

「鉄道標準（耐震設計）」に基づく R E E D工法橋脚の変形性能評価式の提案

今 西 秀 公^{*1} 原 夏 生山 田 尚 義^{*2}

要 旨

REED工法は、突起付きH形鋼とプレキャスト埋設形枠を組み合わせた鉄骨コンクリート(SC)複合構造であり、通常の鉄筋コンクリート(RC)構造に比べて「同等の耐力」と「同等以上の変形性能」を有することが示されている。その設計施工マニュアルでは、突起付きH形鋼の座屈抵抗性に起因する変形性能評価式を規定しているが、これは道路橋示方書に基づく設計を想定したものであり、鉄道構造物等設計標準（以下「鉄道標準」）での設計には対応していない。したがって鉄道構造物の設計ではREED工法の高い変形性能が評価できないという課題が残されていた。本報告は、このような課題を解消し、道路橋と同等の経済設計を可能にするため、鉄道標準に基づく変形性能の照査に対応した変形性能（材端部材角）の算定式を検討した結果とその効果を示したものである。

キーワード 橋梁 / 鉄道構造物 / REED工法 / 耐震 / 変形性能

目 次

- | | |
|-----------|--------|
| 1．はじめに | 4．評価結果 |
| 2．道路橋との違い | 5．まとめ |
| 3．今回の評価手法 | |

EVALUATION METHODS FOR DUCTILITY OF PIERS USING REED METHOD BASED ON THE DESIGN STANDARD FOR RAILWAY STRUCTURES IN JAPAN

Hidekimi IMANISHI Natsuo HARA
Takayoshi YAMADA

Synopsis:

It had been shown that the pier using REED METHOD has equal strength to, and more ductility than RC structure by our studies. The manual to design and construct piers using REED METHOD was released in 1998, but it is only based on The Specification for Highway Bridges in Japan. So, we can't estimate the ductility originated in the resistance to buckling of STRIP H-SHAPED for the railway's structures constructed by REED METHOD rightly. In order to remove the problem, we try to evaluate the ductility of the members using REED METHOD based on The Earthquake Resistant Design Standard for Railways in Japan and make formulae. This paper reports about studies to make formulae from the past experiments using scale models and its effects.

* 1 本店 土木本部 土木技術部 * 2 中部支店 名古屋星崎作業所

1. はじめに

REED 工法は、コンクリート橋脚の施工の合理化を目的として開発された橋脚の構造形式および施工方法である。その特徴は、橋脚の軸方向鉄筋をすべて突起付き H 形鋼（以下「ストライプ H」）に置換し、橋脚表面に本体の一部として使用可能な高耐久性埋設型枠（以下「SEED フォーム」）を配置した鉄骨コンクリート複合構造としたことにある。

REED 工法は、平成 7 年度に北海道縦貫自動車道大岸橋（日本道路公団）で初めて適用されて以来、平成 16 年 6 月現在で 30 件の適用事例（他社施工を含む）を数えるに至った。その内訳は、道路構造物が 23 件、鉄道構造物が 7 件（うち海外 2 件）となっている。

この間当社では、平成 10 年 12 月に「REED 工法設計施工マニュアル」を整備したが、その概要は、ストライプ H の座屈抵抗性に起因する REED 工法の優れた変形性能により、通常の鉄筋コンクリート（RC）構造に比べてして帯鉄筋量を低減できるとしたものである。ただし、同マニュアルは道路橋示方書（以下「道示」）に準拠して作成されており、鉄道構造物等設計標準（以下「鉄道標準」）には対応していない。従って、鉄道構造物ではストライプ H を単に等価な断面積を持つ鉄筋に置換した RC 構造として設計されているのが現状である。

しかしながら、今後進展が予想される整備新幹線計画や連続立体交差事業をはじめとする鉄道構造物への REED 工法適用に当たっては、道路橋と同様にその優れた変形性能を積極的に評価した設計手法の確立が求められる。本報告は、過去に実施した REED 工法の模型試験体による正負交番載荷試験を、鉄道標準に対応した形で整理し、変形性能を評価することを試みたものである。

