

論文 鉄骨コンクリート複合構造橋脚の耐震設計に関する実験的検討

原夏生^{*1}・伊藤始^{*2}・小原孝之^{*2}・河野一徳^{*3}

要旨：鉄骨コンクリート複合構造橋脚は、主鋼材に突起付きH形鋼を使用し、型枠として鋼繊維補強プレキャスト型枠を使用することで、施工の合理化と耐震性の向上を図ることを意図として、開発された構造形式および工法である。本構造形式の合理的な耐震設計法を提案することを目的として、橋脚モデル試験体の交番載荷実験結果を用いて靱性能の検討を行った。その結果、通常の鉄筋コンクリート構造に比べ、靱性能が優れていることが確認された。さらに、本構造形式の特徴に合わせた道路橋示方書における保有水平耐力の照査手法の修正を提案した。

キーワード：鉄骨コンクリート複合構造、橋脚、耐震設計、靱性

1. はじめに

鉄骨コンクリート複合構造（以下 SC 構造と呼ぶ）橋脚は、主鋼材に突起付きH形鋼を使用し、型枠として鋼繊維補強プレキャスト型枠（以下 PCa 型枠と呼ぶ）を使用することで、施工の合理化と耐震性の向上を図ることを意図として、開発された構造形式および工法である¹⁾。著者らのこれまでの研究により、SC 構造は断面内の平面保持が成立し、鉄骨を線材に置き換えた通常の鉄筋コンクリート構造（以下 RC 構造と呼ぶ）としての設計が可能であること²⁾、ならびに、RC 構造に比べ、交番荷重下における塑性変形能力（靱性）が優れていること³⁾が確認されている。本研究では、これまでに実施された橋脚モデル試験体の交番載荷実験結果に基づき、SC 構造の靱性評価方法を検討する。

2. 実験概要

2.1 試験体

本研究で用いた実験¹⁾³⁾⁴⁾は、SC 構造および比較用の RC 構造による柱試験体の交番載荷実験である。表-1 および図-2～図-5 に主な試験体諸元を示す。実験は以下に示す4つのシ

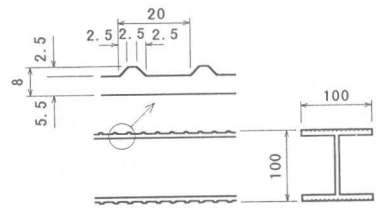


図-1 実験で使用した突起付きH形鋼

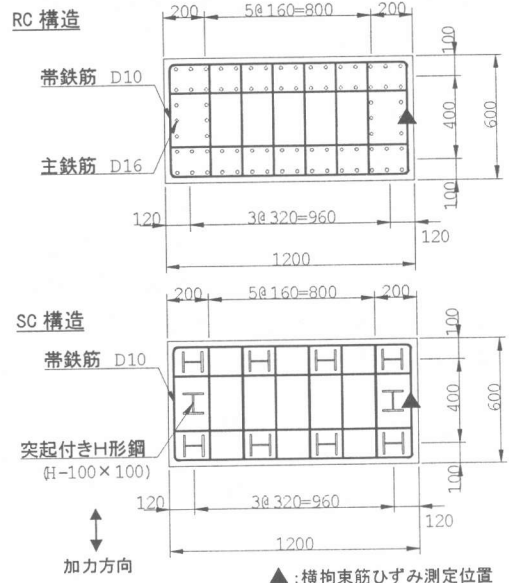


図-2 Dシリーズ試験体断面図

*1 前田建設工業（株）技術本部技術研究所主任 工修（正会員）
 *2 前田建設工業（株）技術本部技術研究所研究員 工修（正会員）
 *3 前田建設工業（株）技術本部技術研究所課長代理 工修（正会員）

リーズに分けて実施している。

D シリーズ : D シリーズは、矩形充実断面であり、比較的大きなせん断スパン比 (4.4) を有し、せん断余裕度が大きな (一体は 1.5, 他は 2.5) 試験体である。

