

論文 コンクリートの応力ひずみ関係を利用した RC 柱部材のじん性向上

須田久美子*1・村山八洲雄*2・宮利通*3・新保弘*4

要旨: 通常のコンクリートと比較して、弾性係数は同程度のままで、最大応力度に達する時のひずみが1.5倍以上になるように調整したコンクリートを使用して、RC柱部材の地震時における変形性能を向上させる方法を提案した。高剛性試験機を用いて実施した圧縮試験により、当該コンクリートの最大応力度以降における軟化域を含む応力ひずみ関係を明らかにし、斜張橋のタワーや高橋脚を対象とした柱部材について地震荷重を想定した交番繰り返し曲げせん断加力及び履歴解析を実施し、提案した方法によるじん性改善効果を確認した。

キーワード: 鉄筋コンクリート、橋脚、主塔、応力ひずみ関係、じん性

1.はじめに

橋脚や斜張橋のタワー等は、巨大地震時においても橋梁の崩壊を免れるために十分な変形性能を有する必要がある。このためには、部材の断面を大きくして部材軸方向の鉄筋(柱筋)比をあまり大きくなり過ぎないように設定したり、部材軸直角方向の鉄筋の配筋方法を工夫する等が考えられる。しかし、長大斜張橋のタワーや高橋脚等では橋梁全体の慣性力に及ぼす橋脚自身の重量による影響が大きくなるため、断面寸法を極端に大きくできない上に、中空断面が採用される傾向にある。

ここでは、こうしたRC柱部材のじん性を改善する方法の自由度を広げるために、施工が容易で他の改善策と併用可能な方法として、コンクリートの応力ひずみ関係を利用してRC柱部材の変形性能を大きくする方法を提案する。一般に繊維補強コンクリートなどによる高じん性材料を使用すれば、コンクリートの圧壊ひずみが大きくなるので、曲げ破壊が支配的な部材の変形性能を改善できるであろうことは容易に想像できるが、施工性に問題があることから新規の場所打ち部材に使用されるケースは非常にまれである。提案する方法では、施工性を阻害する特殊な混和材を使用することなく、通常のコンクリートと弾性係数は同程度のままで、最大応力時のひずみが1.5倍以上になるようなコンクリートを製造する。

2.材料試験

曲げ部材における圧縮部コンクリートの基本的な応力ひずみ特性を把握するため、高剛性圧縮試験機を用いて最大応力度以降の軟化域を含む応力ひずみ関係を測定した。

2.1 試験方法

圧縮試験方法は図-1に示すとおりである。テストピースにはφ10cm×20cmを使用し、テストピースの両端にはテフロンシートをはさんで端面拘束の影響を取り除いた。ひずみの測定はテストピースの中央(検長100mm)に取り付けたコンプレッソメー

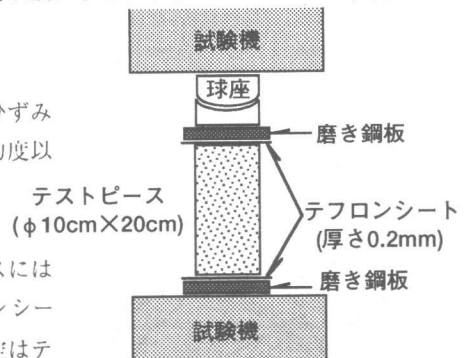


図-1 圧縮試験の方法

*1 鹿島建設(株) 技術研究所、第一研究部第1研究室、主任研究員(正会員)

*2 鹿島建設(株) 技術研究所、第一研究部専門部長(正会員)

*3 鹿島建設(株) 土木設計本部、第二設計部、工修(正会員)

*4 鹿島建設(株) 技術研究所、第一研究部第1研究室、工修(正会員)

タにより行った。加力はひずみ制御(約 $300 \times 10^{-6}/\text{min}$)とした。

2.2 配合

表-1に圧縮試験を実施したコンクリート及びモルタルの配合表を示す。配合No.1には表-2のように化学成分を調整した結合材を使用した。参考として、通常のコンクリート及びモルタル(配合No.2~4)の試験も実施した。

