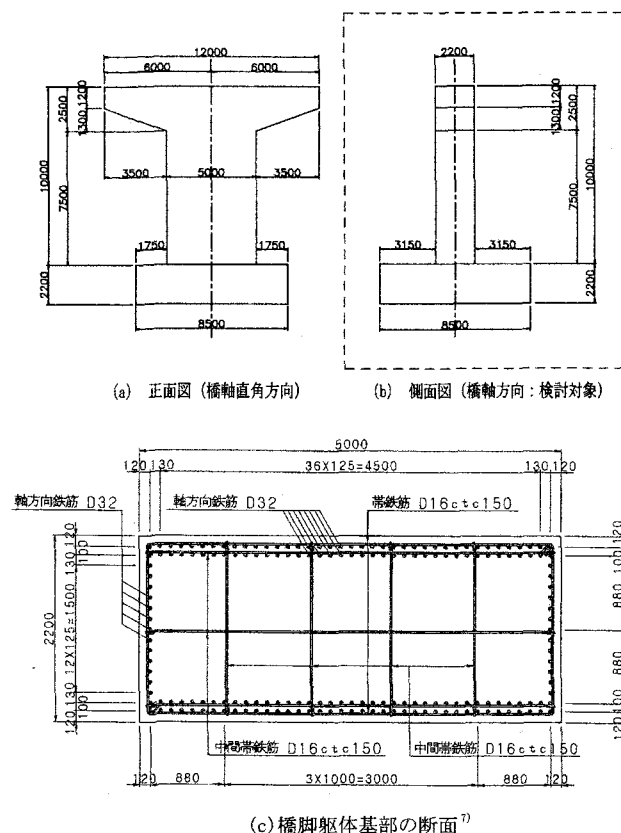


図-1 検討対象橋脚

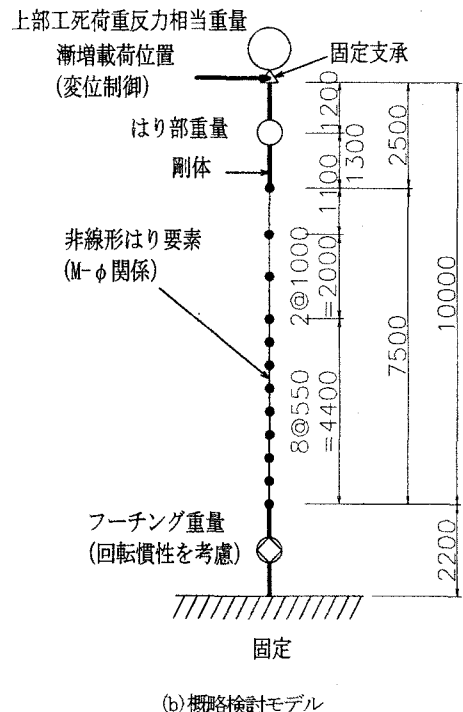
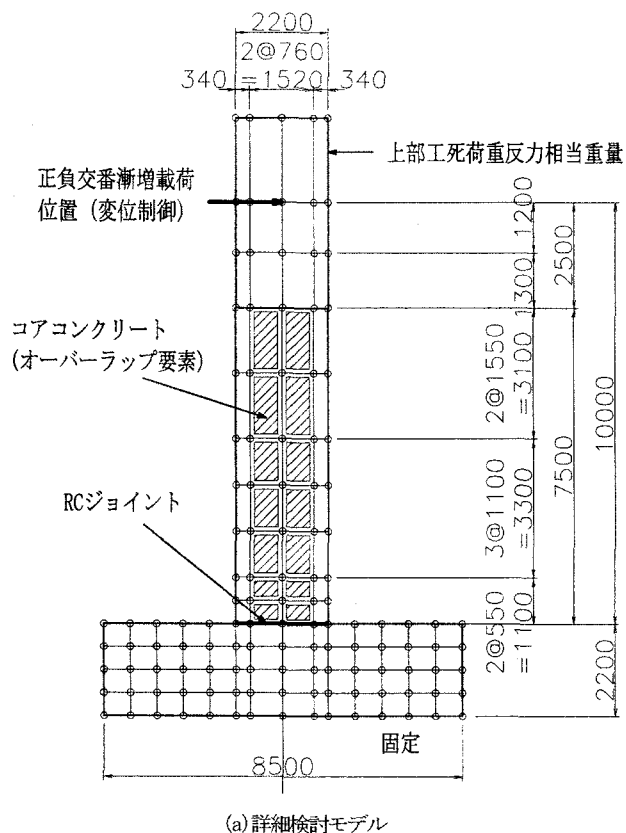