S, SH シリーズ : 本シリーズは、矩形充実 (S) および矩形中空 (SH) 断面であり、せん断スパン比が小さく (2.4), せん断余裕度が小さい (1.2~1.5) 試験体である。

CH シリーズ : 円形中空断面であり、せん断スパン比 3.0, せん断余裕度 1.3 である。

RH シリーズ : 矩形中空断面であり、せん断スパン比 3.1 あり、SC 構造試験体においては、横拘束筋比を RC 構造試験体の 1/3 と小さくしている。

2.2 載荷方法

いずれのシリーズも交番載荷であり、主鋼材降伏時変位の整数倍の変位を順次載荷している。同一変位振幅での繰返し回数は D シリーズを 1 回, その他のシリーズを 3 回としている。終局の判定は、荷重が主鋼材降伏時荷重を下回った時点としている。

3. 実験結果

3.1 実験結果一覧

表-2 に実験結果の一覧を示す。また、図-6 に部材靱性率とせん断余裕度の関係を示す。図中の実線は次式に示す鉄道構造物設計標準・同解説⁹⁾ (以下、鉄道標準と呼ぶ) による部材靱性率算定式による計算値である (図-6 にお

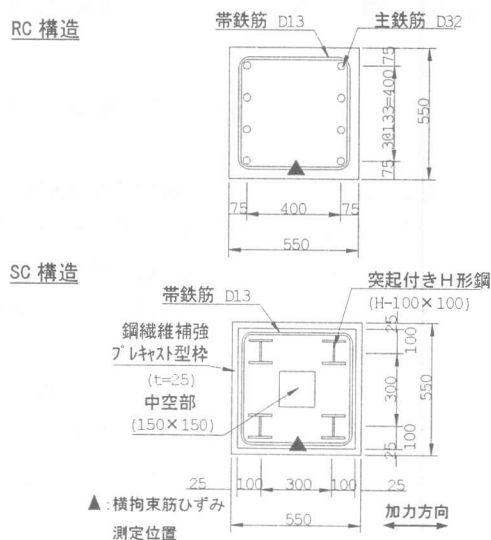


図-3 S, SH シリーズ試験体断面図

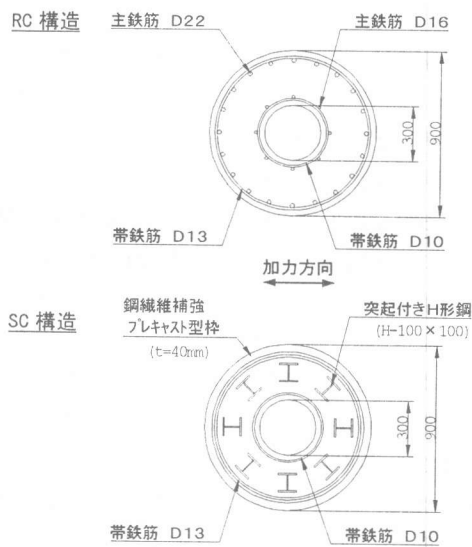


図-4 CH シリーズ試験体断面図

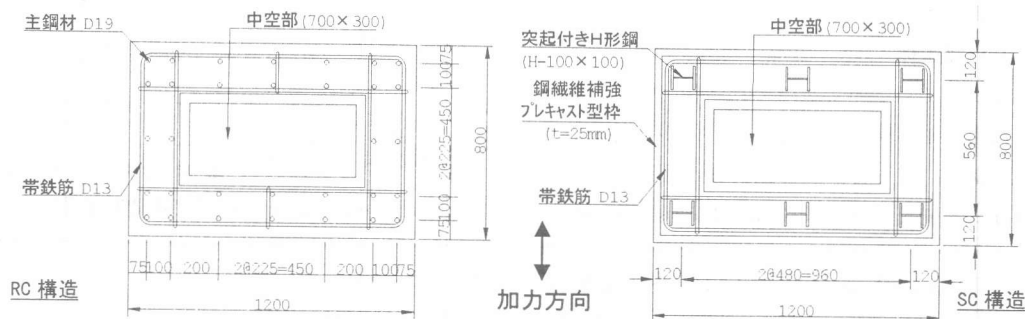


図-5 RH シリーズ試験体断面図

表一 試験体諸元

試験体名 *1	せん断 スパン la (cm)	有効 高さ d (cm)	コンクリート 強度 f _c (MPa)	軸力 (kN)	主鋼材 *2	主鋼材 降伏点 f _{sy} (MPa)	主鋼材 比 p	帯筋	帯筋 降伏点 f _{wy} (MPa)	横拘束筋 体積比 ρ _s	曲げ終 局耐力 P _{ucal} (kN)	せん断 耐力 V _{ycal} (kN)
D-RC-1	219	50	30	491	D16	386	0.025	D10@100	385	0.0163	664	1438
D-SC-1	219	50	33	491	SH100	274	0.030	D10@100	385	0.0178	601	1475
D-SC-2	219	50	35	491	SH強100	274	0.030	D10@100	385	0.0178	609	1483
D-SC-3	219	50	33	491	NH100	274	0.037	D10@100	385	0.0178	694	1509
D-SC-4	219	50	33	491	NH100	274	0.037	D10@200	385	0.0089	693	1032
S-RC-1	128	43	31	0	D32	378	0.024	D13@120	385	0.0095	409	603
S-SC-1	128	43	29	0	NH100	349	0.037	D13@120	370	0.0095	446	557
