

衝撃による軸方向引張力とせん断を受けるR/C柱の プレストレス補強に関する解析的研究

ANALYTICAL STUDY ON THE PRESTRESSED R/C PIER SUBJECTED
TO IMPACT TENSION AND SHEAR

田村隆弘*, 重松恒美**, 仲敷憲一***

Takahiro TAMURA, Tsunemi Shigematsu

* 工博 長岡技術科学大学助教授 技術開発センター

** 工博 徳山工業高等専門学校教授 土木建築工学科

*** 工修 (株)九建設計 福岡支店長

キーワード： 鉄筋コンクリート柱、軸方向引張力、プレストレス、有限要素法、合成柱
(R/C pier, Axial tension, Prestress, FEM, Composite pier)

1. はじめに

近年多発する比較的震源地の浅い直下型地震の場合、構造物は、地震波の伝搬速度の関係から鉛直振動と水平振動をほとんど同時に受けている¹⁾。鉛直方向への地震動によって衝撃的な部材軸方向の引張力が発生したことは、地震後、倒壊を免れた鉄筋コンクリート(R/C)橋脚の輪切りひび割れ(図-1)や鋼製橋脚の破断(図-2)から容易に推測できるが、これらの現象、すなわち衝撃的荷重の下で引張破壊が発生する可能性を解析的に検証した研究も行われている²⁾。このような大きな軸方向引張力が作用する部材に、同時に大きなせん断力が働く状態が起こりうることは、トップヘビーなR/C部材においては、重大な問題である。

著者らは、これまで軸方向引張力とせん断を受けるR/C部材のせん断耐力について実験と解析により調査してきた³⁾。そこでは、軸方向引張力によりせん断耐力は大幅に低下し、また、このことは部材の軸方向鉄筋比が小さな場合に顕著になることが示された。一般に鉄筋コンクリート柱部材は、せん断破壊を避けるために1%以下の低鉄筋比で配筋されており、すなわち、先の地震において倒壊したR/C橋脚は、軸方向引張力とせん断力をほとんど同時に受けたために設計せん断耐力よりも小さなせん断力で破壊に至った可能性があると考えられる(図-3)。



図-1 地震動により輪切りひび割れの発生したR/C橋脚

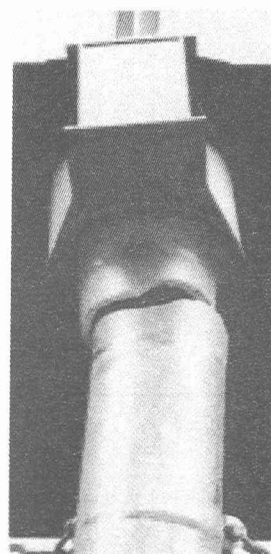


図-2 地震動により破断した鋼製橋脚

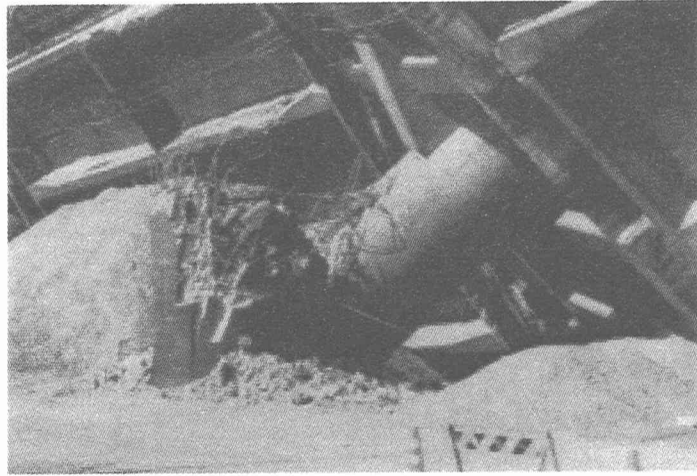


図-3 地震により倒壊したR/C橋脚

一方、最近の研究では、地震時の曲げ作用が卓越する場合に、R/C橋脚に適度なプレストレスを導入することで部材の復元性を向上させ残留変形や損傷度を改善する方法が提案されている⁴⁾⁵⁾。同様に、単純に衝撃により発生する引張力相当を初期軸圧縮力として導入することで、輪切りひび割れを防ぐことが可能となり、またこのことは、せん断耐力の低下に対しても有効であると考えられる。ただし、大きなプレストレスの導入は、部材の破壊までの変形性能を低下させ、柱部材を脆性的な破壊に導く可能性がある。