2. 道路と鉄道の耐震設計手法の違い

2.1 道路橋示方書（耐震設計編）¹⁾

ここでは、本論に入る前に道路構造物と鉄道構造物の耐震設計手法の違いについて簡単に説明する。

平成 7 年の兵庫県南部地震を受けて、各種の設計基準はそれぞれ大幅な見直しが実施されたが、道路橋にあっては「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」（いわゆる復旧仕様）を経て、平成 8 年 4 月の道示改訂において正式に部材の塑性化を考慮した耐震設計法（地震時保有水平耐力法）が導入された。

道示の解析手法の特徴は、エネルギー一定則に基づく完全弾塑性モデルによって地震時保有水平耐力を算定することと、コンクリートの応力度 - ひずみ曲線の算出にあたって、帯鉄筋および中間帯鉄筋（「横拘束筋」と総称する）によるコアコンクリートの拘束効果を評価し、見かけ上コンクリート強度を割り増すことである（図-1 参照）。現行の REED 工法設計マニュアルでは、この横拘束筋比を見かけ上増加させる形で補正し、REED 工法の変形性能を評価することとしている²⁾。

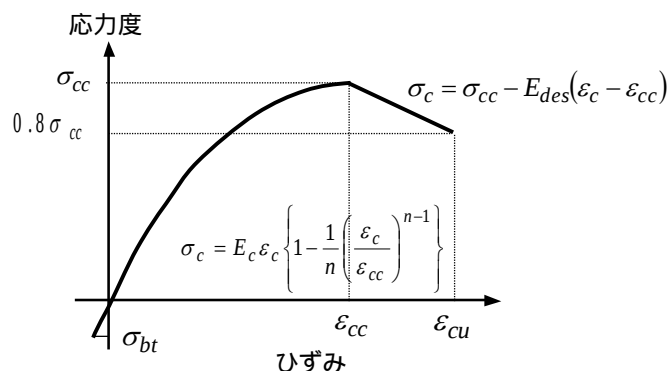


図-1 道示の $\sigma_c - \varepsilon_c$ 曲線

2.2 鉄道構造物等設計標準（耐震設計）³⁾

鉄道標準については、平成 10 年 12 月に初めて「耐震設計」が単独の基準として運輸省（当時）より通達された。この標準も部材の塑性化を考慮した非線形解析を基本としているが、道示が耐力ベースで変形性能を評価するのに対して、鉄筋の抜け出しを考慮した部材の変形角（もしくは曲率）に着目し、いわゆるポストピーク挙動も考慮したテトラリニアモデルとするのが大きな特徴である。

RC 部材のテトラリニアモデルは図-2 に示すとおりであるが、C・Y・M・N の各点は表-1 のとおり定義されている。

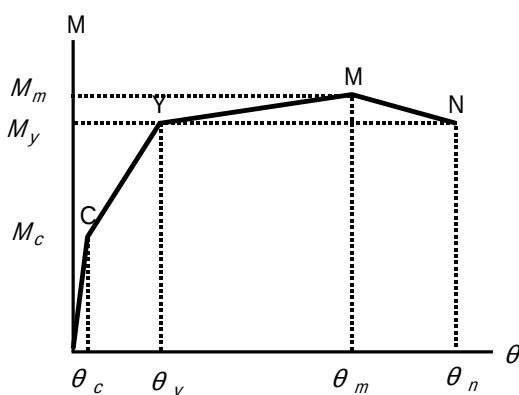


図-2 鉄道標準（耐震設計）のテトラリニアモデル

表-1 各点の定義

名称	状態
C 点	ひびわれ発生
Y 点	軸方向鉄筋降伏
M 点	最大荷重程度の維持
N 点	降伏荷重の維持

コンクリートの応力度 - ひずみ曲線には横拘束筋の効果は考慮されておらず、横拘束筋量の多寡はせん断補強筋比の形で図-2 に示す部材変形角 $\theta_y \cdot \theta_m \cdot \theta_n$ を求める際に反映される。すなわち、鉄道構造物の設計において REED 工法の変形性能を正しく評価するには、この

