

三次元弾塑性有限要素法を用いた円形断面 RC 橋脚の地震動応答解析

Seismic response analysis of circular RC piers by means of three-dimensional elasto-plastic FEM

室蘭工業大学
室蘭工業大学
(独) 土木研究所寒地土木研究所

○正員
フェロー
正員

張 広鋒 (Guangfeng Zhang)
岸 徳光 (Norimitsu Kishi)
西 弘明 (Hiroaki Nishi)

1. はじめに

本研究では、多方向地震動を受ける鉄筋コンクリート (RC) 橋脚の合理的な弾塑性地震応答解析手法を確立することを目的に、三次元弾塑性有限要素法に基づいた解析手法を提案し、実験結果と比較することによりその妥当性検討を行った。本研究では、3方向に地震動を受けた円形断面 RC 橋脚を対象に、鉄筋の降伏、コンクリートのひび割れおよび圧縮破壊等の材料非線形挙動を適切に考慮することとした。また、実配筋状況に即して軸方向筋および横拘束筋もモデル化している。数値解析手法の妥当性検討は、応答加速度、応答変位および破壊状況に関する解析結果を実験結果と比較することにより行った。なお、本解析では構造解析用汎用コード DIANA¹⁾を使用した。

2. 解析対象の概要

本研究では、(独) 土木研究所で行った円形断面 RC 橋脚模型に関する3方向加振橋脚模型実験^{2),3)}を解析対象としている。図-1には実験模型の詳細図を示している。模

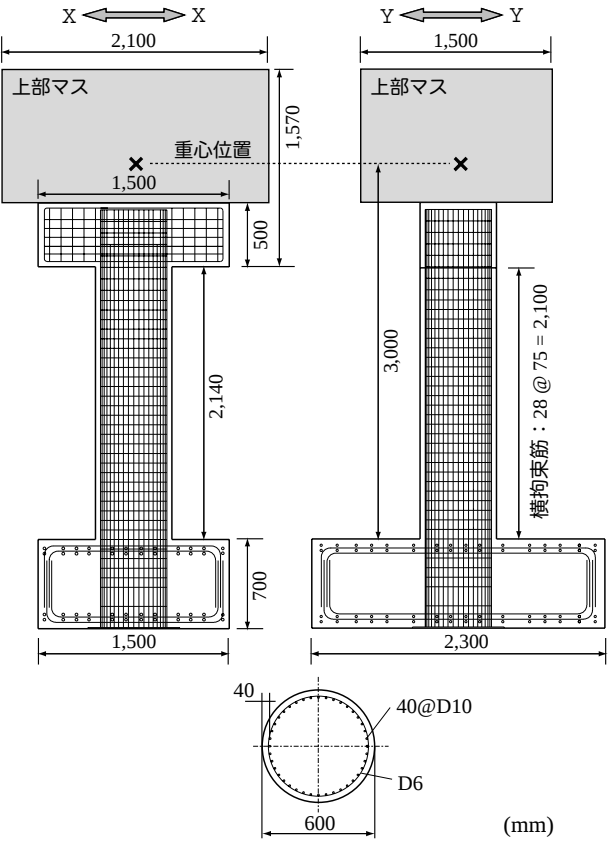


図-1 試験体の概要図

型断面は直径 600 mm の円形である。軸方向筋には SD295 D10 を 40 本、横拘束筋には SD295 D6 を 75 mm 間隔で配筋している。また、橋脚模型の頂部には鋼板を載せ、上部工による自重および慣性力を考慮している。慣性質量は 27,000 kg である。表-1 には、実験時に用いた各材料の力学特性の一覧を示している。

図-2 には実験時に用いた入力地震動波形を示している。これらの波形は、日本海中部地震 (1983 年) で観測された津軽大橋記録を元に、振幅を 4 倍、時間軸を 1/2 倍にしたものである^{2),3)}。

3. 数値解析の概要

3.1 解析モデル

図-3 には解析モデルの要素分割状況を示している。本解析では可能な限り実験模型を忠実に再現して解析を行うこととし、フーチング、橋脚部および上部工模型は全て 8 節点あるいは 6 節点三次元固体要素でモデル化している。橋脚部は、軸方向に約 50 mm ピッチで分割している。周