これらのことを背景に本研究では、設計時にプレストレスによりあらかじめ軸方向圧縮力を導入した柱部材のせん断耐荷性能について検討する。また、プレストレス柱の破壊性状の改善を目的として、柱に鋼板を巻いた合成柱の挙動の解析を試みた。

2. 有限要素法

本解析では、ソリッド要素を用いた有限要素法に

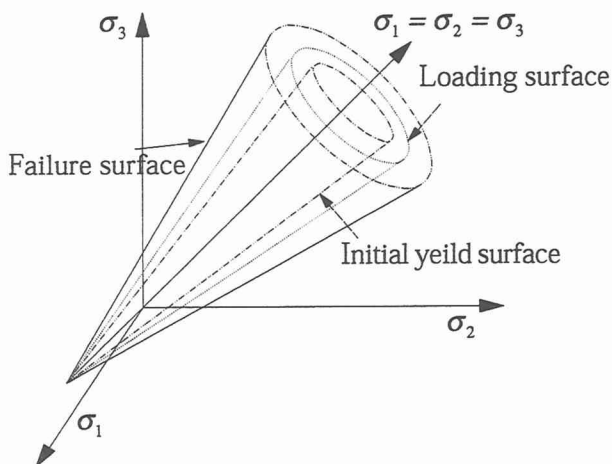


図-4 コンクリートの3次元応力空間

より、軸方向力をパラメータとして鉄筋コンクリート柱や合成柱の耐荷力および変形性能について検討を行う。数値解析における増分法は、鉛直方向の初期軸力に対しては荷重増分法で行い、水平力に対しては変位増分法を採用した。非線形挙動を示す鉄筋コンクリート材料の取り扱いについては以下の仮定を適用する。

2.1 コンクリートの圧縮挙動

コンクリートの応力状態を評価するために以下の4つの条件を定義した。

(1) 降伏条件 3軸応力状態のもとで降伏関数は、Drucker-Pragerの降伏関数を採用する(図-4参照)。すなわち、

$$f(I_1, J_2) = \sqrt{\beta(3J_2) + \alpha I_1} = \sigma_0 \quad 1)$$

ここで、 α と β は材料パラメータで、Kupfer等の実験結果によれば $\alpha=0.355\sigma_0$ 、 $\beta=1.355$ 。また、 σ_0 は相当応力である。

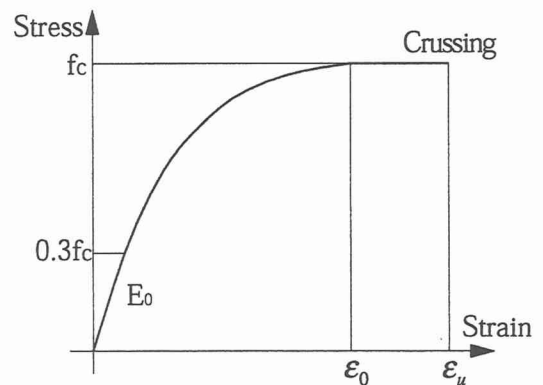


図-5 圧縮状態におけるコンクリートの相当力-相当歪み曲線

(2) 流動則 降伏曲面に塑性ひずみベクトルに対する流動ベクトルの直交性を考慮して、ひずみ増分 $d\epsilon_{ij}^p$ は次式で得られる。

$$d\epsilon_{ij}^p = d\lambda \frac{\partial f(\sigma)}{\partial \sigma_{ij}} \quad 2)$$

ここで、 $f(\sigma)$ は式1)で定義された降伏関数で表される塑性ポテンシャルであり、 $d\lambda$ は塑性ひずみ増分の大きさを表す定数である。