部材変形角を適切に算出する設計式を構築しなければならない。

3. 今回の評価手法

3.1 結果整理の方針

鉄道標準では、耐力と変形角は別個に算出される。このことから、既往の実験結果から「同等」であると判断された耐力の評価については実施しなくてよいので、ここでは「同等以上」であるとされている変形性能について検討する。具体的には、RC 構造（基準試験体）の実験結果との比較等によって、鉄道標準で定義される変形性能評価式を補正することで、REED 工法としての設計式を構築することとした。

なお、鉄道標準において定義される躯体の変位とは、鉄筋の抜け出しによる回転変位（C 点を除く）

塑性ヒンジ部の回転変位（C 点を除く）

塑性ヒンジ部以外の曲げ変形

を合算したものを指す。ここで REED 工法に関する既往の研究からは、鋼材が弾性範囲内にある場合の曲げ変形については通常の RC 方式でよいと考えられる²⁾ので、今回は および について検討を行うものとする。

3.2 評価対象

REED 工法に関する正負交番載荷試験は、平成 7 年以降、突起のない通常の H 形鋼を使用したものや比較対象

となる RC 基準試験体を含めて合計 18 体を実施した⁴⁾。

これらの実験は断面形状（中実 or 中空）、主鋼材比・帯鉄筋比・せん断スパン比などをパラメタとして数次にわたり実施されたものであるが、ここでは、その中から実際の橋脚において最も事例が多いと思われる曲げ破壊先行型・矩形中実断面（せん断スパン比 4.4）の D シリーズ（計 5 体）を選定した（表-2、表-3、図-3）。

表-2 D シリーズ試験体仕様一覧⁴⁾

供試体名称	主鋼材	主鋼材比	せん断補強筋比
D-RC-1	異形棒鋼	0.025	0.0048
D-SC-1	SH 弱軸	0.030	0.0048
D-SC-2	SH 強軸	0.030	0.0048
D-SC-3	NH 弱軸	0.037	0.0048
D-SC-4	NH 弱軸	0.037	0.0048

SH；ストライプ H，NH；通常の H 形鋼

表-3 D シリーズ実験結果一覧⁴⁾

供試体名称	主鋼材	最大耐力 (kN)	靱性率
D-RC-1	異形棒鋼	847	12
D-SC-1	SH 弱軸	729	19
D-SC-2	SH 強軸	782	19
D-SC-3	NH 弱軸	791	16 以上
D-SC-4	NH 弱軸	790	16