図-2 解析モデル図

モデル化した橋脚の健全な状態における基本諸元を以下に示す。なお、橋軸方向のみを検討対象とした。

- 上部工反力 : 6962.7kN (全死荷重時)
- 支承条件 : 固定
- 構造形式 : T型式RC橋脚
- 橋脚の高さ : 10.000m (躯体基部～天端)
- 躯体断面寸法 : 2.200m×5.000m (矩形断面)
- 基礎形式 : 直接基礎
- コンクリート : $\sigma_{ck} = 21\text{N/mm}^2$ (フーチング)
: $\sigma_{cc} = 22.247\text{N/mm}^2$ (橋脚)
- 鉄筋配置 : 主鉄筋 D32ctc125-2段 (SD295)
(橋軸方向) : 帯鉄筋 D16ctc150 (SD295)
- 塑性ヒンジ長 : 1.100m (道示V)

3. 検討方法

(1) 解析モデル

本研究では、図-2に示す(a)詳細検討モデルと(b)概略検討モデルの2つを用いた。

a) 詳細検討モデル

詳細検討モデルは、材料非線形および幾何非線形を考慮することが可能でかつ分散ひびわれモデルを導入した2次元非線形FEM解析プログラムWCOMD⁹⁾を用いた。これには、材料モデルとして荷重-除荷-再荷重の履歴を考慮した鉄筋コンクリートの構成則が導入されており、

Tension-Stiffening 効果やひびわれ発生に伴うひびわれ直交方向の圧縮剛性低下、ひびわれ面におけるせん断応力伝達も同時に考慮される。このTension-Stiffeningモデルにおける引張硬化/軟化係数 c は、鉄筋とコンクリートの付着状態に依存する係数であり、健全な状態の鉄筋コンクリートは0.4を適用してよい⁹⁾とされている。また、無筋状態に近いコアコンクリートの同係数 c は文献¹⁰⁾を参考にして2.0にした。

鉄筋コンクリート要素(以下、RC要素)は、主鉄筋とコンクリートの付着領域を考慮して要素サイズを決定し、次式により決定するそれぞれの有効鉄筋比を算定してモデル化した。また、道路橋示方書・同解説V耐震設計編(以下、道示V)¹¹⁾に示される塑性化を考慮する領域においては塑性化の進行が予め予想されることから橋脚躯体基部付近を細分化した。

$$P_e = A_s / (\sum A_c) \quad (1)$$

ここに、

- P_e : 有効鉄筋比
- A_s : 要素断面に配置される全鉄筋断面積
- A_c : 付着効果が作用するコンクリートの面積

側鉄筋とコアコンクリートはRC要素を適用するが、それぞれ鉄筋比が異なる。したがって、コアコンクリートをオーバーラップ要素として重ね合わせた。なお、橋脚

躯体のコンクリートの圧縮強度は、横拘束筋の拘束効果を考慮して次式により算定される最大圧縮強度 σ_{cc} とした。

$$\sigma_{cc} = \sigma_{ck} + 3.8\alpha\rho_s\sigma_{sy} \quad (2)$$

ここに、

σ_{ck} : コンクリートの設計基準強度 (N/mm²)

α : 断面補正係数(矩形断面=0.2)

ρ_s : 横拘束筋の体積比

σ_{sy} : 横拘束筋の降伏点 (N/mm²)

さらに橋脚基部とフーチングの境界面において RC ジョイント要素を配し、軸方向鉄筋の伸び出しを考慮した。なお、フーチング底面を固定とした。

b) 概略検討モデル

後者(b)のモデルは、一般的な RC 橋脚のモデル化として多用される材料非線形を考慮した非線形はり要素 (M- ϕ) でモデル化した。骨格曲線は、原点～ひびわれ～初降伏～終局のトリリニアモデルとした。

(2) 解析方法

解析方法は、以下に示すステップに則して変位制御による正負交番漸増増載荷による非線形静的解析を基本とした。

道示Vで定める水平力-水平変位の関係は、同一変位を複数回繰り返して漸増増載荷させる正負交番実験の包絡線を骨格曲線化したものである。それによればタイプII地震動を想定した繰り返し回数は1～3回であることから正負交番の同一強制変位の繰り返し回数は1回とした。なお、本報告では、タイプII地震動のみを対象とタイプI地震動に対しては割愛した。

強制変位として与える初降伏変位 δ_{y0} は、材料劣化に伴い変化するものと思われるが、健全な状態との結果比較を考慮して全てのケースに健全な状態のものを適用した。

ステップ1 : 自重を付与

ステップ2A : δ_{y0} 刻みで正負交番漸増増載荷 (FEM)

$$(\delta_{y0} = 30.8\text{mm})$$

ステップ2B : 変位制御による漸増増載荷 (M- ϕ)

(3) 比較検討方法

a) 詳細検討モデル

道示Vで定義される終局限界とは、軸方向圧縮鉄筋位置においてコンクリートのひずみが終局ひずみに達する時としており、水平力-水平変位の関係における水平耐力が低下し始める時の変位に概ね相当する。そこで本検討では、水平力が低下し始める変位まで δ_{y0} の等倍で増載し、水平力-水平変位の履歴曲線から得られる包絡線を用