S-SC-2	128	43	31	0	SH100	349	0.030	D13@120	370	0.0095	382	543
S-SC-3F	128	43	29	0	SH100	353	0.030	D13@120	385	0.0095	382	551
S-SC-4F	128	43	25	0	SH100	353	0.030	D13@180	385	0.0063	370	438
SH-RC-1	128	43	48	0	D32	378	0.024	D13@150	385	0.0076	425	519
SH-SC-1F	128	43	47	0	SH100	353	0.030	D13@150	385	0.0076	424	478
CH-RC-1	280	74	33	558	D22	400	0.016	D13@150	397	0.0041	518	684
CH-SC-1F	280	74	36	558	SH強100	321	0.025	D13@150	397	0.0041	537	674
RH-RC-1	220	68	29	0	D16	333	0.008	D10@100	368	0.0067	356	870
RH-SC-1F	220	68	34	0	SH100	342	0.007	D10@200	368	0.0018	349	584
RH-RC-2	220	68	46	0	D22	317	0.011	D13@150	350	0.0079	492	1028
RH-SC-2F	220	68	38	0	SH100	375	0.012	D13@240	350	0.0026	543	774

*1: SH-SC-1F

- シリーズ名(D, S(SH), CH, RH)
- 構造形式(RC, SC)
- シリーズ内番号、+F=表面にPCa型枠を配置した試験体

*2: Dは異形鉄筋を, NHは通常のH形鋼を, SHは突起付きH形鋼を, SH強は強軸(載荷方向に対してH形鋼の断面計数が大となる方向)向きの突起付きH形鋼を表す。記号の後の数値は寸法を表す。

Dシリーズ: 矩形充実断面, 寸法120×60cm

CHシリーズ: 円形中空断面, 寸法φ90(中空部φ30)cm

Sシリーズ: 矩形充実断面, 寸法55×55cm

RHシリーズ: 矩形中空断面, 寸法120×80(中空部70×30)cm

SHシリーズ: 矩形中空断面, 寸法55×55(中空部15×15)cm

いては, $p_s = 0.32\%$ 一定としている)。

$$\mu = \delta_u / \delta_y = (\mu_0 \cdot \delta_{y0} + \delta_{u1}) / (\delta_{y0} + \delta_{y1}) \quad (1)$$

$$\mu_0 = -1.6 + 5.6 V_y \cdot l_a / M_u + (11.4 p_s - 1.4) \cdot p_s \quad (2)$$