表-1 各材料の力学特性の一覧

材料	呼び径	圧縮強度 (MPa)	降伏強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)
コンクリート	-	41.6	-	31.7
軸方向筋 (D10)	SD295A	-	350.9	178.7
横拘束筋 (D6)	SD295A	-	339.7	174.3

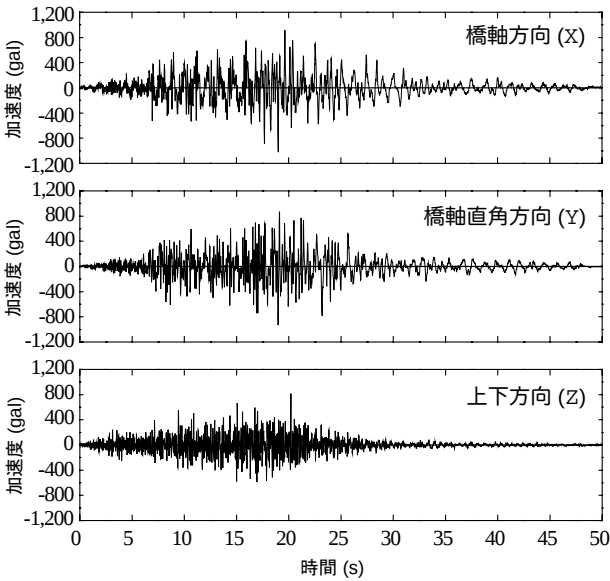


図-2 入力地震動波形

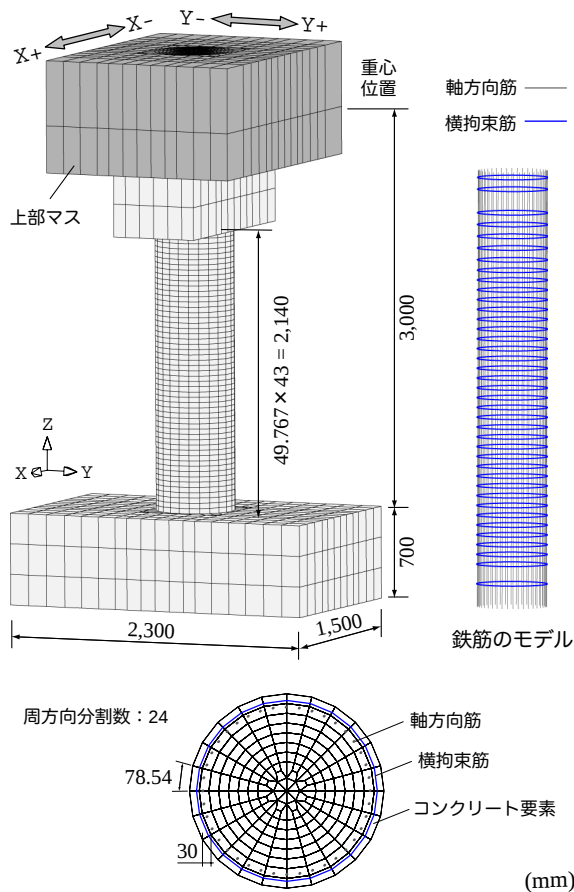


図-3 要素分割状況

方向には24分割している。また、軸方向筋および横拘束筋は、DIANA¹⁾に予め組み込まれている埋め込み鉄筋要素 (embedded reinforcement element) を用いてモデル化している。埋め込み鉄筋要素は、独立な自由度を持たずに母要素のコンクリート要素に埋め込まれるものであり、節点に依存せずに簡単に鉄筋要素を配置できる特徴を有している。埋め込み鉄筋要素のひずみは、周囲のコンクリート母要素の変位場から算出される。図-3には、軸方向筋および横拘束筋の要素分割状況を示している。

3.2 材料構成則

本解析では、コンクリートの圧縮軟化勾配の影響を検討するために、図-4(a)に示すPark式⁴⁾および土木学会コンクリート標準示方書式⁵⁾を用いることとした。Park式の軟化勾配 z は式(1)より算出される。ここで、本研究に用いたコンクリート ($f'_c = 41.6 \text{ MPa}$) の場合は、 $z = 503 \text{ MPa}$ 、 $\epsilon_{cu} = 4,120 \mu$ である。なお、降伏の判定には von Mises の降伏条件を用いている。

$$z = \frac{0.5}{\left(\frac{3 + 0.002f'_c}{f'_c - 1000} \right) - 0.002} \quad (\text{Unit: psi}) \quad (1)$$