いて材料劣化が曲げ変形性能に与える影響を考察した。

b) 概略検討モデル

詳細検討モデルの結果より代表ケースを選定し、水平力-水平変位の包絡線に着目して概略検討モデルの適用性について検討した。

(4) 材料劣化の想定

材料劣化の原因として一般的に塩害、中性化、ASR、凍害などによるものとされている。しかしながら、これらは複雑な相互関係を有する場合も多く個別の劣化因子に対してさえ構造物レベルのモデル化は研究途上である。

そこで、本検討では、何らかの要因で材料が劣化した場合に生じるであろう現象を RC の構成要素であるコンクリートと鉄筋の力学的特性の変化、およびそれらの界面の付着強度の変化として擬似的に想定¹²⁾する。ただし、これらの特性の変化が耐震性能に与える影響を明瞭にするため実際に起こりえない領域の材料強度となる可能性を予め弁解しておく必要がある。

a) 健全な状態

材料劣化を生じていない健全な状態をシリーズAとする。

b) コンクリートの劣化

コンクリートの劣化に伴い圧縮強度の低下およびそれに伴うせん断剛性の変化や付着強度の低下が考えられる。この付着強度の低下は、鉄筋とコンクリートの付着状態に依存する。本検討で使用する解析コードは、引張硬化/軟化係数 c により考慮することが可能であることからこれをパラメトリックに変化してその影響度を比較する。すなわち、この状態が悪い場合、コンクリートはひびわれ発生後の引張応力が急激に低下することから同係数は大きくなり無筋状態に近づくものと考えられる。なお、これらをシリーズBとする。

c) 鉄筋の劣化

鉄筋の劣化は、腐食生成物により全断面が膨張する一方で健全で有効な断面は減少する。ここでは、膨張による初期ひびわれを解析コード上考慮できないため無視し、単純に有効断面の減少を考慮した。このとき、有効断面の減少の組み合わせを主鉄筋のみ、帯鉄筋のみ、主鉄筋と帯鉄筋の両方とした。なお、本検討では腐食領域は一律に発錆するものと仮定し、局所的な発錆や孔食などによる断面欠損は想定外とした。これらをシリーズCとする。

d) 鉄筋およびコンクリートの劣化

上記の劣化の組み合わせの中で最も劣化の著しい状態を想定した。これらをシリーズDとする。

また、ケースD1の解析条件を図-2 (b) の概略検討モデルを用いて検討した。ただし、引張効果/軟化については無視するものとした。

表-1 解析ケース

シリーズ	想定した状態	解析モデル	ケース	コンクリート			鉄筋（主方向）		備考
				圧縮強度	引張硬化/軟化係数		有効鉄筋比		
					σ_{cc} (N/mm ²)	C		P _e	
				橋脚躯体	表層部	コア部	主鉄筋	帯鉄筋	
A	健全な状態	FEM	A1	22.247	0.4	2.0	3.64	0.16	
			M-φ	A2	22.247	-	-	3.64	0.16
B	コンクリートの劣化	FEM	B1	16.685	0.4	2.0	3.64	0.16	圧縮強度25%低下
			B2	11.124	0.4	2.0	3.64	0.16	圧縮強度50%低下
			B3	22.247	0.8	2.0	3.64	0.16	表層部付着強度25%低下
			B4	22.247	1.2	2.0	3.64	0.16	表層部付着強度50%低下
			B5	22.247	1.6	2.0	3.64	0.16	表層部付着強度75%低下
			B6	16.685	0.8	2.0	3.64	0.16	ケースB1, B3の組合せ
			B7	11.124	1.6	2.0	3.64	0.16	ケースB2, B5の組合せ
C	鉄筋の劣化	FEM	C1	22.247	0.4	2.0	2.73	0.16	主鉄筋の断面積25%欠損
			C2	22.247	0.4	2.0	1.82	0.16	主鉄筋の断面積50%欠損
			C3	22.247	0.4	2.0	3.64	0.12	帯鉄筋の断面積25%欠損
			C4	22.247	0.4	2.0	3.64	0.08	帯鉄筋の断面積50%欠損
			C5	22.247	0.4	2.0	2.73	0.12	ケースC1, C3の組合せ
			C6	22.247	0.4	2.0	1.82	0.08	ケースC2, C4の組合せ
D	鉄筋およびコンクリートの劣化	FEM	D1	11.124	1.6	2.0	1.82	0.08	ケースB7, C6の組合せ
			M-φ	D2	11.124	-	-	1.82	0.08