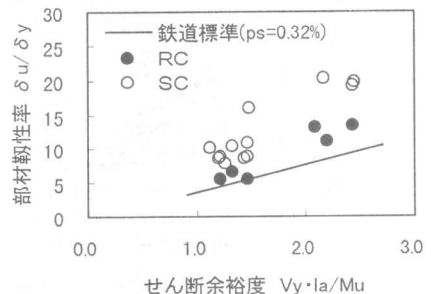
ここに, δ_y : 降伏変位, δ_u : 終局変位, δ_{y0} :

躯体の降伏変位, δ_{y1} : 降伏時の主筋の抜け出しによる回転変位, δ_{u1} : 終局時の主筋の抜け出しによる回転変位, μ : 靱性率, μ_0 : 躯体の靱性率, である。SC 構造試験体の δ_{y1} , δ_{u1} の算定は, H形鋼を等価な断面積を有する鉄筋に置換して行った。

鉄道標準式は交番荷重下の RC 部材の塑性変形能に影響を及ぼす種々のパラメータをせん断余裕度とせん断補強筋比で包括的に集約し評価するものであるが, RC 試験体の実験結果を良

表一 実験結果一覧

試験体名	降伏時 荷重 P _y (kN)	最大 荷重 P _{max} (kN)	降伏時 変位 δ _y (cm)	終局 変位 δ _u (cm)	靱性率 δ _u /δ _y
D-RC-1	588	814	1.30	14.45	11.1
D-SC-1	520	701	1.00	19.03	19.0
D-SC-2	520	752	1.00	19.00	19.0
D-SC-3	585	761	1.20	24.02	20.1
D-SC-4	544	759	1.00	15.90	15.9
S-RC-1	388	455	0.69	3.82	5.5
S-SC-1	386	469	0.71	5.60	7.9
S-SC-2	361	439	0.71	6.15	8.7
S-SC-3F	367	419	0.70	7.55	10.8
S-SC-4F	374	406	0.70	6.04	8.6
SH-RC-1	365	458	0.63	3.53	5.6
SH-SC-1F	379	419	0.66	6.65	10.1
CH-RC-1	423	530	1.72	11.21	6.5
CH-SC-1F	450	599	1.58	13.89	8.8
RH-RC-1	265	355	0.51	6.78	13.3
RH-SC-1F	325	356	0.61	5.31	8.7
RH-RC-2	408	521	0.70	9.10	13.0
RH-SC-2F	476	579	0.70	7.19	10.3



図一 部材靱性率とせん断余裕度の関係

く評価している。一方、SC 構造試験体は RC 構造試験体を上回る塑性変形能を有している。

3.2 横拘束筋ひずみ

図-7 は、D シリーズにおける D-RC-1 試験体と D-SC-1 試験体（せん断余裕度 2.5 程度）の横拘束筋のひずみ履歴を示したものである。同図(c), (d)はそれぞれ柱基部近傍（基部より 250mm）の横拘束筋ひずみであり、(a), (b)は基部より 650mm 位置の横拘束筋のひずみ履歴である（ひずみ測定位置は図-2 に示す）。柱基部近傍においては、D-RC-1 試験体の横拘束筋ひずみが $8\delta_y$ の荷重以降に急増し、降伏しているが、D-SC-1 試験体においては、降伏していない。一方、基部より 650mm 位置においては、両試験体ともに降伏には至っていない。実験時の観察結果によれば、D-RC-1 試験体における主筋の座屈（はらみだし）は $8\delta_y$ から生じており、横拘束筋ひずみの降伏は、主筋の座屈によるものであると考えられる。一般に、横拘束筋は、せん断耐力を向上させ、急激な破壊に至らしめないこと、およびコアコンクリートを拘束し、主筋の座屈およびコンクリートの