N 点が確認できず

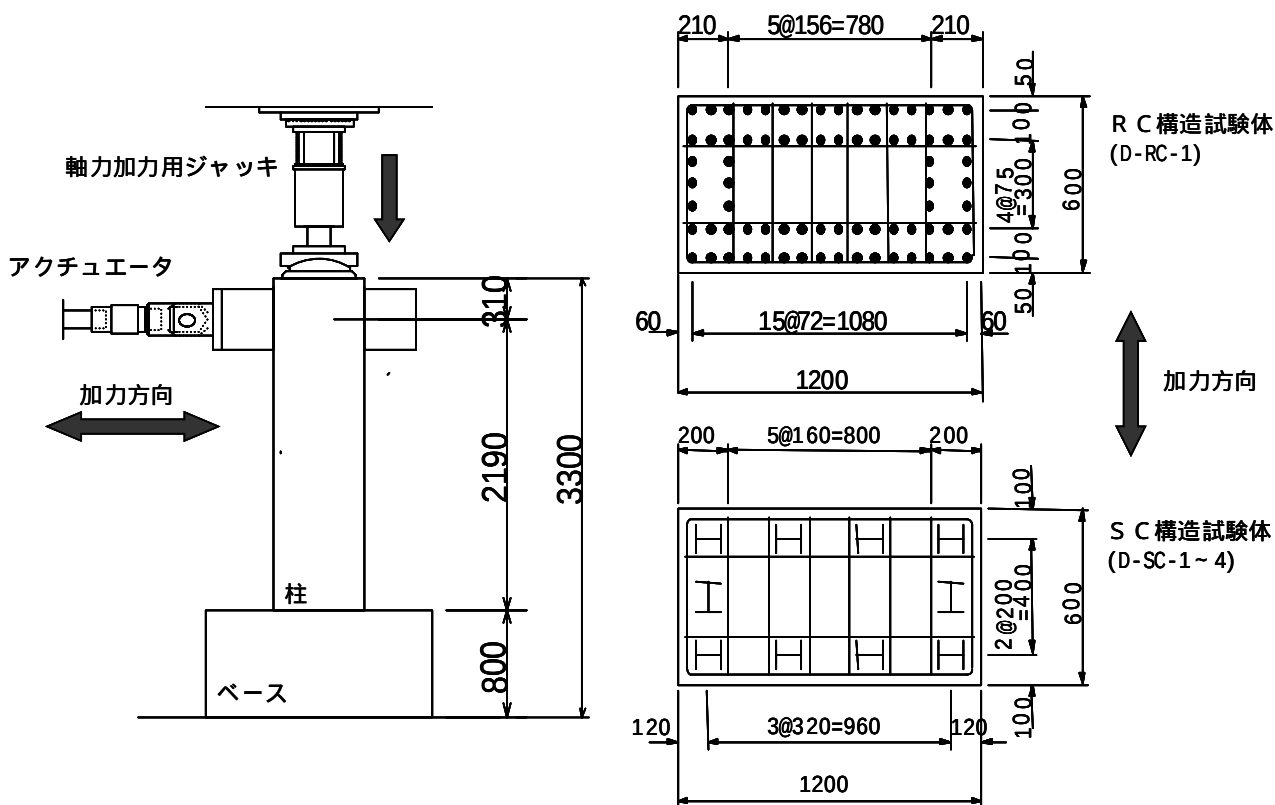


図-3 D シリーズ試験体

表-4 Dシリーズ試験体の変位・変形角

試験体 名称		δ / δ_y	基部		載 荷 点						
			抜け出し回転角		合計変位	曲げ変形			塑性ヒンジ回転角		抜け出し 回転変位
						合計	ヒンジ部	一般部			
			θ_1 (rad)	δ (mm)	δ_0 (mm)	δ_p (mm)	δ_b (mm)	θ_p (rad)	δ_1 (mm)		
実験値*1	鉄道標準	実験値	算出値*2	算出値*3	積分値	算出値*4	鉄道標準	算出値*5			
D-RC-1	C点	---	---		1.58	---					---
	Y点	1	0.0018	0.0010	13.01	9.05					3.96
	M点	7	0.0102	0.0024	91.05	68.65	64.78	3.87	0.0343	0.0232	22.39
	N点	12	0.0102	0.0024	156.78	134.38	131.41	2.97	0.0695	0.0421	22.39
D-SC-1	C点	---	---		1.52	---					---
	Y点	1	0.0013	0.0019	10.01	7.07					2.94
	M点	9	0.0060	0.0044	90.03	76.95	74.09	2.86	0.0392	0.0209	13.08
	N点	19	0.0060	0.0044	190.77	177.69	175.43	2.26	0.0928	0.0373	13.08
D-SC-2	C点	---	---		2.72	---					---
	Y点	1	0.0015	0.0019	9.98	6.68					3.29
	M点	9	0.0023	0.0044	90.05	85.10	82.24	2.86	0.0435	0.0209	4.95
	N点	19	0.0023	0.0044	190.00	185.05	182.79	2.26	0.0967	0.0373	4.95
D-SC-3	C点	---	---		2.68	---					---
	Y点	1	0.0016	0.0021	11.97	8.53					3.44
	M点	7	0.0049	0.0051	84.03	73.28	70.29	2.99	0.0372	0.0178	10.75
	N点	---	確 認 で き ず								
D-SC-4	C点	---	---		0.01	---					---
	Y点	1	0.0018	0.0018	12.01	8.13					3.87
	M点	4	0.0058	0.0038	48.04	35.25	32.26	2.99	0.0171	0.0139	12.79
	N点	16	0.0058	0.0038	192.00	179.21	176.81	2.40	0.0936	0.0404	12.79