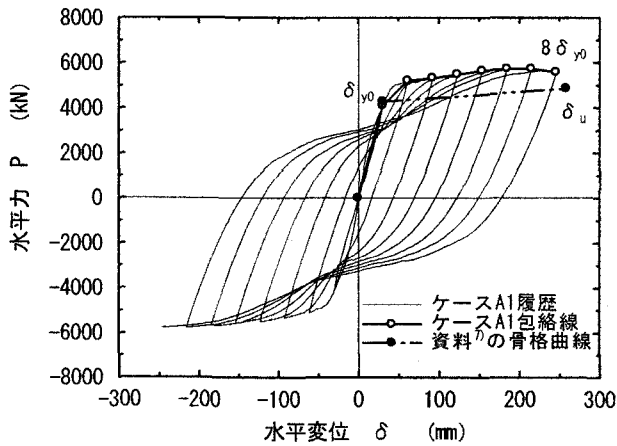


図-3 健全な状態の履歴と包絡線

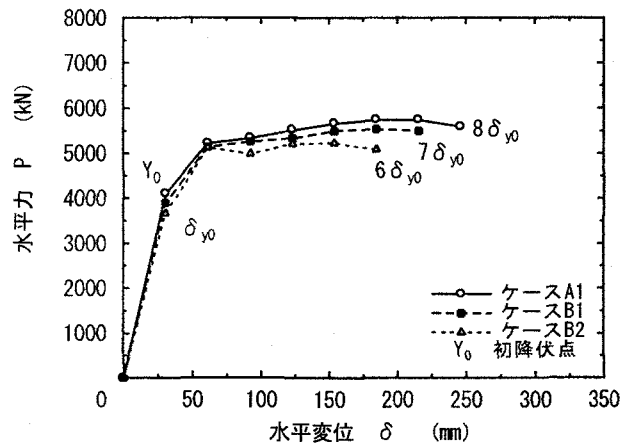


図-4 コンクリートの圧縮強度の低下による影響

(5) 解析ケース

表-1 に解析ケースを示す。前述した A~D のシリーズの各ケースについて着目した項目の設定値を併記した。

4. 検討結果と考察

(1) 健全な状態の曲げ変形性能

図-3 は、ケース A1 に対する水平力-水平変位の履歴曲線を示したものである。8δ_{y0} = 246.4mm 付近で水平力が低下し始めることが確認できる。また、δ_{y0} 刻みの各最大応答を結んだ包絡線を重ねて示した。

この 8δ_{y0} は、前述の資料⁷⁾に記載されるタイプⅡ地震動の終局変位 δ_u = 259mm とおおよそ近似する。

(2) コンクリートの劣化が与える耐震性能の変化

a) 圧縮強度の低下による影響

図-4 は、コンクリートの圧縮強度の低下が曲げ変形性能に与える影響を健全な状態と比較した包絡線である。

2δ_{y0} 以降の挙動に変化が出現し、圧縮強度の低下とともに最大水平耐力（＝地震時保有水平耐力）とじん性が低下することがわかる。ケース A1 のじん性を 100%とした場合、ケース B1 は 87.5%、ケース B2 は 75%のじん性となった。これは、圧縮強度の低下に伴い最大圧縮応力度の低下および終局ひずみの減少に起因していると考えられる。

