

論文 高強度コンクリート構造物の曲げ挙動に関する解析的研究

張 一泳*1・尹 永洙*2

要旨：高強度コンクリート（圧縮強度400—700kgf/cm²）を用いた構造物の耐力や曲げ変形を正確に求める算定手法を提案することを本研究の目的とした。まず、回帰分析を用いた高強度コンクリートの応力—ひずみ関係と台形の応力ブロックを改めて検討してその適用性を確かめた。耐力や変形の解析手法としては、断面を要素分割して材料の応力—ひずみ関係を用いたモーメント—曲率関係の解析を行っており、材料特性の不確定変数や解析時の繰り返し計算などによる誤差を最小限にするために、確率的概念を用いたモンテカルロ・シミュレーション (Monte Carlo Simulation) の方法を導入した。

キーワード：高強度コンクリート、応力—ひずみ関係、応力ブロック、モンテカルロ法

1. はじめに

最近、構造物の超高層化、大型化、そして特殊化に伴い、高強度コンクリートを用いた構造物の解析や設計法などに対する研究が積極的に行われている[1, 2]。多くの構造的な利点があるためにその使用は必然となってきたが、脆性的な破壊による構造的安定性が重要な課題となる。特に、圧縮強度の範囲が広がったコンクリートの応力—ひずみ関係のモデル化、終局耐力の算定に用いられる応力ブロックのモデルの適用性、そして耐力評価だけではない荷重—変形関係として表れる靱性の確保などの問題を明確に究明する必要がある。

そこで本研究では、最近最も多く使われるようになった圧縮強度400kgf/cm²から700kgf/cm²までの範囲にある高強度コンクリートを用いた場合、その構造物の耐力や曲げ変形を正確に求める算定手法を提案することを目的とした。まず、高強度コンクリートの材料モデル化のために、著者らの実験結果と実験条件が類似な既往の応力—ひずみ関係を取り上げ、回帰分析を行って新たな高強度コンクリートの応力—ひずみ関係をモデル化した。また、この関係から台形の応力ブロックを改めて検討して適用性を確かめた。耐力や変形の解析においては、断面を要素分割して材料の応力—ひずみ関係を用いたモーメント—曲率関係の解析を行っており、ここで本研究では、材料特性のばらつきおよびモーメント—曲率の解析手法の誤差などの不確実性を充実に考慮するためにモンテカルロ・シミュレーション (Monte Carlo Simulation) の方法を導入した。すなわち、乱数を発生させて、材料特性の不確定変数や解析時の繰り返し計算などによる誤差を最小限にする確率的概念を用いた解析手法の提案が本研究の特徴である。

2. 材料特性のモデル化

2. 1 高強度コンクリートのモデル化

高強度コンクリート（圧縮強度400—700kgf/cm²）の材料特性のモデル化のために、著者らの実験結果（φ10×20の円柱供試体600本の圧縮強度試験であり、配合比は主に水セメント比と細骨材

* 1 金鳥工科大学助教授 土木工学科、工博（正会員）

* 2 三星建設（株）技術研究所前任研究員、工博（正会員）

率を加減することにより決められた：参考文献[3]参照)と、実験条件が類似な既往の研究[4]から応力-ひずみ関係を取り上げ、回帰分析を用いて新たな高強度コンクリートの応力-ひずみ関係をモデル化した。

図-1で示すように、400、500、600および700kgf/cm²の各強度ごとにモデル化を行った。すなわち、最近一般的に多く使われる設計基準強度の目安としての意味を持つためである。横補強筋などにより強く拘束される場合(参考文献[5]の横補強筋比によって勾配が変化するParkモデルと同様である)と拘束されない場合の二つに分けてモデル化した。

拘束された場合と拘束されていない場合とともに上昇部は急な勾配の曲線の形で表せる。また、下降部においては非拘束条件の場合、勾配が急に落ちる曲線の形となるが、拘束された場合は緩慢に落ちる直線となる。すなわち、高強度コンクリートの場合、構造的に補強しなければ急激に脆性破壊する恐れがあると思われる。