2.3 試験結果

表-1に圧縮強度と最大応力時のひずみを、図-2に測定した応力ひずみ関係を示す。

(a)では最大ひずみが増加するように化学成分を調整した結合材を使用した配合No.1(骨材の最大寸法は $G_{\text{max}}=5\text{mm}$)と通常の早強セメントを使用した配合No.2($G_{\text{max}}=5\text{mm}$)、No.3($G_{\text{max}}=10\text{mm}$)及びNo.4($G_{\text{max}}=20\text{mm}$)を比較した。No.2~No.4の最大応力時のひずみが $2,000 \sim 3,000 \times 10^{-6}$ 程度であるのに対し、No.1ではその1.5倍以上であった。

(b)は配合No.1の材令1か月と一年の結果を比較したものであるが、材令による応力ひずみ特性への影響はほとんどなく、いずれも最大応力時のひずみが $5,000 \sim 6,000 \times 10^{-6}$ 程度になった。

表-1 配合表

配合No.	骨材の最大寸法(mm)	水結合材比(%)	単体量(kg/m^3)			
			水	結合材	細骨材	粗骨材
1	5	47.0	298	634	1266	-
2	5	50.0	253	506	1517	-
3	10	49.6	170	343	809	953
4	20	36.0	169	470	693	986

- すべての配合で高性能AE減水剤を使用
- 配合No.1の結合材の化学成分は表-2参照
- 配合No.2の結合材は早強[®]ルラント[®]セメント:シリカフューム=9:1
- 配合No.3,4は早強[®]ルラント[®]セメントを単味使用

表-2 配合No.1の結合材の化学成分

lg-loss	Insol	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
2.6	0.2	18.3	6.5	2.5	60.7	1.4	6.5

表-3 圧縮強度と最大応力時のひずみ

配合No.	圧縮強度(kgf/cm^2)		最大応力時のひずみ($\times 10^{-6}$)	
	平均	平均	平均	平均
1	514	511	4,710	5,160
	506		5,220	
	514		5,540	
	(525)		(5,300)	
2	615	614	2,970	2,930
	613		2,880	
3	447	439	1,900	1,870
	445		1,900	
	426		1,800	
4	395	419	1,420	1,690
	434		1,760	
	427		1,880	