また、初降伏点と原点を結んだ降伏時剛性に関して大きな変化は認められない。

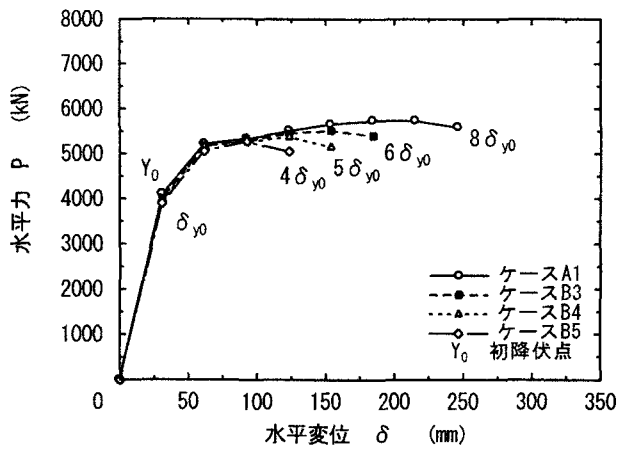


図-5 付着強度の低下による影響

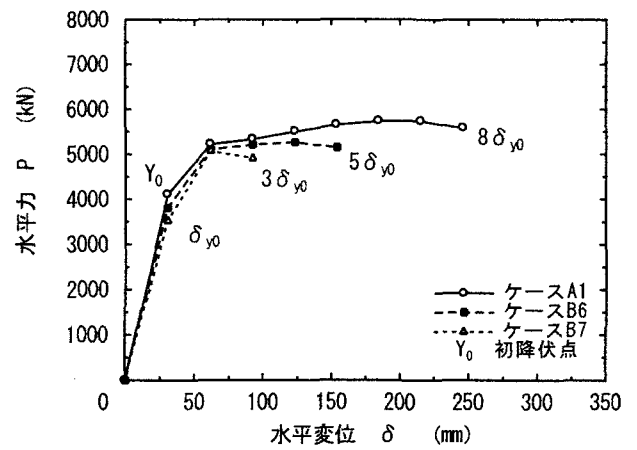


図-6 圧縮強度と付着強度の低下による影響

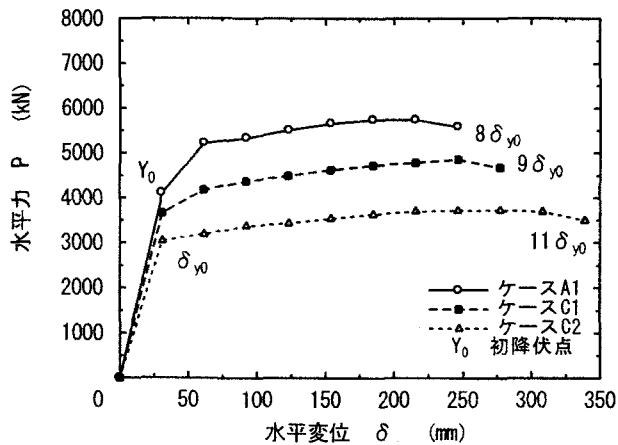


図-7 主鉄筋の断面欠損による影響

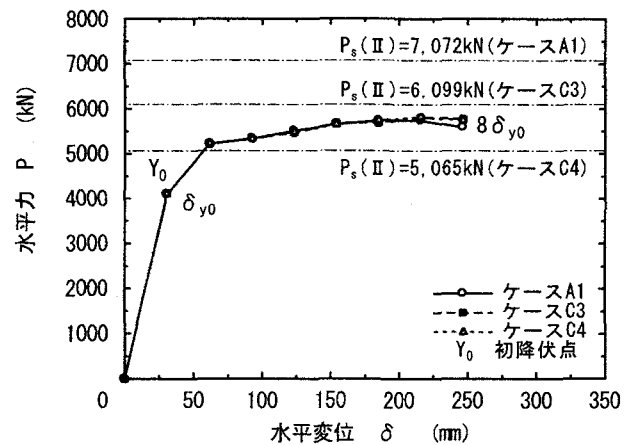


図-8 帯鉄筋の断面欠損による影響

b) 付着強度による影響

図-5は、付着強度の低下が曲げ変形性能に与える影響を健全な状態と比較した包絡線である。

この図より、圧縮強度の低下に比べて著しくじん性が低下することがわかる。ケースA1のじん性を100%とした場合、ケースB3は75%、ケースB4は62.5%、ケースB5に至っては50%のじん性となった。これは、ひびわれ発生後における急激な引張応力の低下によるものと考えられる。

c) 圧縮強度および付着強度の連成による影響

図-6は、圧縮強度および付着強度が連成して低下した場合を想定したものと健全な状態を比較した包絡線である。

この図より、図-4および図-5を合成した影響を確認できる。両者の低下の度合いにもよるが、俯瞰的にみれば図-6は、図-5と同様の傾向が強い。したがって、圧縮強度よりも付着強度の低下の影響が大きいといえる。

(3) 鉄筋の劣化が与える耐震性能の変化

a) 主鉄筋の断面欠損による影響

主鉄筋のみ断面欠損が生じた場合を想定し、断面欠損

表-2 主鉄筋の断面欠損率と最大水平耐力の関係

	記号	単位	ケース			備考
			A1	C1	C2	
断面欠損率		(%)	0	25	50	
最大水平耐力	P_{max}	(kN)	5,740	4,860	3,730	解析値
比率		(%)	100	85	65	

表-3 せん断耐力と破壊モード

	記号	単位	ケース			備考
			A1	C3	C4	
最大水平耐力	P_{max}	(kN)	5,740	5,810	5,820	解析値
せん断耐力	$P_s(II)$	(kN)	7,072	6,099	5,065	道示式
破壊モード			曲げ破壊 $P_{max} \leq P_s(II)$	曲げ破壊 $P_{max} \leq P_s(II)$	せん断破壊 $P_{max} > P_s(II)$	

率をそれぞれ一様に25%および50%として検討した。その結果を図-7に示す。また、表-2に最大水平耐力と健全な状態を100%とした各ケースの比率を示す。

これらの図表より、主鉄筋の断面欠損により大幅な最大水平耐力の低下を引き起こすことがわかる。例えば、断面欠損率50%のケースC2は、健全な状態であるケースA1の65%しか耐力を有していない。ただし、耐力の低減と反してじん性は増加する。これは、主鉄筋比と帯鉄筋比に関係し、ケースC1やC2では主鉄筋比が相対的に減少したことに起因する。