一方、コンクリートの引張側には線形軟化モデルを適用することとし、終局ひずみ ϵ_{tu} は文献1)に基づき図に示すように定義している。図中の G_f はコンクリートの引張破壊エネルギーであり、文献5)により算出される。また、コンクリート要素のひび割れ破壊は、Fixed orthogonal crack モデル¹⁾によって判定することとした。このモデルでは、

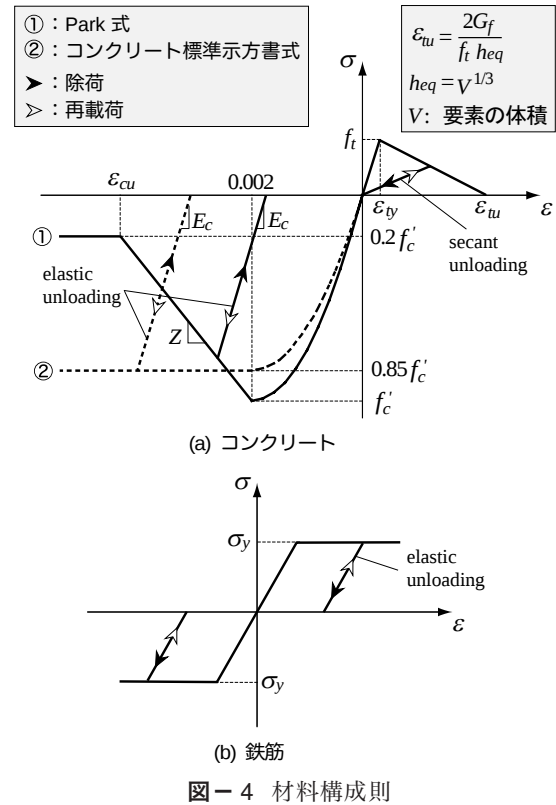


図-4 材料構成則

主応力がコンクリートの引張強度に達した時点で、主応力の方向に対して直交方向に分布ひび割れが発生するものと定義している。分布ひび割れが発生した要素のひび割れ面に沿うせん断剛性は、コンクリートの初期せん断剛性 G の5%と設定した。

なお、コンクリートの除荷・再載荷パスに関しては、図に示すように、圧縮側には elastic unloading を、引張側には secant unloading を仮定した。

図-4(b)には、鉄筋要素の材料構成則を示している。図に示すように、鉄筋要素には降伏後の塑性硬化を考慮しない等方弾塑性体モデルを仮定した。降伏判定は von Mises の降伏条件に従うものとしている。除荷・再載荷パスには、圧縮側および引張側とも elastic unloading を採用している。

3.3 入力地震動

数値解析は、実験時と同様の図-2に示す地震波形を用い、基部加振によって1/20秒刻みで20秒まで行った。また、解析時の減衰定数は0%とした。なお、収束計算には Quasi-Newton 法を採用している。

4. 解析結果および考察

図-5～7には、構造全体の重心位置（以後、単に重心位置）における絶対応答加速度、相対応答変位、相対応答変位波形に関する応答解析結果を実験結果と比較して示している。図-8には、実験終了後の橋脚基部の損傷状況写真を示している。実験では、時点P9で軸方向筋の破断や座屈が生じている^{2),3)}。これより、以下の検討では主にP9時点までの結果に着目することとする。