(3) 硬化則 塑性変形間の相当応力と相当塑性ひずみの関係を定義する硬化則は、次式3)に示す放物線 (Madrid Parabola) によって仮定する。

$$\sigma_0 = E_0 \epsilon - \frac{E_0 \epsilon^2}{2\epsilon_0} \quad 3)$$

ここで、 E_0 は初期弾性係数、 ϵ_0 は最大応力 f_c での全ひずみであり、 $\epsilon = \epsilon_p + \epsilon_e$ 、また、 $\epsilon_e = \sigma_0 / E_0$ であることから弾性ひずみ ϵ_e は以下の式で得られる。

$$\sigma_0 = -E_0 \epsilon_p + \sqrt{2E_0^2 \epsilon_0 \epsilon_p} \quad : c \cdot f_c < \sigma_0 < f_c \quad 4)$$

ここで、 $c = 0.3$ 、 $\epsilon_u = 2f_c / E_0$ である (図-5 参照)。

(4) 圧壊条件 コンクリートの圧壊条件は、ひずみ制御問題として仮定し、式1)と同様な形で定義される。

$$\sqrt{\beta(3J_2') + \alpha I_1'} = \epsilon_u \quad 5)$$

ここで、 I_1' はひずみの第一不変量、 J_2' はひずみの第二不変量であり、 ϵ_u は最大圧縮ひずみである。

2.2 コンクリートの引張挙動

引張応力のもとでのコンクリートの挙動は、主応力がコンクリートの引張強度に達するまでは弾性挙動と仮定し、その挙動は圧縮応力におけるコンクリートの挙動に等しいと仮定する。また、コンクリー

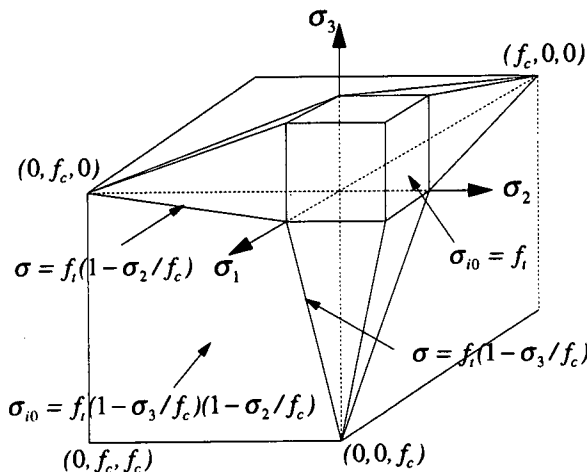


図-5 引張状態における3次元応力-歪み表示

トの挙動を、ひび割れ前は等方性材料として、ひび割れ後は異方性材料として定義した。

(1) 引張状態における3次元の応力-ひずみ関係

3次元応力状態に対してひび割れを定義する応力条件として式6)を用いる。

$$\sigma_{i0} = f_i \quad : \text{引張-引張領域}$$

$$\sigma_{i0} = f_i \left(1 + \frac{\sigma_j}{f_c}\right) \left(1 + \frac{\sigma_k}{f_c}\right) \quad : \text{引張-圧縮領域} \quad 6)$$

ここで、 σ_{i0} ($i=1,2,3$) はひび割れ発生応力、 σ_j と σ_k はそれぞれ主引張応力に垂直な主圧縮応力である。引張-引張、引張-圧縮の応力状態における3次元の応力表示を図-6に示す。

(2) 引張剛性 鉄筋コンクリート材料の引張剛性は、図-7に示されるようなひび割れ面に垂直なコンクリート応力成分の関係によって仮定する。ひび割れ後のコンクリートの履歴は次式で仮定する。

$$\sigma = f' \exp\{-\epsilon - \epsilon'_i\} / \alpha \quad 7)$$

$$\alpha = (G_f - 0.5f'_i \epsilon_{cr} l_c) / (f'_i l_c)$$

ここで、 f'_i は引張強度、 ϵ'_i はひび割れ発生ひずみ、 G_f は破壊エネルギー、 l_c は積分点の体積の3乗根、 ϵ_{cr} はひび割れひずみである。 E_i については次式で仮定する。

$$E_i = \sigma_{cri} / \epsilon_{cri} \quad 8)$$

2.3 鋼材の材料特性

鉄筋および鋼板は等価断面を有する板として要素内に組み込む。圧縮・引張りとも同様の特性を有するものとし、その構成則を降伏前と降伏後の2つの線形係数 E_1 と E_2 で表すバイリニア系とする。鋼材を組み込むことによる鉄筋コンクリート材料のための (特性値としての) 破壊エネルギー G_f は0.2とした。