*1 フーチング定着部の主鋼材ひずみから計算した抜け出し量をもとに算出。ただしN点については、M点の値がそのまま維持されるものとみなした

*2 $\delta - \delta_1$ で算出

*3 $\delta_0 - \delta_b$ で算出

*4 $\delta_p / (L - L_p / 2)$ で算出 L: せん断スパン, L_p : 塑性ヒンジ長 (鉄道標準に従い1.0Dとした)

*5 $\theta_1 \times L$ で算出

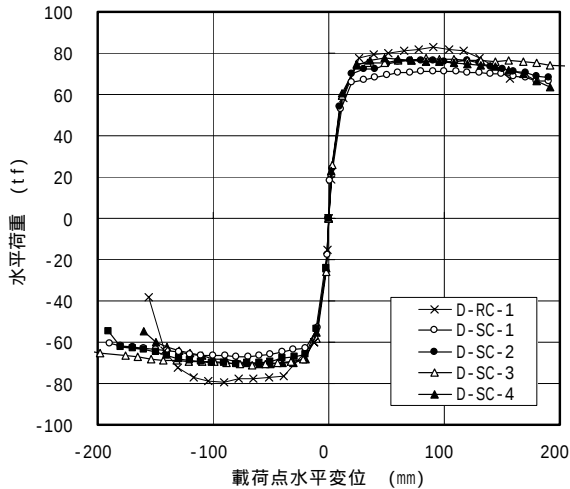


図-4 包絡線の比較

4. 評価結果

包絡線の比較を図-4、変形性能の評価結果についての一覧を表-4 に示す。なお、D-SC-4 試験体については載荷装置の能力の関係で N 点を確認できなかった。

4.1 C 点 (ひびわれ発生点)

C 点までの変位は弾性変形のみなので、3.1 で述べた通り、RC と SC で違いはないものと考えたこととした。

4.2 Y 点 (損傷レベル 1 限界点)

鉄道標準では、Y 点での鉄筋の抜け出し回転角 θ_{y1} を式[1]のとおり規定している。

$$\theta_{y1} = \Delta L_y / (d - x_y) \quad [1]$$

d : 有効高さ

x_y : 降伏時の圧縮縁から中立軸までの距離(mm)

ΔL_y : 部材接合部からの軸方向鉄筋の抜け出し量(mm)

$$\Delta L_y = 7.4\alpha \cdot \varepsilon_y (6 + 3500\varepsilon_y) \phi / (f'_{cd})^{2/3}$$

ε_y : 鉄筋の降伏ひずみ

ϕ : 引張鉄筋の直径(mm)

f'_{cd} : 部材接合部のコンクリート設計圧縮強度(N/mm²)

α : 鉄筋間隔の影響を表す係数

$$\alpha = 1 + 0.9e^{0.45(1-c_s/\phi)}$$

c_s : 引張鉄筋の中心間隔(mm)