高強度コンクリートのモデルの構成式を表-1に表す。

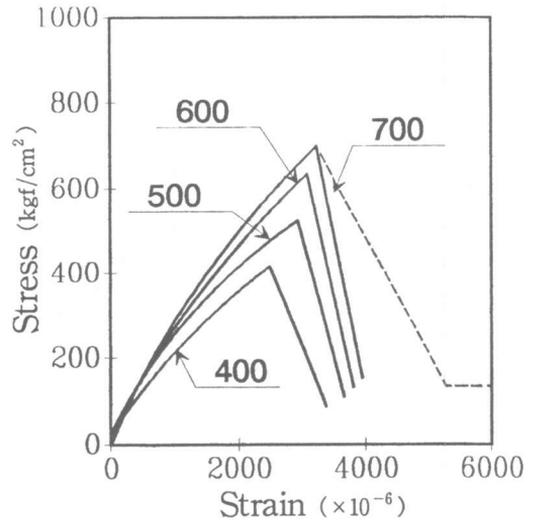


図-1 各強度別の応力-ひずみ関係モデル

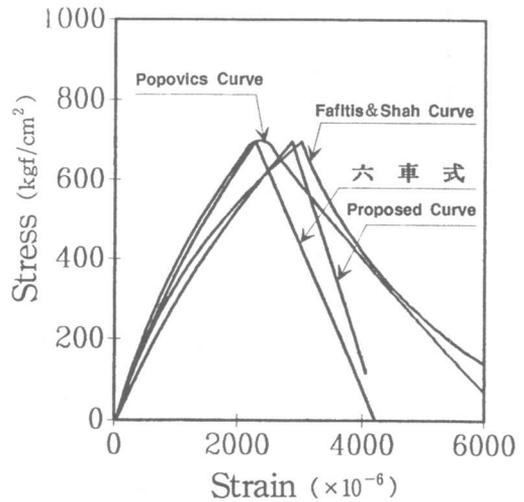


図-2 コンクリート応力-ひずみモデルの比較

表-1 高強度コンクリートの応力-ひずみ関係の構成式

Compressive Strength	Ascent Curve	Descent Curve
400 kgf/cm ²	$f'_c = 7.21 \times 10^4 \epsilon_c^{0.85}$	$f'_c = 706 - 16.4 \times 10^4 \epsilon_c$
500 "	$f'_c = 3.51 \times 10^4 \epsilon_c^{0.71}$	$f'_c = 1355 - 35.8 \times 10^4 \epsilon_c$
600 "	$f'_c = 7.19 \times 10^4 \epsilon_c^{0.81}$	$f'_c = 1623 - 41.7 \times 10^4 \epsilon_c$
700 "	$f'_c = 10.2 \times 10^4 \epsilon_c^{0.85}$	$f'_c = 2353 - 61.1 \times 10^4 \epsilon_c$

図-2で示すように、本研究で提案したモデルと既往のモデル[6, 7, 8]と比較すると、最大圧縮強度とその時のひずみは他のモデルと比べて大きな差はみられない。しかし、下降曲線の勾配がかなり急傾斜となっており、高強度コンクリートの脆性的特性を表現したモデルの中でも最も厳しいモデルであると思われる。これはコンクリートの強度が高くなると下降曲線は、最大圧縮強度以降の落ち始めてからある部分までが測定の限界であり、極限ひずみまでの測定は装置や方法によっても拘るが一般性がないことと、高強度コンクリートの脆性的破壊の性質をもっと厳しく想定して安全側の設計をするためである。