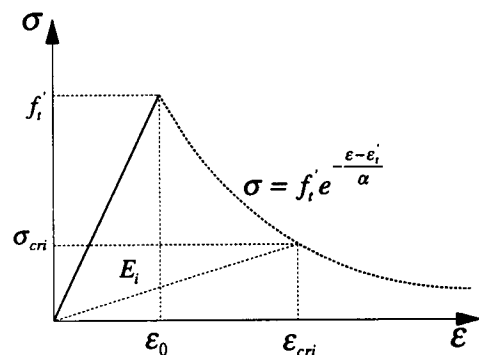
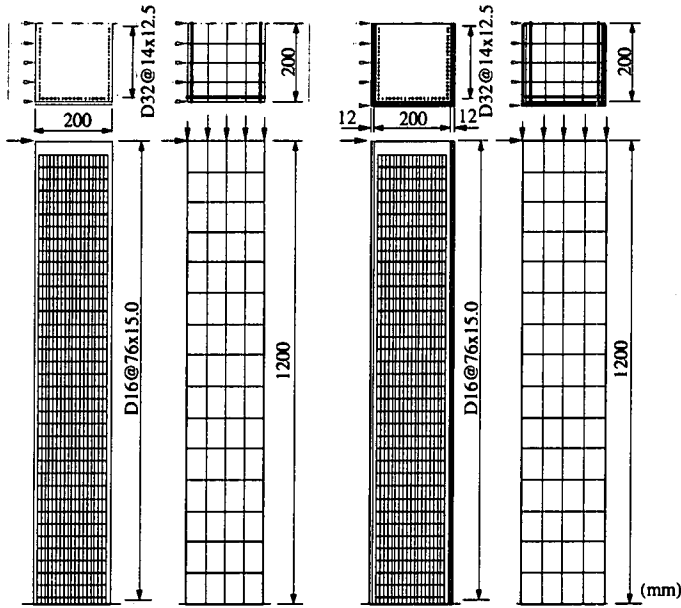


図-6 引張状態における1次元応力-歪み表示



(a)プレストレスRC柱 (b)プレストレス鋼板RC柱

図-7 解析モデル

表-1 解析に用いた材料特性値

Concrete	
Elastic modulus (E_c)	2.91 (MN/cm ²)
Poisson's ratio (μ)	0.2
Density (ρ)	2.45
Compressive strength (σ_c)	4.0 (kN/cm ²)
Tensile strength (σ_t)	0.27 (kN/cm ²)
Rebar	
Elastic modulus (E_r)	19.0 (MN/cm ²)
Hardening modulus (E_2)	0.19 (MN/cm ²)
Yield stress (σ_y)	23.52 (kN/cm ²)
Steel Sheet	
Elastic modulus (E_s)	20.7 (MN/cm ²)
Hardening modulus (E_2)	0.207 (MN/cm ²)
Yield stress (σ_y)	37.71 (kN/cm ²)

3. 鉄筋コンクリート柱の解析

3.1 解析モデル

本解析の目的は、1)軸方向力により変化するRC柱の破壊性状を把握し、2)衝撃による軸方向引張力によるダメージを回避するために柱にプレストレスを入れ、3)高い軸方向圧縮力により脆性破壊を起こすことが予想される柱にあらかじめ鋼板を巻き立てることにより靱性を確保することが可能であるか、検証することである。プレストレスRC柱およびプレストレス鋼板巻き立てRC柱の解析モデルを図-7に示す。本解析に用いた材料の特性値は、表-1に示す。