()内は材令1年、他は材令1カ月

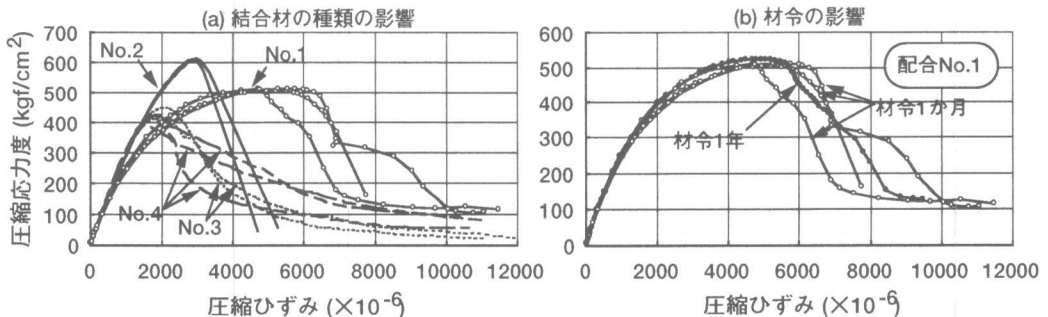


図-2 応力-ひずみ関係の測定例

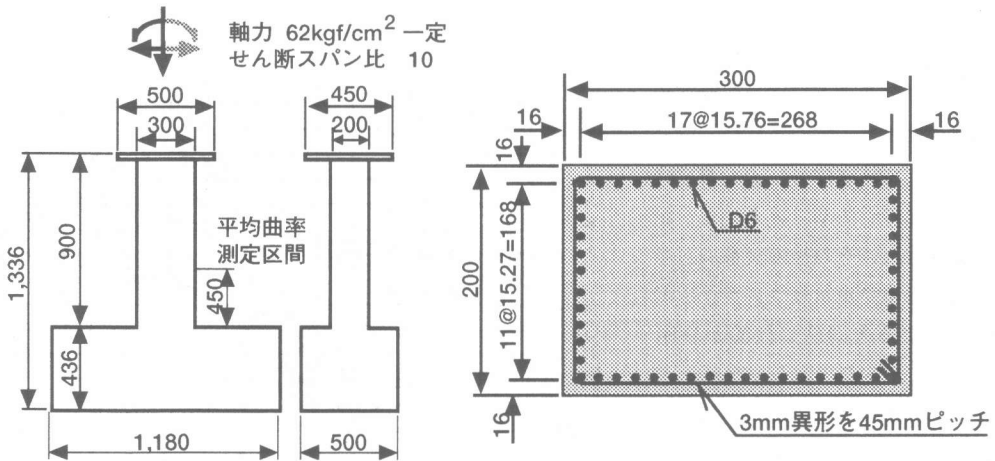


図-3 試験体形状と配筋

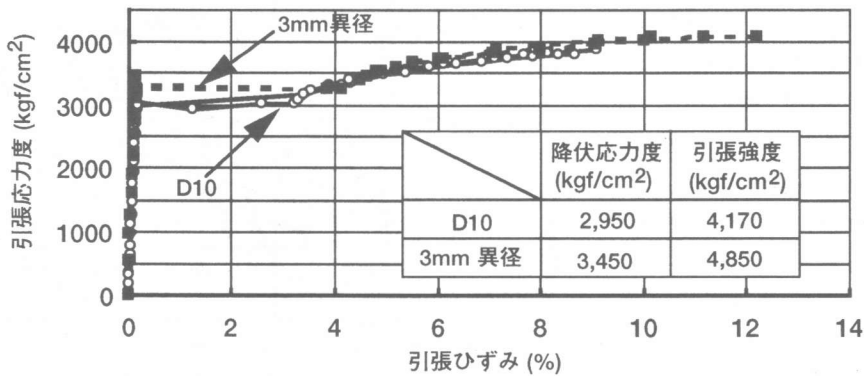


図-4 鉄筋の応力-ひずみ関係

3. 模型実験

前節の材料試験で検討した配合No.1、No.2、No.3のマイクロコンクリートを用いて製作した同一配筋のRC柱部材試験体の交番繰り返し曲げせん断加力実験を行った。

3.1 試験体

試験体の形状寸法及び断面の配筋図を図-3に示す。使用した鉄筋の材料特性は図-4のとおりである。

3.2 加力方法

加力は試験体の柱頭部に任意の組み合わせ加力が可能な装置を用いて、曲げモーメントとせん断力（せん断スパン比は10）を交番繰り返し加力した。軸圧縮応力度は斜張橋のタワーや高橋脚相当として 62kgf/cm^2 を設定した。

加力制御は基本的に柱筋降伏以前は荷重制御、それ以降は降伏時曲率の整数倍の曲率で変形制御とした。降伏時の曲率 ϕ_0 は、道路橋示方書・耐震設計編の方法[1]によりあらかじめ求めた柱筋降伏時の荷重をもとに配合No.3の試験体で $15 \times 10^{-6}/\text{mm}$ と設定し、配合No.1及びNo.2の試験体においてもこの曲率をもとに制御した。実験では変形制御用の曲率として柱基部測定区間(図-3参照)における平均曲率を用い、断面の隅角部4箇所ですべて計測された相対変位をもとにこれを求めた。