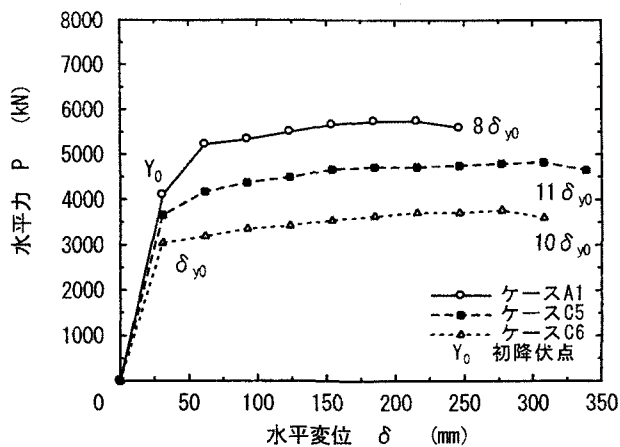


図-9 主鉄筋と帯鉄筋の断面欠損による影響

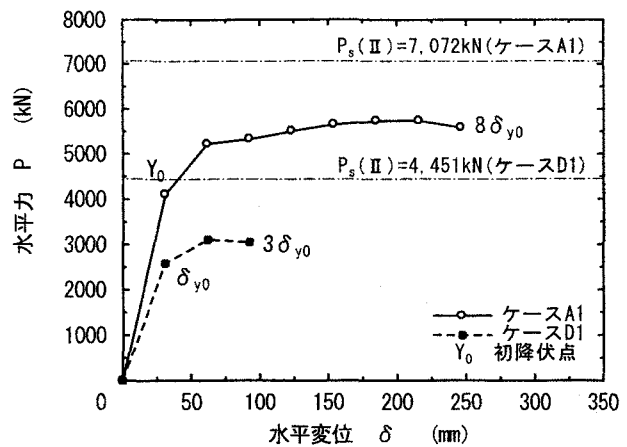


図-10 鉄筋とコンクリートの劣化による影響

b) 帯鉄筋の断面欠損による影響

帯鉄筋のみ断面欠損が生じた場合を想定し、主鉄筋の場合と同様の断面欠損率として検討した。その結果を図-8に示す。この図には、検討対象の各ケースにおける水平力-水平変位の関係とともに道示Vの算定式を用いたタイプII地震動におけるせん断耐力も併せて示した。また、表-3に各ケースの最大水平耐力と前述のせん断耐力の関係から破壊モードを示した。

これらの図表より、帯鉄筋の断面欠損による水平力-水平変位の関係に着目すると各ケースともほとんど相違が認められなかった。これは、本検討で用いた対象橋脚の帯鉄筋がD16であったため式(1)で示した有効鉄筋比が健全な状態から小さいことに起因する。すなわち断面欠損率を考慮してもコンクリートとの断面積比に吸収され、明確な差異が応答値に生じなかったものと考えられる。

次に表-3に示した破壊モードに着目した場合、せん断耐力の低下に伴い破壊モードが異なる結果となった。ここで、断面欠損率を50%としたケースC4は、曲げ変形性能は解析上健全な状態であるケースA1と同様の傾向を示す。しかしながら、最大水平耐力に達する以前にせん断耐力に達することになる。

以上のことから帯鉄筋の断面欠損は、設計で想定した破壊モードと異なる破壊モードに遷移する可能性があることがわかる。

c) 主鉄筋および帯鉄筋の断面欠損による影響

図-9に主鉄筋および帯鉄筋がともに断面欠損した場合の水平力-水平変位の関係を示す。

この図は、概ね図-7に類似していることから主鉄筋の断面欠損の影響が帯鉄筋のそれに比べ大きいことがわかる。また、帯鉄筋とともに主鉄筋の断面欠損が生じる場合、最大水平耐力が低下するため前述の破壊モードの遷移の可能性は小さくなる。ただし、これは両者の断面欠損率のバランスや断面欠損の箇所依存して変化する場合もある。

のと考えられる。

表-4 ケースA1とD1の主な比較

記号	単位	ケース		備考
		A1	D1	
断面欠損率	(%)	0	50	主鉄筋・帯鉄筋
最大水平耐力 P_{max}	(kN)	5,740	3,100	解析値
比率	(%)	100	54	
降伏時剛性 K_y	(kN/m)	1.334E+05	8.409E+04	解析値
比率	(%)	100	63	
終局相当変位 δ_u	(m)	8 δ_{y0}	3 δ_{y0}	解析値
比率	(%)	100	37.5	
せん断耐力 $P_s(II)$	(kN)	7,072	4,451	道示式
破壊モード		曲げ破壊 $P_{max} \leq P_s(II)$	曲げ破壊 $P_{max} \leq P_s(II)$	

(4) 鉄筋およびコンクリートの劣化が与える耐震性能の変化

主鉄筋および帯鉄筋の断面欠損、コンクリートの圧縮強度の低下、引張強度の低下を全て考慮した場合について検討した結果を図-10および表-4に示す。ここでは、健全な状態との差異を明確に示すことを目的としてシリーズBおよびシリーズCで設定した各パラメータの最悪のケースを複合してケースD1とした。