表-4 における「基部抜け出し回転角 θ_1 」の Y 点の項で、「実験値」とはフーチング定着部の主鋼材ひずみ分布を高さ方向に積分した値を ΔL_y として式[1]から算出したもの、「鉄道標準」とは、H 形鋼の断面積に等価な円の直径を引張鉄筋の直径 ϕ として算出した ΔL_y から式[1]で求めたものである。両者を比較すると大差はないことから、鉄道標準をそのまま適用できるものと考えた。

4.3 M 点（損傷レベル 2 限界点）

(1) 抜け出し回転角

鉄道標準では M 点の抜け出し回転角 θ_{m1} は、式[2]の通り算出することとなっている。

$$\theta_{m1} = \{2.7k_{w1} \cdot p_w + 0.22\} \cdot (1 - N'/N'_b + 1) \cdot \theta_{y1} \quad [2]$$

p_w : 帯鉄筋比(%)

k_{w1} : 帯鉄筋強度を考慮する係数(SD345の場合1.0)

N'/N'_b : 釣り合い軸力比

N : 部材に作用する軸力

N' : 釣り合い軸力

ここで、Y 点と同様に抜け出し量 ΔL_y をフーチング定着部の主鋼材ひずみ測定値の積分によって求め、式[1]と同様に中立軸比から算出した場合の実験結果と比較（表-4 の θ_1 における M 点の項を参照）すると、RC 試験体では計算値に対する実験値の比が 4.26 であるのに対し、SC 試験体は 0.86 ~ 1.53（平均 1.09）であった。実験値は降伏後のひずみデータから算出したためかなりばらつきがあるが、SC 試験体は平均値がほぼ計算値に近い値を示しており、式[2]をそのまま用いるものとした。

(2) 塑性ヒンジ部回転角

鉄道標準による塑性ヒンジ部の回転角 θ_{pm} については式[3]の通りである。

$$\theta_{pm} = (0.021k_{w0} \cdot p_w + 0.013) / (0.79p_t + 0.153) \quad [3]$$

p_w : 帯鉄筋比(%)

p_t : 引張鉄筋比(%)

k_{w0} : 帯鉄筋強度を考慮する係数(SD345の場合1.0)

ここで、 θ_{pm} の実験値（表-4 の塑性ヒンジ回転角 θ_m における M 点の項を参照）を式[3]の分子で除したものを X、式[3]の分母だけで計算した値を Z とすると表-5 のようになる。図-5 に示すとおり、X の値はいずれも Z を上回っている（すなわち θ_{pm} は計算値 < 実験値）が、Z に対する X の比率は概ね SC 試験体のほうが RC 試験体よりも大きくなる傾向がみられる。このことは、SC は RC よりも θ_{pm} が大きくなることを意味する。

よって、式[3]を適切に修正することとなるが、道示に基づく REED 工法の設計では、道示の $\sigma_c - \varepsilon_c$ 曲線（図-1 参照）を補正する係数 γ は、式[4]および[5]の通り、常に横拘束筋比 ρ_s に乗じる形となっている²⁾。

$$\sigma_{cc} = \sigma_{ck} + 3.8\alpha\gamma\rho_s\sigma_{sy} \quad [4]$$

$$\varepsilon_{cc} = 0.002 + 0.033\beta\gamma \frac{\rho_s\sigma_{sy}}{\sigma_{ck}} \quad [5]$$

σ_{ck} : コンクリートの設計基準強度(N/mm²)

σ_{sy} : 横拘束筋の降伏強度(N/mm²)

α, β : 断面補正係数

γ : SC構造の補正係数

$$\gamma = 1.5 + 1/(500\rho_s) \leq 2.0$$

ρ_s : 横拘束筋比

$$\rho_s = \frac{4A_h}{s \cdot d}$$

A_h : 横拘束筋の断面積(mm²)

s : 横拘束筋の間隔(mm)

d : 横拘束筋の有効長(mm)