表-2 想定した柱に作用する軸方向力

衝撃外力分 応力(Mpa)	上部荷重分 応力(Mpa)	プレストレ ス(Mpa)	合計軸応力 (Mpa)
-6.0	2.0	2.0	-2.0
-6.0	2.0	3.0	-1.0
-6.0	2.0	4.0	0
0	2.0	0	2.0
3.0	2.0	0	5.0
8.0	2.0	0	10.0
8.0	2.0	5.0	15.0

3.2 軸方向力とRC柱の破壊性状の関係

竹宮等は、モデル化したT型橋脚において、仮定した衝撃的地震動により最大5.17Mpaの軸方向引張応力が上部工と柱部の付け根部分に発生し、また、圧縮力については最大6.82Mpa発生することを解析的に求めている²⁾(この時、柱上部工による圧縮力2.0Mpa、入力地震動としては、最大速度100kine、地震力の強度8.0Mpaを仮定。)このことから本解析では、上部構造の荷重分の軸方向力を2.0Mpaと仮定して、柱に作用する合計軸方向力を15Mpa(圧縮)~2.0Mpa(引張り)の範囲で変化させ、同時に柱上端に水平力を作用させた場合の部材の挙動を調べた。(表-2は、想定した作用外力、自重、およびプレストレスの関係を示す。合計軸力は、単純に衝撃外力分応力、上部工荷重分応力、そしてプレストレスを合計したものと仮定した。符号は圧縮を正、引張りを負とし

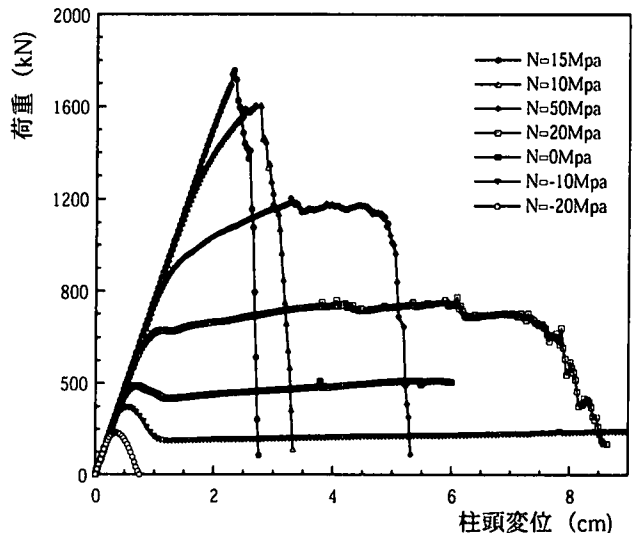


図-8 鉄筋コンクリート柱の荷重-変位(軸方向力をパラメータとした場合)

ている。)

図-8は、軸方向力をパラメータとした鉄筋コンクリート柱の荷重-変位の関係を示す。解析解において初期勾配はいずれも等しく軸方向圧縮力（合計軸方向応力が正の場合）が増加することで、RC柱の曲げに対する最大耐力は上昇する。しかし、破壊までの靱性性能が低下し、脆性的な破壊を起こしている。一方、軸方向引張力が作用する場合（合計軸方向応力が負となる場合）には、-1.0Mpaの軸方向引張応力を受けた場合においても、曲げに対する耐力は、合計軸方向応力が0MpaのRC柱の耐力に比較して20%程度低下し、さらに-2.0Mpaの場合には50%程度まで耐力が低下することを示している。

3.3 鋼板巻き立てRC柱

(1) 鋼板厚さの影響 一般に、RC柱の耐震補強を目的として使用されている鋼板の厚さは、構造物の種類および部材寸法によって決定されている⁶⁾。本解析では、6mm、12mmおよび24mmの鋼板を巻き立てた場合について解析を行った（表-3参照）。

表-3 RC柱と鋼板巻き立てRC柱の耐力比較

鋼板厚	D/t	耐力比(SC/RC)		
		N=-2.0Mpa	N=2.0Mpa	N=15.0Mpa
6mm	168.7	4.10	1.75	1.12
12mm	85.3	7.26	2.47	1.29
24mm	43.7	12.9	3.67	1.69