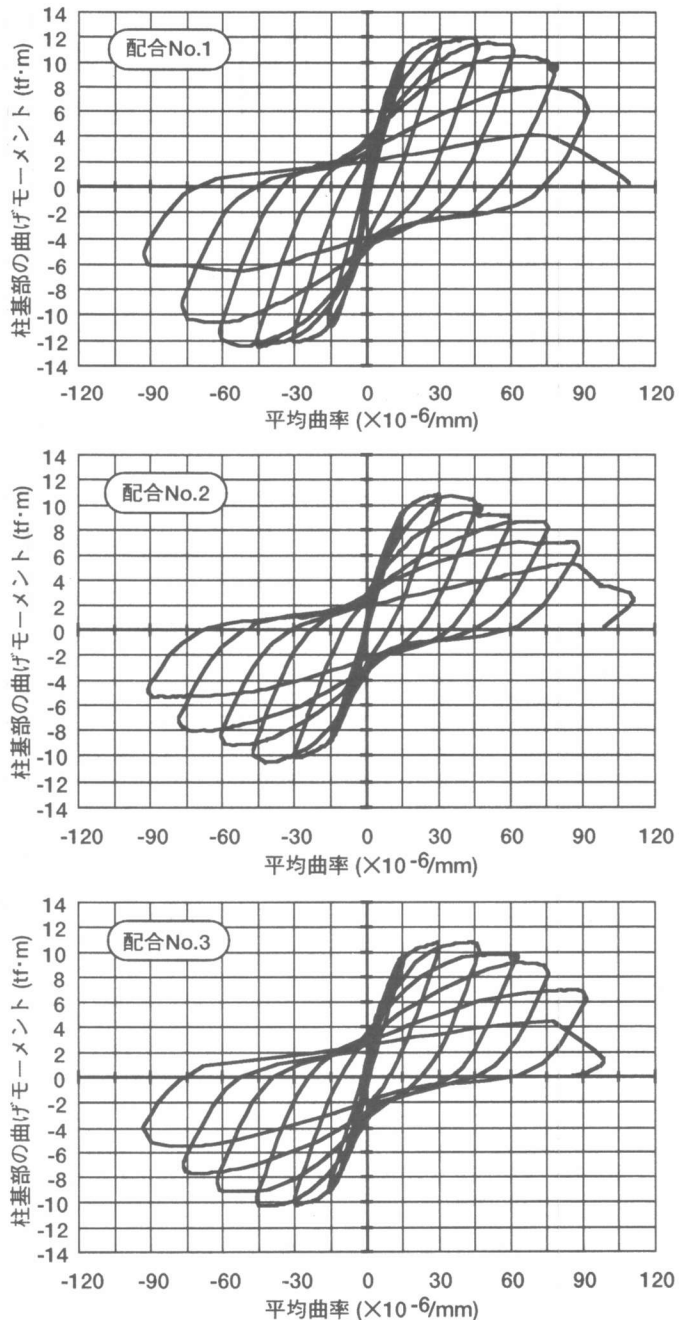
3.3 実験結果

図-5にそれぞれの試験体における柱基部の曲げモーメントと平均曲率の関係を示す。

いずれの試験体も、最大荷重時に柱基部の隅角部コンクリートが一部剥離し、その後の交番加力で柱筋に沿ってかぶりコンクリートが剥離すると同時に柱筋が座屈し、さらに内部のコンクリートが劣化・剥落して破壊に至った。配合No.1では $5\phi_0$ で柱筋が座屈したのに対し、No.2及びNo.3では $4\phi_0$ で座屈した。

じん性を、最大荷重を経験した後に降伏時荷重まで荷重が低下したとき(図中●)の曲率と柱筋降伏時の曲率との比と定義すると、No.1($G_{max}=5mm$)とNo.2($G_{max}=5mm$)のじん性はそれぞれ5及び3であり、No.1は明らかにじん性が大きくなった。骨材の最大寸法が大きいNo.3($G_{max}=10mm$)のじん性は4であり、No.1はこれと比較してもじん性が大きかった。骨材の最大寸法が大きいNo.3は最大寸法の小さいNo.2よりもじん性が大きくなったが、この理由としては粗骨材によるスムーズなひびわれ伝播の阻害や骨材のかみ合い効果などにより、柱筋周辺コンクリートを劣化させるのにより大きなエネルギーを必要としたためと考えられる。