ここでは、これにあわせて式[3]を以下のとおり補正することとした。

$$\theta_{pm} = (0.021k_{w0} \cdot Y \cdot p_w + 0.013) / (0.79p_t + 0.153) \quad [6]$$

p_w : 帯鉄筋比(%)

p_t : 引張鉄筋比(%)

k_{w0} : 帯鉄筋強度を考慮する係数(SD345の場合1.0)

γ : SC構造による補正係数

ここで θ_{pm} の実験値を、 $\gamma = 1.5$ として求めた式[6]の分子で除したものを Y とすると、表-5 に示すように Z よりも大きな値となっている。すなわち、 $\gamma = 1.5$ とした式[6]は SC 構造の塑性ヒンジ部の回転角 θ_{pm} を安全側に表現できていることを示している。

表-5 塑性ヒンジ部回転角の検討

	p_t (%)	X	Y	Z	X/Z
D-RC-1	1.06	1.485	---	1.01	1.47
D-SC-1	1.20	1.699	1.394	0.91	1.87
D-SC-2	1.20	1.885	1.547	0.91	2.08
D-SC-3	1.44	1.611	1.322	0.77	2.08
D-SC-4	1.44	0.992	0.884	0.77	1.28

$$X = \theta_{pmexp} / (0.021p_w + 0.013)$$

θ_{pmexp} : 実験値

$$Y = \theta_{pmexp} / (1.5 \cdot 0.021p_w + 0.013)$$

$$Z = 1 / (0.79p_t + 0.153)$$

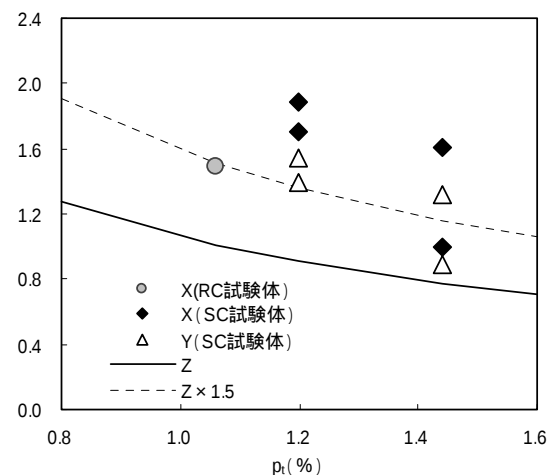


図-5 塑性ヒンジ部回転角の検討

4.4 N点（損傷レベル3限界点）

(1) 抜け出し回転角

瀧口ら⁵⁾によると、M点以降の鉄筋抜け出しによる回転変位は頭打ちもしくは減少するとされ、鉄道標準ではN点の抜け出し回転角 θ_{n1} は θ_{m1} に等しいとしている。

ここで、フーチング定着部の鋼材ひずみ分布から抜け出し量を求めた今回の実験結果（図-6）によると、SC試験体については同様の傾向があったので、そのまま適用できるものと考えたこととした。

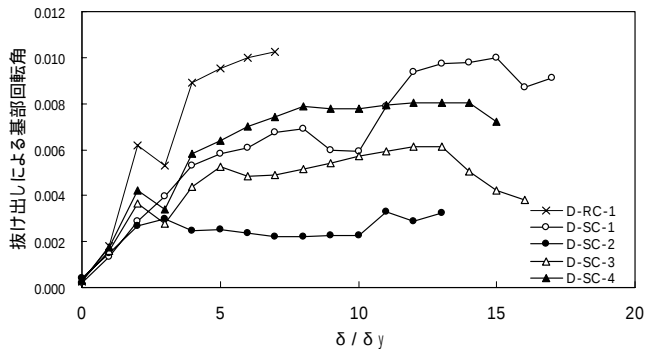


図-6 抜け出し回転角の推移

(2) 塑性ヒンジ部回転角

塑性ヒンジ部の回転角 θ_{pn} については式[7]～[9]の通り計算される。

$$\theta_{pn} = \theta_{pm} + \Delta\theta_p \quad [7]$$

$$\Delta\theta_p = K_p (M_y - M_m) \quad [8]$$

$$K_p = -0.1/M_m \quad [9]$$

K_p が大きければM点からN点への伸びが大きくなるが、ここで $-K_p/M_m$ について整理すると、式[9]では0.1であるのに対し、RC試験体では0.117、SC試験体では0.179～0.354となっている（表-6）。