RC:RC柱の最大耐力

SC:鋼板巻き立てRC柱の最大耐力

N:合計軸方向力（圧縮を正）

D/t:部材厚/鋼板厚比（右図参照）

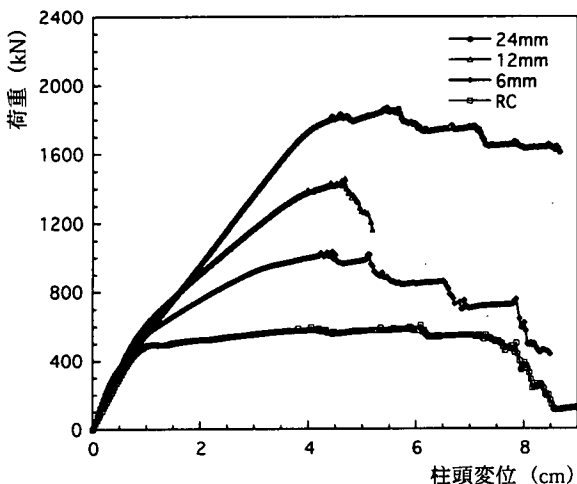
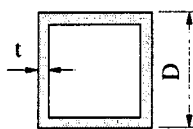


図-9 鋼板巻き立てRC柱の荷重-変位（鋼板の厚さをパラメータとした場合）

図-9は、鋼板を巻き立てた柱と、鋼板の巻き立てを行わないRC柱の荷重-変位の関係を比較している。図より鋼板巻き立てによって合成構造となった柱の耐力が大幅に上昇することが確認でき、また、鋼板の厚さを厚くしてゆくことによって、最大耐力が改善されることが確認できる。

(2) 軸方向力を受ける鋼板巻き立てRC柱 鋼板巻き立ての軸方向力に対する効果を調べるためにN=-2.0Mpa、2.0Mpa、そして15.0Mpaの軸方向力を受ける鋼板巻き立てRC柱を解析した。図-10から図-12は、それぞれ、各軸方向応力レベルで鋼板厚さを変化させた場合の結果を示している。

いずれの図においても、軸方向力を受けた場合にも鋼板巻き立てRC柱は、最大耐力がRC柱に比較して著しく向上している。その割合は、表-3に示すように軸方向力のレベルが小さい（圧縮を正として）ほど顕著である。靱性性能については、15Mpaの軸方向圧縮力が作用する場合には、24mm鋼板の巻き立てでも、RC柱の約2倍程度であったが、-2.0Mpaの軸方向力（引張状態）の場合には、6mm厚の鋼板巻き立てでも靱性性能は大幅に改善されている。

4. 結論

衝撃的地震力による軸方向力とプレストレスを考慮して、RC柱および鋼板巻き立てRC柱の曲げ破壊性状を解析的に調査した。解析を行った範囲内で以下に結論をまとめる。

1. 柱部材は通常上部構造物の荷重による軸方向圧縮力を受けているため、その分部材の曲げ耐力は衝撃的な引張力に対して有利な状態にある。しかし、RC柱部材が同時に軸方向引張力を受ける場合の水平荷重に対する曲げ耐力の低下は著しく、2Mpa程度の軸方向引張力が作用することで、最大耐力は約50%低下した。このことから、部材にプレストレスを導入することは、衝撃的な荷重によって発生する軸方向引張力と曲げを受ける部材の耐力を改善することに有効である。

2. RC柱に鋼板巻き立てすることで、柱の曲げ耐力は大幅に改善され、鋼板厚さは耐力上昇率のパラメータの一つとなる。

3. RC柱に鋼板を巻き立てることは、軸方向引張力を受ける場合には極めて効果的である。しかしながら、15Mpa程度の合計軸方向力が15Mpa（圧縮）程度作用する状態では、その靱性性能はRC柱の場合に比較すると改善されるが、破壊性状は衝撃的であることが予想される。従って、破壊の挙動をいっそう緩やかなものにするためには、導入するプレストレスの大きさ等、さらに検討が必要と思われる。