4.1 地震動応答

図-5,6より、各応答解析結果はいずれも14秒近傍まで実験結果を精度よく再現していることが分かる。その後、解析結果と実験結果間には差異が生じている。すなわ

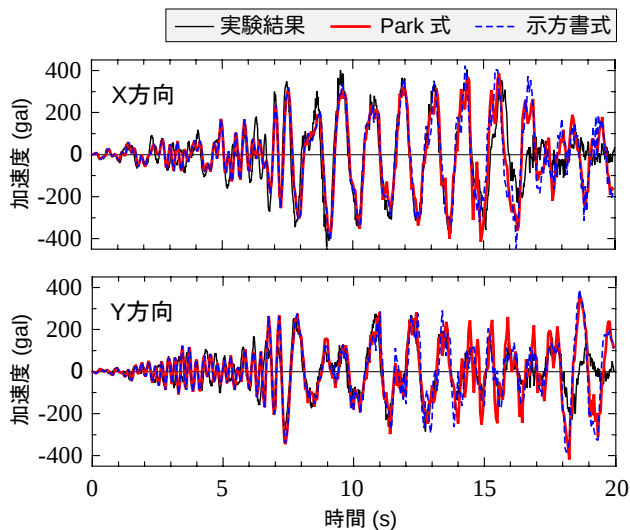


図-5 重心位置における絶対応答加速度

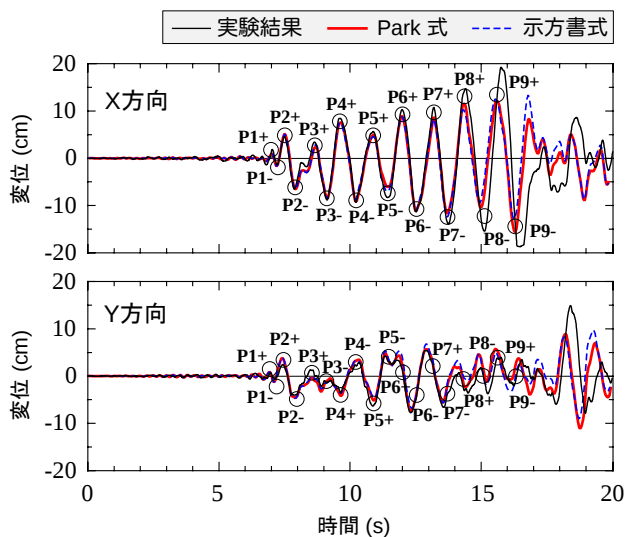


図-6 重心位置における相対応答変位

ち、絶対応答加速度に関する解析値は実験結果を過大に、また相対変位に関する解析値は実験結果を過小に評価していることがうかがえる。一方、図-7に示す相対応答変位の軌跡において、解析結果はP7-時点まで実験結果と類似な分布性状を示していることが分かる。P7-～P9-間では、解析結果のX方向変位は実験結果より小さく、Y方向変位は実験結果より大きい。これらの差異は、本解析手法がかぶりコンクリートの剥落や鉄筋の座屈等の破壊現象を十分に再現できずに剛性を高く評価していることに起因しているものと推察される。

なお、解析結果の比較より、両結果間に多少の差異があるものの、コンクリートの軟化を考慮しない解析の場合においても各応答をある程度再現可能であることが分かる。

4.2 破壊状況

図-9には、一例としてP1+, P6- および P9- の3つの時点における解析結果の変形図、軸方向ひずみ(ϵ_x)分布を示している。これらの時点は、それぞれ実験時におけるひび割れの開口、コンクリートの軽微な剥落および軸方向筋の破断と座屈が確認できた時点近傍点である。また、図中の