表-6 塑性ヒンジ部回転角の検討

	θ_p		$-K_p/M_m$ (規定値0.1)	
	計算値	実験値	実験値	実験値/規定値
D-RC-1	0.019	0.035	0.117	1.168
D-SC-1	0.016	0.054	0.208	2.077
D-SC-2	0.016	0.053	0.179	1.794
D-SC-3	N点が確認できず			
D-SC-4	0.026	0.076	0.354	3.539

$-K_p/M_m$ について、SC試験体は最小でもRC試験体の1.5倍あり、図-4をみてもN点の変位がRCよりも相当大きいことから判断し、REED工法では式[9]を以下のとおり修正することとした。

$$K_p = -0.15/M_m \quad [10]$$

式[6]および[10]によって REED 工法特有の変形性能

を評価した場合、RC方式（従来の鉄道標準を適用）での評価および実験値との比較を図-7に示す。これによると、今回提案の評価式は、REED工法の変形性能をより正しく評価しているといえる。

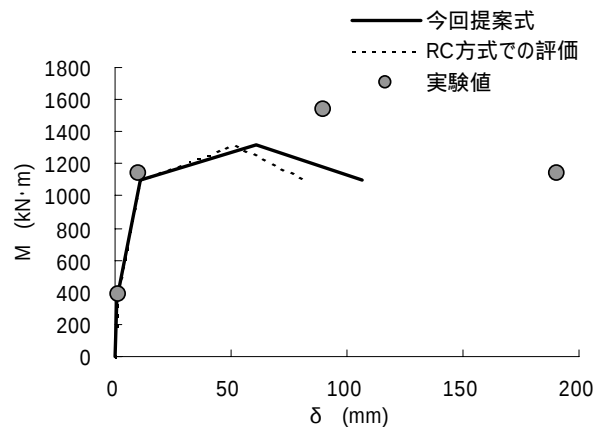


図-7 提案式と実験値（D-SC-1試験体）

4.6 提案式による効果

レベル2地震時の要求性能が損傷レベル2以内であるならば、地震時の応答はM点までとしなければならないが、式[6]によれば、M点で同一の変形性能を得るための帯鉄筋量は、REED工法橋脚はRC橋脚に比べて $1/\gamma$ であり、 $\gamma = 1.5$ とすると帯鉄筋量は2/3でよいことになる。

ここで、RC橋脚の帯鉄筋量を 50kg/m^3 、鉄筋組立の材工単価が12万円/tであるとすると、提案式を用いた場合には、従来のRC方式の設計に比べて 2000円/m^3 のコストを低減しうる。

5. まとめ

以上の検討により、鉄道構造物でも道路橋と同様に、REED工法の優れた変形性能を評価した経済設計が可能であるとの見通しが得られた。今後はデータ数を増やすとともに損傷レベル3を許容する試設計（静的・動的解析）等を実施することで、提案式の精度を高めていくこととしたい。

参考文献

- 1) 道路橋示方書・同解説 耐震設計編，（社）日本道路協会，2003.
- 2) REED工法設計・施工マニュアル（案），前田建設工業（株），1998.
- 3) 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，（財）鉄道総合技術研究所，1999.
- 4) 原，小原，大久保，河野，伊藤：REED工法で構築した橋脚の耐震性能に関する実験的検討，前田建設技術研究所報，VOL.39，pp17-24，1998.
- 5) 瀧口，渡邊，佐藤：RC部材の変形性能の評価，鉄道総研報告，vol.13，No.4，pp9-14，1999.