いずれにしても今回の実験の範囲では、マイクロコンクリートの最大応力時のひずみを大きくした配合No.1の場合のじん性が最も大きく、実験的に改善効果が確認された。



(●印は最大荷重以降に降伏荷重まで低下した点を示す)

図-5 曲げモーメントと曲率の関係

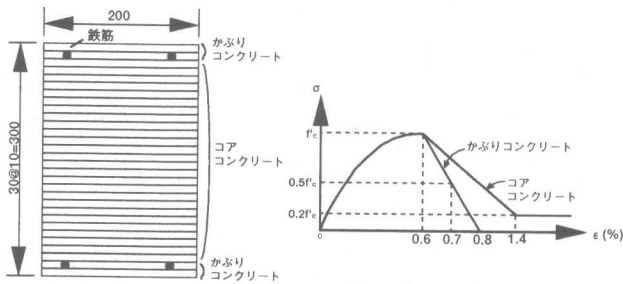


図-6 解析モデル

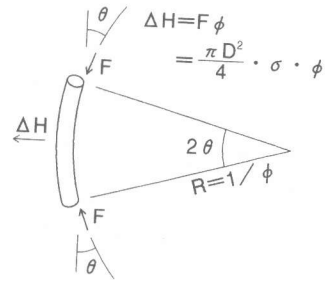


図-7 曲率を持った柱筋

4. 履歴解析

模型実験により、地震荷重を想定した交番繰り返し荷重下において、コンクリートの σ - ϵ 関係を利用してじん性を改善できる見通しがえられたので、ここではさらに改善効果を定量的に把握することを目的として、ファイバーモデルを用いた鉄筋コンクリート柱部材の履歴解析を行った。

4.1 解析方法と解析モデル

解析方法としては、平面保持を前提にRC柱部材を幾つかの断面に分割し、さらに断面をファイバーに分割して、その各々のファイバー毎に部材軸方向の応力-ひずみ関係を考える、いわゆる「ファイバー法」を用いた。解析モデルを図-6に示す。かぶりコンクリートの応力ひずみ関係の包絡線は材料試験の結果をもとに設定し、コアコンクリートではPark&Paulayの方法[2]でこれを修正した。鉄筋には加藤モデル[3]を使用し、累積塑性ひずみが破断ひずみ(20%)に達した時点で柱筋の破断と判定した。模型実験では柱基部の測定区間(45cm)における平均曲率で制御したので、解析はこの区間だけを対象とした。

柱筋座屈の判定[4]は次の手順で行った。

(a) 曲率を持った柱筋に圧縮力が作用するとき生じる水平力、すなわち柱筋の応力度と部材の曲率との積の関数で表わされる力 ΔH が全てかぶりコンクリートの割れ裂き力に相当すると仮定して、柱筋間のコンクリートに作用する割れ裂き応力 Δh を求める(図-7参照)。

(b) 柱筋位置のコンクリートが過去に経験した最大の圧縮ひずみ量から、柱筋周辺コンクリートの割れ強度 f_t を求める。

(c) $\Delta h > f_t$ になったときに柱筋が座屈を開始したと判定する。

4.2 模型実験結果のシミュレーション

解析方法の妥当性を検討するために模型実験結果のシミュレーション解析を実施した。コンクリートの応力-ひずみ関係の包絡線は材料試験結果を基に図-6のように設定した。

図-8に配合No.1の場合の実験結果(実線、矢印で座屈が観察された時期を併記)と解析結果(点線、●解析上の座屈点)を対比して示す。実験結果と解析結

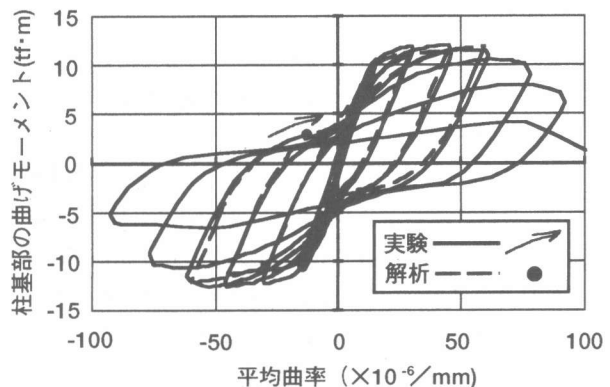


図-8 実験値と解析値の対比

果は良く一致しており、柱筋の座屈時点についても解析結果は目視観察で確認された時期と良く対応している。他の試験体についても同様に、実験結果と解析結果は良く一致していた。