圧壊を抑制することを目的として配置されている。すなわち、SC 構造においては、主鋼材である H 形鋼が鉄筋に比べ座屈抵抗性が高く、圧縮力を負担し続ける分だけ、RC 構造に比べて、靱性が大きくなると推測される。

図-8 は SH-RC-1 試験体と SH-SC-1 試験体（せん断余裕度 1.2 程度）の基部より 300mm 位置（ほぼ斜めひび割れ位置に相当している）の横拘束筋のひずみ履歴を示す（ひずみ測定位置は図-3 に示す）。どちらの試験体も繰返し荷重の過程でひずみが増加していき、最終的には降伏に至っている。すなわち、曲げ破壊が先行し、変形および繰返し回数の増加により、せん断耐力が減少し、せん断破壊に移行したことを示している。SH-RC-1 試験体に比べると、SH-SC-1F 試験体は、繰返し荷重の中での横拘束筋のひずみ増加割合が小さい。これは、PCa 型枠を配置した SC 構造の方が繰返し荷重下におけるせん断耐力が高いことを示しており、PCa 型枠によるせん断補強効果⁹⁾によるものであると考えられる。PCa 型枠による靱性補強効果については別途報告する予定である。

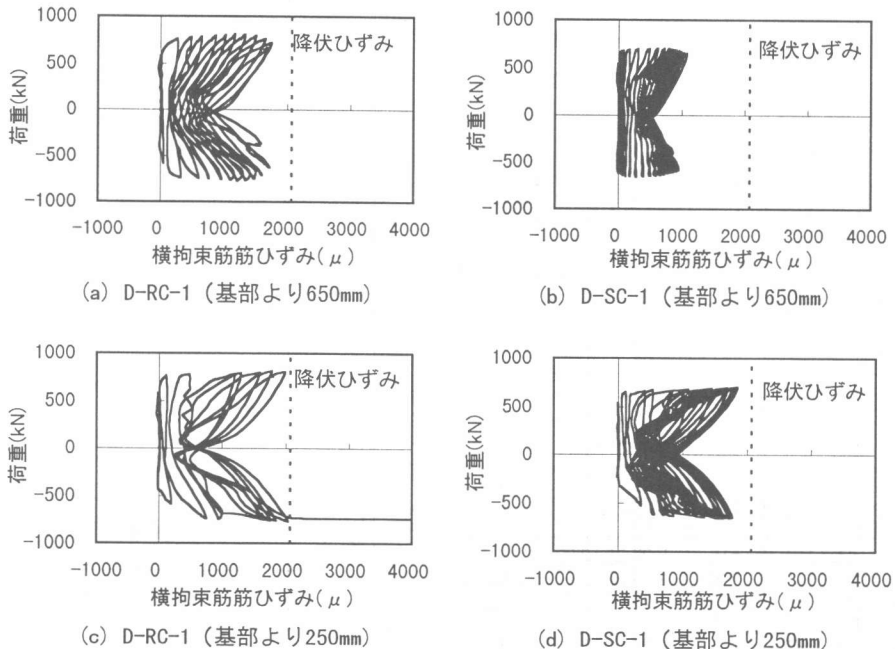


図-7 横拘束筋ひずみ履歴 (D シリーズ)

4. 靱性評価方法の検討

4.1 現行設計手法による実験結果の評価

図-9 (a)は、終局変位を道路橋示方書V耐震設計編⁷⁾ (以下、道示と呼ぶ) によるタイプII地震時の計算値で除した終局変位比と道示に定義される横拘束筋体積比の関係を示したものである。SC 構造試験体の終局変位比の平均値は3.32であり、RC 構造試験体の平均値は1.66である。SC 構造橋脚を道示に完全に準拠して設計することは、安全側の評価ではあるが、過小評価であると言える。これは、RC 構造を対象とした道示による終局変位の計算が SC 構造の主鋼材であるH形鋼の座屈抵抗性およびPCa型枠の拘束効果を評価していないことによるものと考えられる。