2. 2 鉄筋のモデル化

図-3で示すように、直線と曲線を混合した複合モデルを用いており、ひずみ硬化の効果はParkら[5]の曲線式を用いた。

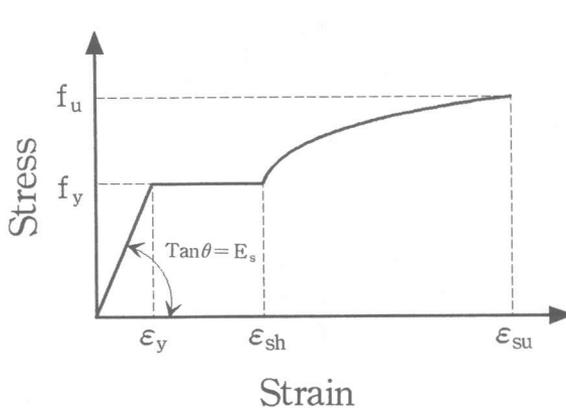


図-3 鉄筋特性の応力-ひずみ関係

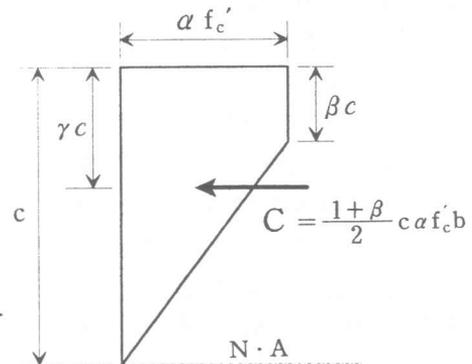


図-4 台形モデル

3. 高強度コンクリートの応力分布モデル

2章で提案した高強度コンクリートの応力-ひずみ関係を基に応力ブロックモデルを検討した。高強度コンクリートに多く使われているモデルとしては、日本土木学会規準[9]およびACI 318 Code[10]の矩形応力ブロックがあり、またACI 363[1]で提案している台形モデル(図-4参照)がある。このようなモデルの中の何を選択しても高強度コンクリートに対する終局耐力の算定に及ぼす影響はほとんど差がないことが知られている[1, 11]。さらに、弾性係数を直接的に用いた三角形モデル[11]もある。高強度化がさらに進むと弾性係数は増加し上昇曲線は線形とみなすことができる。また、下降曲線はもっと急に落ちるために無視することができるために、このような三角形モデルは、本研究で提案した応力-ひずみ関係とのよい適合性も考えられる。しかし、本研究の強度範囲に対して適用すると、計算した中立軸の長さは小さくなって非現実的な値となる。したがって、このモデルは超高強度コンクリートの場合において適用可能であると思われる。そこで本研究では、三角形モデルと矩形応力ブロックモデルとの中間タイプである台形モデルを用いた。これは、曲げ耐力算定の時、釣合鉄筋比以下の場合には、矩形応力ブロックモデルを用いても高強度コンクリートに適用できるが、釣合鉄筋比以上のはりや軸力と曲げが同時に作用する部材では応力分布の取り方で計算結果に相違が見られるという報告[1]の内容にも基因している。すなわち、高強度コンクリートを用いた場合、応力分布はその応力-ひずみ関係との適合性を十分に考慮して決めるべきであると思われる。

4. モンテカルロ・シミュレーションを用いた曲げモーメントー曲率関係の解析

4.1 従来の曲げモーメントー曲率関係

本研究では、耐力や変形の解析において従来の曲げモーメントー曲率関係の解析法を基本としており、断面を要素分割することによって各要素のコンクリートと鉄筋のひずみを求めて、各材料の応力ーひずみ関係と、軸力および内力モーメントの釣合方程式を用いて解析を行った。

4.2 モンテカルロ・シミュレーション法の導入

圧縮強度の範囲が広がった高強度コンクリートを構造材料として使用する時に挙げられる問題は、材料特性のモデル化が未だに明確に確立されておらず、その材料特性のばらつきや脆性的性質などの不確実性の考慮である。また、予想耐力や変形の正確な計算が先決の問題である。

そこで、本研究では高強度コンクリートの材料の不確実性およびモーメントー曲率解析手法の誤差などの不確実性を十分に考慮するためにモンテカルロ・シミュレーションの方法を導入した。すなわち、乱数を発生させて、材料特性の不確定変数や解析時の繰り返し計算などによる誤差を最小限にする確率的概念を従来の曲げモーメントー曲率関係に応用して新たな解析手法を提案した。本研究で用いた不確定変数と解析手法を説明すると以下のようなものである。

(1) 材料特性の不確定変数

- ①コンクリートの最大圧縮強度
- ②コンクリートの最大圧縮強度時のひずみ
- ③コンクリートの極限ひずみ
- ④鉄筋の降伏強度
- ⑤鉄筋の弾性係数
- ⑥鉄筋の硬化開始ひずみ