まず破壊モードは、ケースD1のような場合、想定した破壊モード(曲げ破壊)のままとなる。これは、せん断耐力の低下以上に主鉄筋の断面欠損による最大水平耐力の低下が大きいことによる。

このケースD1における最大水平耐力の低下は著しく、健全な状態を100%とした場合、これの54%の耐力しか有していない。表-2の結果を鑑みると主鉄筋による最大水平耐力の低下は65%であることから残りの11%はコンクリートの圧縮強度および付着強度の低下となる。

次にじん性の低下が顕著になる要因としては、前述のとおり付着強度の低下が考えられる。

降伏時剛性を比較すると健全な状態に比べ37%減となる。これは、固有周期に換算して約1.26倍長周期となる。すなわち、慣性力の低減に繋がることを意味する。

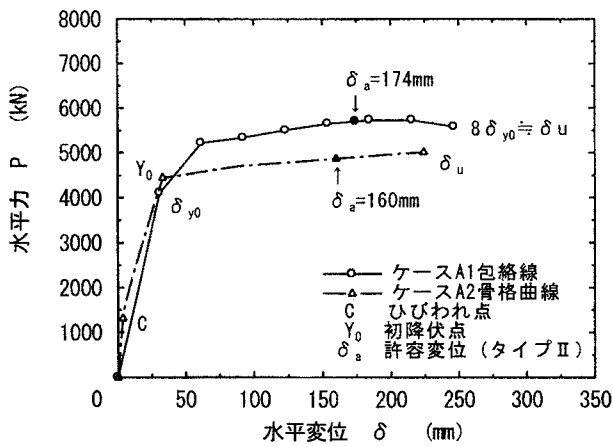


図-11 シリーズAのモデル化比較

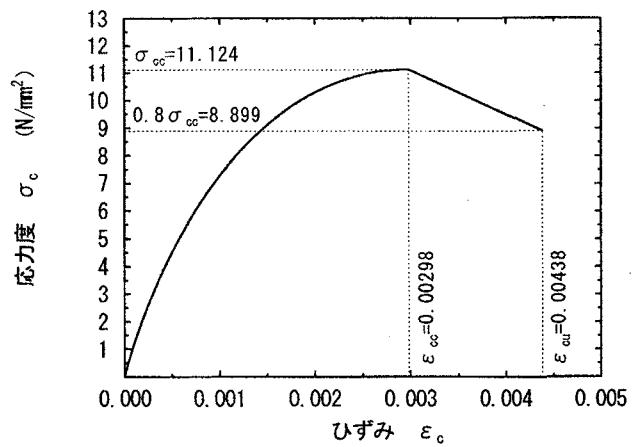


図-12 ケースD2の応力-ひずみの関係

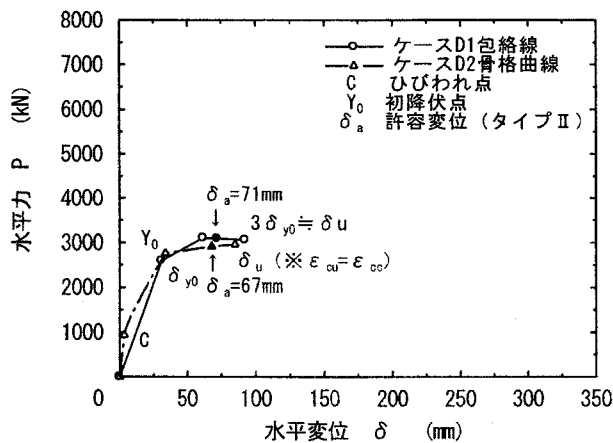


図-13 シリーズDのモデル化比較①

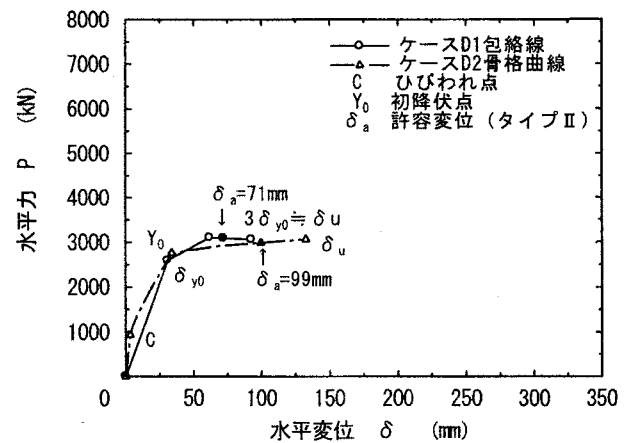


図-14 シリーズDのモデル化比較②

(5) 概略検討モデルの適用性に関する検討

a) 健全な状態

図-11は、ケースA1の包絡線とA2の骨格曲線について比較したものである。

初降伏変位は、概ね一致しているが、初降伏点～終局点の範囲に関しては詳細検討モデルであるFEMモデルの方が約15～17%大きいことがわかる。また、FEMモデルの $8\delta_{y0}$ を終局変位とした場合、概略検討モデルよりも大きくなる。