4.2 靱性評価方法の提案

SC 構造の靱性能を評価するためには、交番荷重下における主鋼材の圧縮力負担および座屈現象に関する検討が必要であるが、本研究では実用上の靱性能を評価するために実験結果をもとに次式に示す道示における拘束コンクリート

の最大応力 σ_{cc} と最大応力時ひずみ ε_{cc} 、下降勾配 E_{des} に、実験結果をもとに構造補正係数 γ を導入する。

$$\sigma_{cc} = \sigma_{ck} + 3.8\alpha \gamma \rho_s \sigma_{sy} \quad (3)$$

$$\varepsilon_{cc} = 0.002 + 0.033\beta \gamma \frac{\rho_s \sigma_{sy}}{\sigma_{ck}} \quad (4)$$

$$E_{des} = 11.2 \frac{\sigma_{ck}^2}{\gamma \rho_s \sigma_{sy}} \quad (5)$$

ここで、 σ_{ck} : コンクリートの設計基準強度、 σ_{sy} : 横拘束筋の降伏点、 α, β : 断面補正係数、 E_{des} : 下降勾配、 γ : 構造補正係数、である。

図-10 は、SC 構造試験体および RC 構造試験体について終局時の部材回転角 (終局変位とせん断スパンの比) と横拘束筋体積比の関係を示したものである。図中の実線および点線はそれぞれ、SC 構造試験体、RC 構造試験体を直線回帰したものである。同図より、構造補正係数 γ は、以下のように定義する。

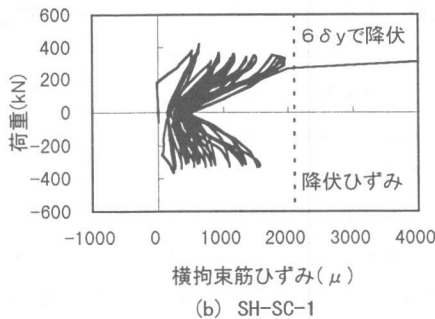
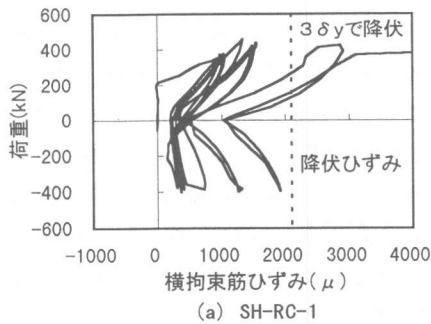


図-8 横拘束筋ひずみ関係 (SH シリーズ)

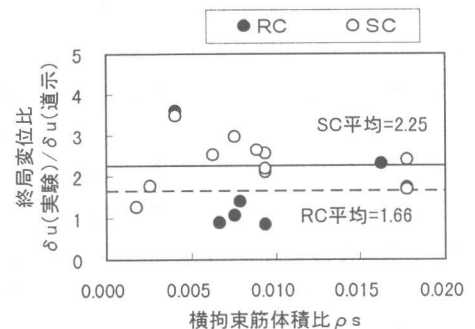
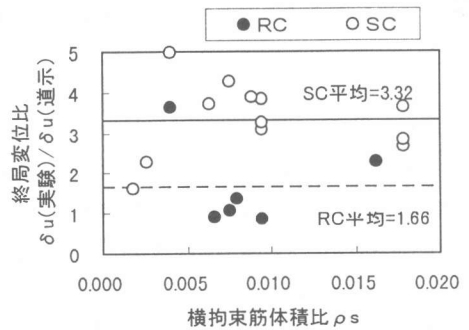


図-9 終局変位の実験結果と計算結果の比較

$\theta_{u,SC} = \theta_{u,RC}$ となる時

$$\gamma = \frac{\rho_{s,RC}}{\rho_{s,SC}} = 1.5 + \frac{1}{500\rho_s} \quad (6)$$