(2) 曲げモーメントー曲率関係解析の不確定変数

- ⑦釣合軸力およびモーメントの許容限界値における信頼指数
- ⑧降伏時における曲率の信頼指数
- ⑨最大モーメント時における曲率の信頼指数

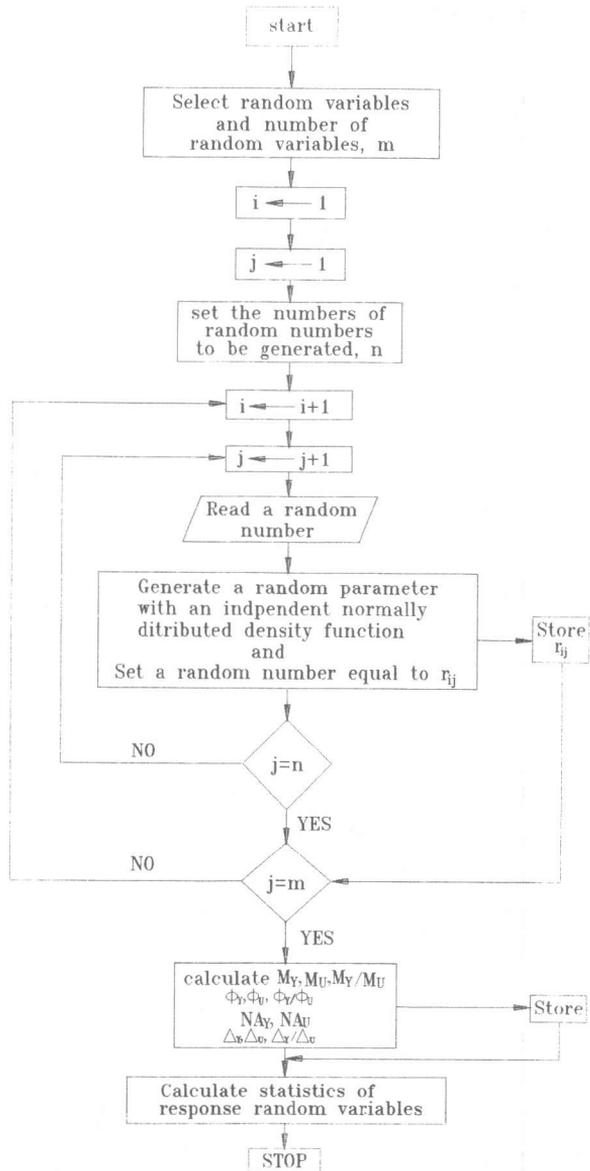


図-5 モンテカルロ・シミュレーション手法のフローチャート

材料特性の不確実性を考慮するために、①—⑥の不確定変数に対する確率密度関数となる一様乱数を発生させる。この分布を任意の確率分布関数に変換し、Simpson Complex公式を利用して正規型確率分布値を求める。このように求められた正規型確率分布値(U)と不確定変数の平均値(\bar{x})や標準偏差(σ_x)を用いて推定値(x)とする(式(1))。また、曲げモーメント—曲率関係解析の不確実性を考慮するために、一様乱数分布から任意の確率分布関数に変換し、Bi-Linear形に簡略化する。また、⑦—⑨の不確定変数から求めた限界値(a,b)と確率分布関数(Pi)を利用して推定値(x)を求める(式(2))。最終的にはこれらの推定値を平均して確定値とする。

$$x = \bar{x} + U\sigma_x \quad (1)$$

$$x = a + (b-a)(Pi-0)/(1-0) \quad (2)$$

モンテカルロ・シミュレーションの手法のフローチャートを図-5に示す。

4.3 解析手法の応用例

本研究の解析手法は曲げ挙動をするはり部材および柱部材を対象として、曲げモーメント—曲率関係と荷重—変位関係などを精度よく算定できると思われる。また、部材の塑性ヒンジ領域などを考慮すればもっと簡単に耐震壁などの応答減少係数(Response Reduction Factor)を信頼性のあるものとして求めることができると思われる。

解析例としては、圧縮強度700kgf/cm²の高強度コンクリートを用いた柱部材(軸力がないので片持ちばりと同様である)の曲げ耐力や変位量を実験値[12]と比較した。実験供試体の寸法としてせん断スパン比は3.5で、断面の大きさ12.5×25cm、有効高さ22cmおよび部材高さ77cm(部材全長87cm)である。曲げ挙動をさせるために軸力をかけないで、D13(SD40)を4本配筋して軸鉄筋比を1.6%とした。また、曲げ破壊以前にせん断破壊を起こさないように、帯鉄筋を十分に配筋した。実験の変動因子としては単調載荷と一方向繰り返し載荷を行っている。