参考文献

- 1) 別府万寿博, 香月智, 石川信隆, 宮本文穂: RC 橋脚の地震時輪切り状ひびわれ発生に関する実験的考察, 第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.213-218, 1997
- 2) 竹宮宏和, 堀内深: 衝撃的地震動によるRC構造物の引張破壊現象の可能性, 第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集, pp.133-138, 1996
- 3) 田村隆弘, 重松恒美, 原隆, 中野修治: 軸方向引張力を受けるRC梁のせん断耐力に関する実験的研究, コンクリート工学論文集, 第2巻第2号, pp.153-160, 1991
- 4) 伊藤忠彦, 山口隆浩, 池田尚治: 軸方向プレストレスを有するコンクリート橋脚の耐震性能, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.2, 1997
- 5) 太田豊, 新井英雄, 山本哲也: プレストレストコンクリート橋脚の耐震性に関する実験的研究(その1), プレストレストコンクリート技術協会第8回シンポジウム論文集, pp.411-414, 1998
- 6) 土木学会コンクリート委員会耐震研究小委員会: コンクリート構造物の耐震技術-現状と将来展望-, pp.187-219, 1997

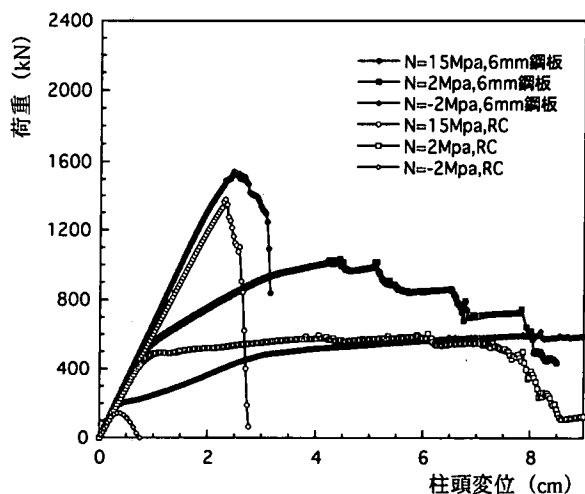


図-10 軸方向力を受ける鉄筋コンクリート柱の荷重-変位 (6mm 鋼板巻立ての場合)

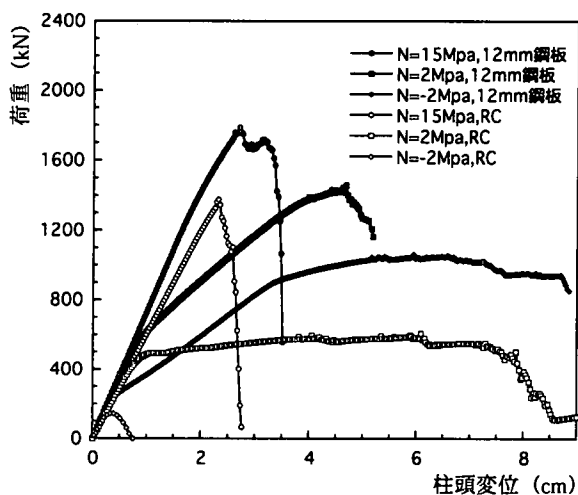


図-11 軸方向力を受ける鉄筋コンクリート柱の荷重-変位 (12mm 鋼板巻立ての場合)

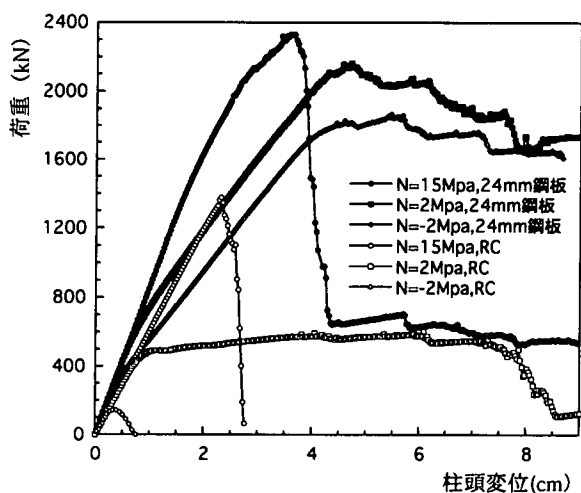


図-12 軸方向力を受ける鉄筋コンクリート柱の荷重-変位 (24mm 鋼板巻立ての場合)