ここで、 $\theta_{u,SC}$: SC 構造における終局時部材回転角、 $\theta_{u,RC}$: RC 構造における終局時部材回転角、 $\rho_{s,RC}$: $\theta_{u,SC} = \theta_{u,RC}$ となる時の SC 構造の横拘束筋体積比、 $\rho_{s,SC}$: $\theta_{u,SC} = \theta_{u,RC}$ となる時の RC 構造の横拘束筋体積比、である。

図-11 に鉄骨による構造補正係数 γ と横拘束筋体積比の関係を示す。SC 構造と RC 構造において、横拘束筋体積比を同一とした実験結果は、 $\rho_s \geq 0.004$ で得られているので、 γ の上限値は 2.0 とするのが妥当である。図-9(b)に SC 構造に対して構造補正係数 γ を導入した終局変位の実験結果と計算結果の比を示す。すべての終局変位比は 1.0 を上回っており、平均値は 2.25 である。RC の平均値 1.66 に比べれば依然として過小評価をしているが、限られた実験データを根拠とする現状での安全側の評価である。

5. まとめ

本研究は、鉄骨コンクリート複合構造橋脚の靱性能を、実験結果に基づき評価し、靱性設計方法の提案を試みたものである。その結果、以下の結論を得た。

- (1) SC 構造試験体は、形状寸法、横拘束筋比、せん断余裕度、をパラメータとする交番載荷実験に対して、RC 構造試験体を上回る変形性能を発揮した。
- (2) SC 構造の主鋼材である H 形鋼の座屈抵抗性の高さ と PCa 型枠によるコアコンクリートの拘束効果が横拘束筋ひずみ履歴に現れている。
- (3) 道路橋示方書に準拠した靱性設計に実験結果より求めた構造補正係数 γ を導入することで、安全かつ従来に比べて合理的な SC 構造の靱性設計が可能となる。

参考文献

- 1) 前田良文ほか：鉄骨コンクリート複合構造橋脚の設

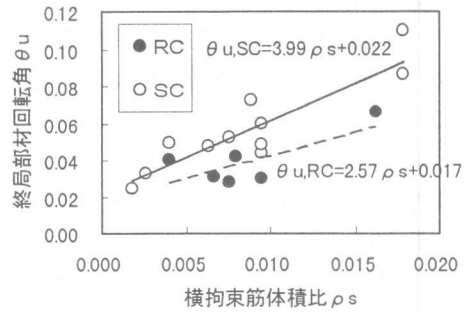


図-10 部材回転角と横構筋比の関係

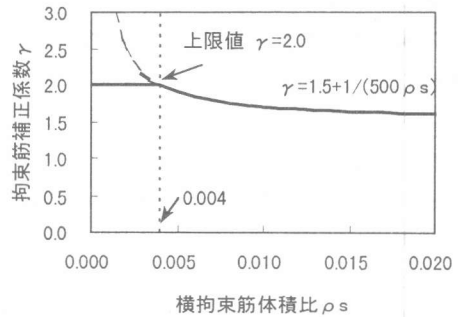


図-11 構造補正係数 γ

- 計と施工、橋梁と基礎、96-10、pp.16-22、1996.10
- 2) 長崎利哉ほか：突起付き H 形鋼を用いた SC 梁試験体の耐荷性能、土木学会第 50 回年次学術講演概要集第 5 部、pp.872-873、1995.9
- 3) 河野一徳ほか：PCa 埋設型枠を有する鉄骨コンクリート複合構造橋脚の耐震性能に関する実験的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18, No.2、pp.1325-1330、1996.6
- 4) 河野一徳ほか：REED 工法による矩形中空大断面橋脚の設計・施工、前田技術研究所報、VOL.37、pp.25-32、1997
- 5) 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物、鉄道総合技術研究所、1992.
- 6) 原夏生ほか：ステンレスファイバー補強プレキャスト型枠のせん断補強効果の定量的評価、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20, No.3、pp.307-312、1998.7
- 7) 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編、(社)日本道路協会、1996