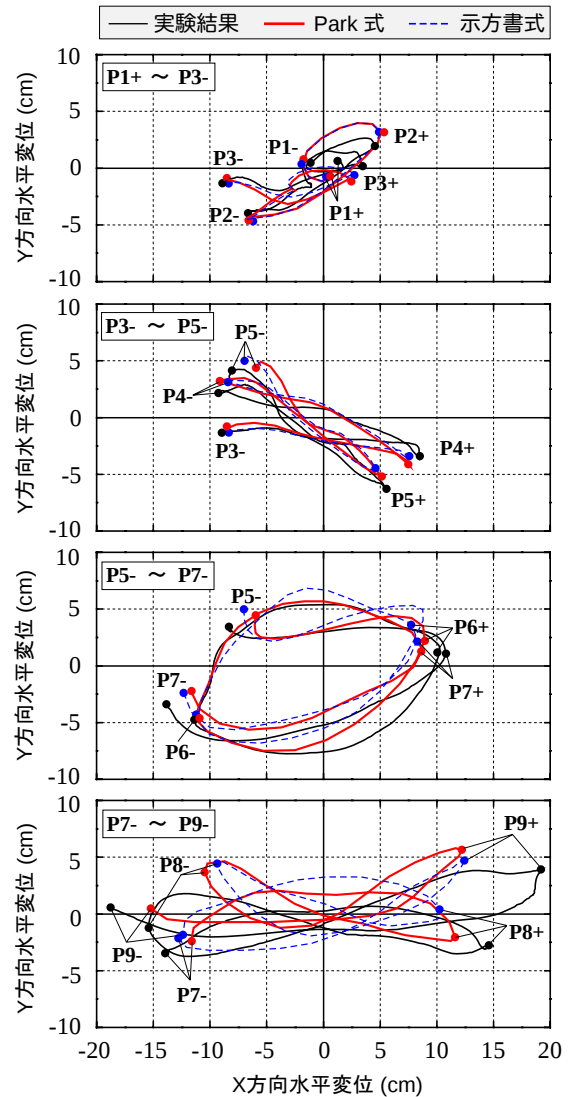


図-7 重心位置における相対応答変位の軌跡

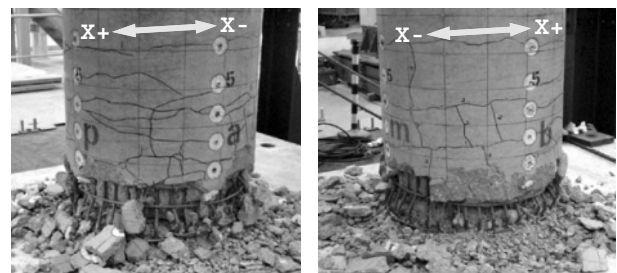
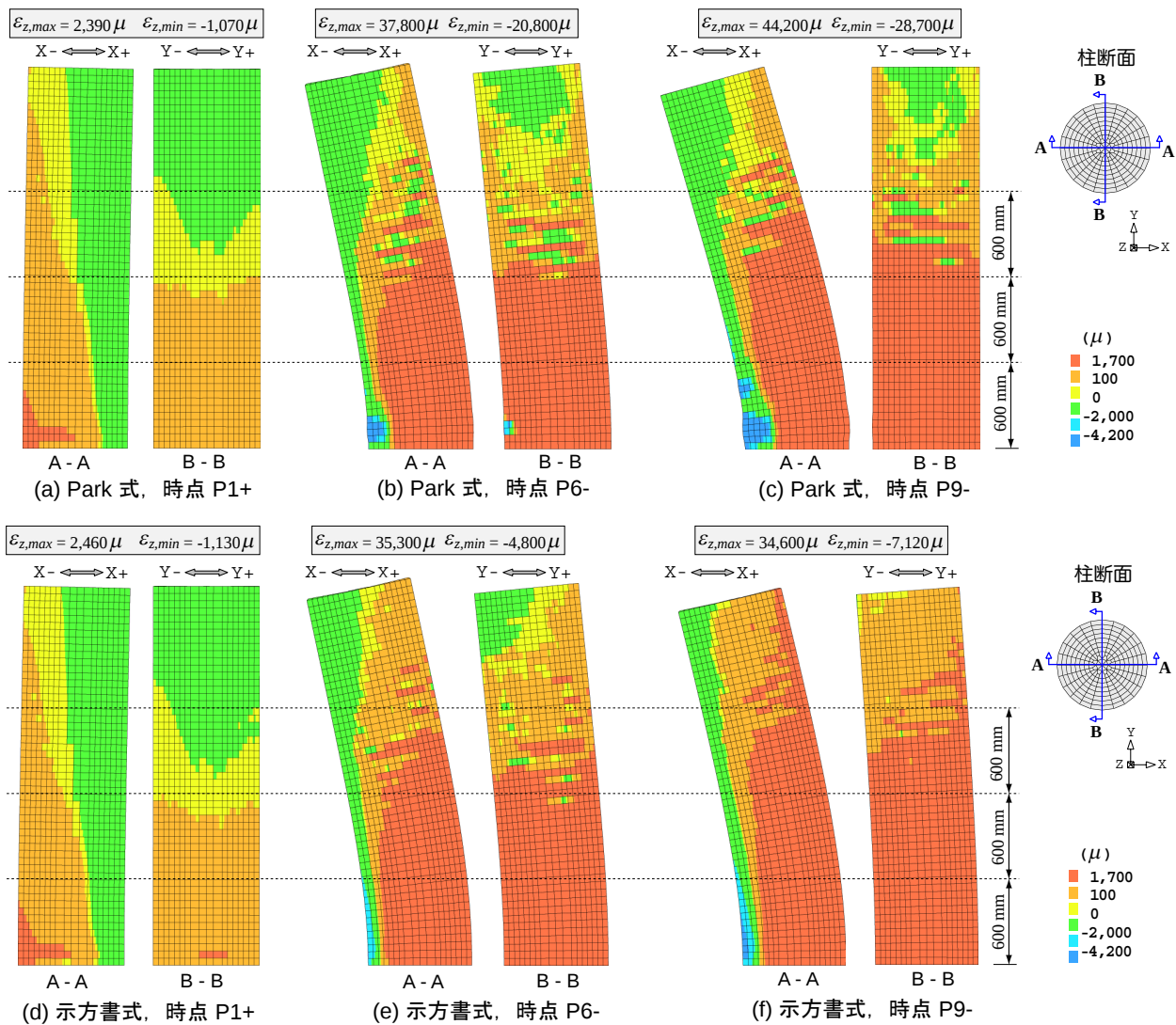