以上のことから、概略検討モデルにより耐震性能の照査を行うことにより設計上安全側の評価を与えることがわかる。

b) 材料劣化が生じた状態

シリーズDに対して概略検討モデルの適用性を検討した結果を図-12～図-14に示す。

ケースD1は、FEMによりタイプII地震動における終局変位相当の水平変位を算定したものである。これに対応する概略検討モデルの水平力-水平変位の関係は、図-14に示したのものになる。この図より水平力は概ね一致するが終局変位が異なることがわかる。このことから、概略検討モデルの場合、許容変位を過大に算定することにな

り耐震性能を過大評価する可能性が生じる。

ここで、仮に終局ひずみをタイプI地震動と同様に最大応力度のときのひずみ ϵ_{cc} とした場合の両モデルの比較を図-13に示す。この図より両モデルは全体的に近似することがわかる。ただし、材料劣化の度合いや種類、および劣化の箇所は千差万別であり必要に応じて個々に解析モデルの概略化を検討すべきと考える。

5. まとめ

本論文では、材料劣化に関して関連すると思われる各項目をパラメトリックに変化させRC橋脚の耐震性能の一つである曲げ変形性能に主眼をおいて解析的な検討を行った。さらに材料劣化の伴うRC橋脚に対する解析モデルの概略化について検討した。その結果、想定した解析条件では以下に示すような傾向を指摘できた。

- (1) コンクリートの劣化により圧縮強度の低下および付着強度の低下が生じる場合、付着強度の低下に伴うじん性の低下がみられる。
- (2) 帯鉄筋の断面欠損は、当初の設計で想定した破壊モードから遷移する可能性がある。例えば、初期に曲げ耐

力とせん断耐力が接近した曲げ破壊型のRC橋脚の場合、せん断破壊型に遷移する可能性がある。

(3)鉄筋およびコンクリートの両方が劣化した場合、主鉄筋の断面欠損により最大水平耐力が低下し、コンクリートの付着強度の低下によりじん性が低下する傾向がみられる。

最後に本研究では、概略検討モデルとして本検討では非線形はり要素モデルを用いたが、材料劣化の度合いや種類、および劣化の箇所は千差万別であり必要に応じて個々に解析モデルの概略化を検討すべきである。また、本検討の詳細検討モデルでは付着強度の低下に関するモデル化をTension-Stiffeningモデルにおける引張硬化/軟化係数で考慮したが、モデル化については、付着バネなどを考慮できるさらに詳細なFEMモデルの適用などについて研究を進めていく必要がある。

参考文献

- 1) 日本道路協会:既設道路橋の耐震補強に関する参考資料, 1997
- 2) 宮川豊章, 梶田佳寛, 野口貴文, 出村克宣, 守分敦郎, 濱田秀則:委員会報告「複合劣化コンクリート構造物の評価と維持管理計画研究委員会報告」, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 23, No. 1, pp. 1-10, 2001
- 3) 青山敏幸, 下村匠, 丸山久一:論文「塩害により鉄筋が腐食したRC部材の曲げ性状」, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 20, No. 2, pp. 883-888, 1998
- 4) 加藤佳孝, 山口昭伸, 牧剛史:材料劣化を考慮したコンクリート構造物の構造安全性能評価手法の開発, 新エネルギー・産業技術総合開発機構平成14年度産業技術研究助成事業研究成果報告書, 2003
- 5) 加藤佳孝, 山口昭伸, 牧剛史:材料劣化を考慮したコンクリート構造物の構造安全性能評価手法の開発, 新エネルギー・産業技術総合開発機構平成15年度産業技術研究助成事業研究成果報告書(最終版), 2004
- 6) 小林孝一:塩害により劣化したRC部材の耐震性に関する研究, コンクリート工学論文集, 第16巻第2号, pp. 49-59, 2005
- 7) 日本道路協会:道路橋の耐震設計に関する資料, pp. 2_1-2_139, 1997
- 8) 岡村甫, 前川宏一:鉄筋コンクリートの非線形解析と構成側, 技報堂出版, 1991
- 9) 土木学会:コンクリート構造物の耐震性能照査-検討課題と将来像-, コンクリート技術シリーズ34, 2000
- 10) Xuehui AN, Koichi MAEKAWA and Hajime OKAMURA: Numerical Simulation of Size Effect in Shear Strength of RC Beams, Journal of Materials, Concrete Structures and Pavements, JSCE, No. 564/V-35, pp. 297-316, 1997
- 11) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説V 耐震設計編, 2002
- 12) 土木学会:地震作用に対するコンクリート構造物の性能照査型設計-設計と照査の現状と将来展望-, コンクリート技術シリーズ67, 2005