4.3 パラメータ解析結果

中空箱型断面部材を対象に軸力のレベルに応じて断面の終局時の塑性率がどのように変化するかを、通常のコンクリートを使用した場合と最大応力時のひずみが大きくなるように結合材の化学成分を調節した場合について解析的に比較検討した。

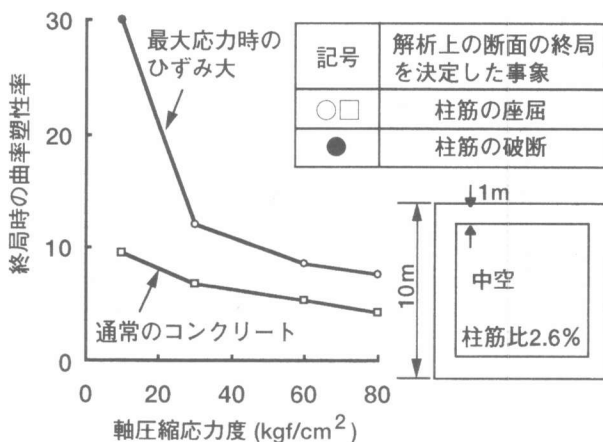


図-9 軸力と終局時曲率塑性率の関係

図-9に軸力と終局時の曲率塑性率の関係を示す。最大応力時のひずみが大きい場合には軸力の大きさにかかわらず、通常のコンクリートよりもじん性率が大きく、事象の異なる場合(●)を除いておよそ通常コンクリートの約1.8倍であった。このことは、長大斜張橋のタワーや高橋脚など軸力レベルの大きい中空断面部材のじん性率を提案する方法により容易に改善できる可能性を示唆している。

5.まとめ

最大応力時におけるひずみが通常コンクリートの約1.5倍以上になるように結合材の化学成分を調整したコンクリートを使用して、RC柱部材の地震時における変形性能を向上させる方法を提案し、その改善効果を模型実験及び履歴解析により確認した。主な検討結果をまとめると次のとおりである。

- 高剛性試験機による圧縮試験により、端面拘束の影響を取り除いた状態の応力-ひずみ関係を測定した結果、結合材の化学成分を調整することにより、弾性係数は通常のコンクリートと同程度のままで、最大応力時におけるひずみを大きくすることが可能であることを明らかにした。
- RC柱部材の模型実験により地震荷重を想定した交番繰り返し曲げせん断加力実験を行って、ここで提案した方法によりじん性の改善が図れることを確認した。
- 解析的な検討により、提案した方法を中空断面を有する高軸力部材に適用した場合にも改善効果が期待できることを確認した。

今回は、試作した結合材による改善効果を把握する目的でマイクロコンクリートによる基礎的特性の把握を中心に実施したが、さらに実構造物への適用を図るためには、最適化学成分の組み合わせやコンクリートへの応用などを検討する必要がある。

参考文献

- [1] (社)日本道路協会:道路橋示方書 V耐震設計編, pp.73-77, 1990.2
- [2] Park, R. and Paulay, T.: Reinforced Concrete Structures, A Wiley-Interscience Publication pp.254-255
- [3] Kato B., Akiyama H., Yamanouchi Y.: Predictable Properties of Materials under Incremental Cyclic Loading. IABSE Reports, Vol.13, Lisbon, pp.119-124, 1973
- [4] 村山, 須田, 一宮, 新保: 交番繰り返し荷重下における柱筋の座屈モデル, 鹿島建設技術研究所年報 第42号, pp.93-98, 1994.10