図-8 橋脚基部の損傷状況

コンターレベルの-4,500, 100, および 1,700 μ は、それぞれ図-4の ϵ_{cu} , ϵ_{ty} および ϵ_{tu} の概略値である。

図-9(a), (d) 図より、両解析ともこの時点でひび割れ(図中の赤色)が発生していることが分かる。時点P6-では、両解析結果はほぼ同様なひび割れ破壊状況を示しているが、圧縮ひずみには大きな差異が生じている。示方書式を用いる場合には-4,800 μ を示しているが、Park式を用いる場合には-20,800 μ となっている。また、(c), (f) 図より、この時点では、Park式を用いる場合の解析結果にはコンクリートの圧縮破壊によって基部コンクリートが横に膨らみ、局部座屈に近い破壊挙動を示していることが分かる。なお、

図-9 解析結果の変形図, 軸方向ひずみ (ϵ_z) 分布 (変形倍率: 5)

示方書式を用いる場合にはこのような圧縮破壊が見られない。

一方, 両図のひび割れ破壊を比較すると, (f) 図のひび割れ破壊範囲は (c) 図より広いことが分かる。これは, コンクリートの圧縮軟化を考慮しない場合には, 圧縮破壊が局所的に発生せずにより広範囲に分散されることにより, 対応してひび割れ破壊もより広い範囲に発生することによるものと推察される。

これより, コンクリートの圧縮軟化をモデル化しない場合には, 橋脚の損傷程度を適切に評価することができず, またコンクリートのひび割れ破壊範囲も過大に評価する傾向にあることが明らかになった。

5. まとめ

- 1) 本研究で提案の解析手法を用いることにより, 多方向から地震動を受ける円形断面 RC 橋脚の応答特性や破壊性状を大略再現可能であるものと考えられる。
- 2) コンクリートの圧縮軟化をモデル化しない解析の場合には, 各応答値をある程度評価可能であるものの, 橋脚の損傷程度を適切に評価することが不可能であるものと推察される。

なお, 本研究は, 共著者が E-defense における実大 RC 橋脚模型の振動台実験に向けた数値解析法の確立に関する検討委員会 WG の一員として, 縮小模型を用いた実験結果を対象に実施したものである。実測波形を提供頂いた関係各位にこの場を借りて感謝する次第である。

参考文献

- 1) Nonlinear Analysis User's Manual (7.2), TNO Building and Construction Research.
- 2) Junichi Sakai and Shigeki Unjoh: "Earthquake simulation test of circular reinforced concrete bridge column under multidirectional seismic excitation." Earthquake Engineering and Engineering Vibration, Vol.5, No.1, pp. 103-110, 2006. 6.
- 3) 堺淳一, 運上茂樹: 円形 RC 橋脚模型の三次元振動台加震実験, 第 61 回土木学会年次学術講演会講演概要集, I-017, pp. 33-34, 2006.
- 4) Kent, D. C., and Park, R.: "Flexural members with confined concrete." J. Struct. Div. ASCE, 97(7), pp. 1969-1990, 1971.
- 5) 土木学会: コンクリート標準示方書 (2002 年制定) 構造型性能照査編, 2002.