図-6および図-7は、このような実験結果に対する解析値の比較であり、比較的精度のよい結果が得られた。

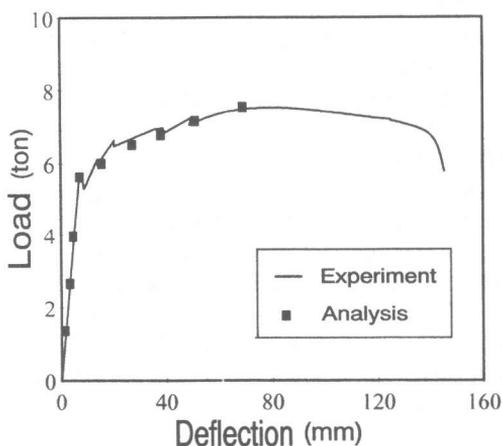


図-6 単調載荷時の荷重—変位関係

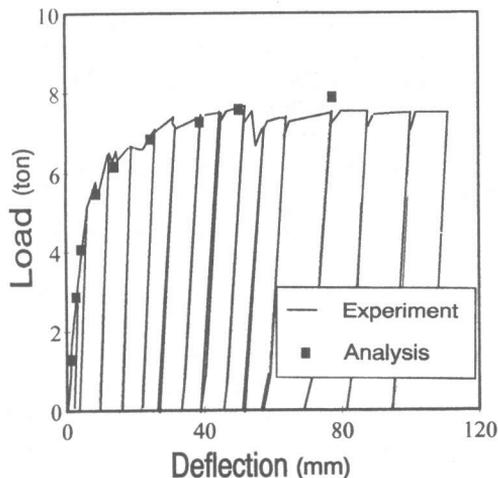


図-7 一方向繰り返し載荷の荷重—変位関係

5. まとめ

本研究で得られた結果を要約すると、以下のようになる。

- (1) 最近一般的に使われる設計基準強度の目安としての意味を持つために、400、500、600 および700kgf/cm²の各強度ごとにモデル化を行い、また応力分布として台形モデルを用いて解析を行った結果、曲げ耐力を精度よく評価できることが明かとなった。
- (2) 耐力や変形の解析において、断面を要素分割して材料の応力-ひずみ関係を用いたモーメント-曲率関係の解析を行っており、本研究では、材料特性のばらつきおよびモーメント-曲率の解析手法の誤差などの不確実性を十分に考慮することができるモンテカルロ・シミュレーションの方法を導入し、良い結果が得られた。すなわち、この手法より曲げモーメント-曲率関係や荷重-変位関係などを精度よく算定できると思われる。

謝 辞

本研究は、韓国建設交通部と韓国建設技術研究院の建設技術研究開発事業の一環として行われた研究課題”国内実情に合う高強度コンクリートの開発および実用化研究”の一部であり、三星建設(株)の技術研究所の李昇勲主任、中央試験室の朴喜民室長、成相来課長、白承峻主任、漢陽大学の申成雨教授および金鳥工科大学の宋在浩教授、崔光真君の多大なるご協力を戴きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) ACI 363: State of the Art Report on High Strength Concrete^{*}, ACI363R-92, American Concrete Institute, Detroit, 1992
- 2) 日本建築学会: 高強度コンクリートの技術の現状、1991
- 3) 三星建設(株)中央試験室: 高強度コンクリートの最適配合比に関する研究、技術報告書、1992
- 4) 例えば、岡本 伸・柳下文夫: 高強度コンクリートの応力-ひずみ特性、JCI, Vol. 14, No. 3, 1976. 4
- 5) Kent, D. C. and Park, T.: Flexural Members with Confined Concrete, Proceedings of ASCE, Vol. 197, No. ST7, pp. 1969-1991, July 1971
- 6) Shah, S. P. and Fatitis, A.: Lateral Reinforcement for High-Strength Columns, ACI SP-87 High-Strength Concrete Symposium, pp. 213-232, 1985
- 7) Popovics, S.: A Numerical Approach to the Complete Stress-Strain Curve of Concrete, Cement and Concrete Research, Vol. 3, No. 4, pp. 583-599, 1973
- 8) 六車 熙・長井栄治: コンクリートの圧壊ひずみに関する研究、セメント技術年報、Vol. 30, pp. 362-365, 1976
- 9) 日本土木学会: コンクリート標準示方書(設計編)、1991
- 10) ACI 318: Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318 M-89/ACI 318R-89), American Concrete Institute, Detroit, pp. 108-109, 1989
- 11) Shin, S. W. et al: Flexural Ductility, Strength Prediction and Hysteretic Behavior of Ultra-High-Strength Concrete Members, ACI SP-121, High-Strength Concrete Second International Symposium, pp. 239-264, 1990
- 12) Samsung Engineering & Construction Co LTD. Institute of Technology: The Application of High-Strength Concrete and The Development of Construction Technology on Ultra High-Strength Concrete, Technical Report 92017, 1992. 12