

論文

[2074] 高強度コンクリートを用いたRC柱の曲げ変形性能に関する実験的研究

正会員 ○境 有紀 (東京大学大学院)
 日比 純一 (東京大学大学院)
 正会員 小谷 俊介 (東京大学工学部)
 正会員 青山 博之 (東京大学工学部)

1. はじめに

鉄筋コンクリート造建物の高層化に伴い、圧縮強度500kgf/cm²程度以上の高強度コンクリートを用いたRC部材の開発、実用化に対する要求が高まっている。そのためには、強度と靱性能を定量的に把握しなければならないが、高強度コンクリートを用いたRC部材は、高強度コンクリートの脆性的な性質から、普通強度のコンクリートに比べて靱性能確保が難しい。本研究では、圧縮強度1000kgf/cm²程度の高強度コンクリートを用いた、曲げ変形の卓越するRC柱の曲げせん断実験を行ない、その靱性能と帯筋量および配筋方法の関係について検討した。

2. 実験方法

2.1 試験体 試験体のパラメーター一覧を表1に、配筋図を図1に示す。超高層建物(住宅で60階、事務所で30階程度)の曲げ変形が卓越する1階柱を想定し、固定因子は断面寸法(25×25cm)、せん断スパン比(2.0)、コンクリート設計基準強度(1000kgf/cm²)とした。変動因子は、部材の靱性能に影響を与える因子、帯筋量(pw・wσy=20, 40, 60kgf/cm²)、帯筋強度(wσy=4000, 8000, 12000kgf/cm²)、帯筋径(5φ, 7φ)、中子の有無、主筋の配筋(12-D13(pg=2.44%, pt=0.82%), 4-D19(pg=1.84%, pt=0.92%))、軸力比η(軸力/全断面積/コンクリート圧縮強度=0.35, 0と0.5)とした。各試験体の関係を模式的に図2に示す。

2.2 使用材料 コンクリートは設計基準強度1000kgf/cm²程度の高強度コンクリート、主筋にはSD35~SD40相当の異形鉄筋、帯筋には降伏強度3500~12000kgf/cm²程度の丸鋼溶接フープを使用した。使用材料の特性を表2に示す。コンクリートの値は、軽量モールドで現場養生した10φピースの材

表1 試験体一覧

ID	主筋	η	帯筋			
			配筋	pw	wσy	pw・wσy
B1	12-D13	0.35	4- 5φ	0.50	7892	39.5
B2	12-D13	0.35	4- 5φ	0.75	7892	59.2
B3	12-D13	0.35	4-5.5φ	0.61	3507	21.2
B4	12-D13	0.35	4- 5φ	0.50	11482	57.4
B5	12-D13	0.35	2- 5φ	0.50	7892	39.5
B6	12-D13	0.35	2- 7φ	0.50	8738	43.7
B7	4-D19	0.35	2- 5φ	0.50	7892	39.5
B8	12-D13	0, 0.5	4- 5φ	0.75	7892	59.2

η: 軸力比=軸力/全断面積/コンクリート圧縮強度
 pw: 帯筋比(%), wσy: 帯筋強度(kgf/cm²)

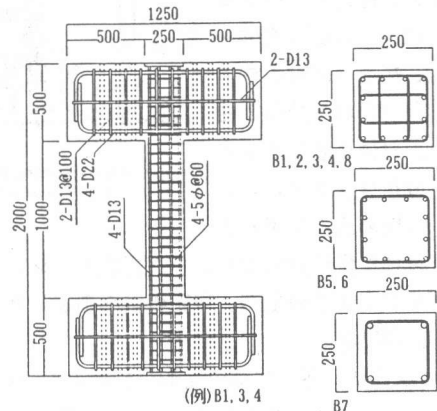


図1 配筋図

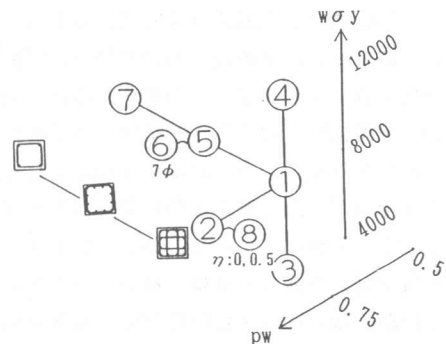


図2 各試験体の関係

料試験を試験体加力とほぼ同時に行ない、その値の平均値をコア抜き相当に換算した値とした。

2.3 加力方法 加力装置を図3に示す。加力は、2000ton大型構造物試験機で一定軸力をかけた状態で、上スタブと下スタブの平行を維持し、軸力を一定に保つように試験体の両側に2本のジャッキにより制御しながら、試験部分の中央高さの水平ジャッキで正負交番繰り返し加力を行なった。B1～B7は一定軸力(軸力比0.35)とし、B8は正方向で軸力比0.5、負方向で0と、正負それぞれの方向で一定軸力とした。

加力履歴を図4に示す。加力は変位制御とし、変形角にして1/200を1サイクル行なった後、1/100、1/50、1/25を2サイクルずつ行なった。また、1/50と1/25の加力の間に1/100の加力を1回行なった。

2.4 測定方法 柱にかかる水平力、軸力をロードセルにより、柱の層間変位、軸変位、端部の回転、柱の材軸方向のたわみ分布と曲率分布、材軸に直交する方向の歪分布を、コアコンクリートに埋め込んだボルトに取り付けた変位計により、また箔歪ゲージによって主にヒンジ領域の主筋、帯筋の歪を測定した。

3. 実験結果

3.1 破壊性状 各試験体の変形角1/50の1サイクル目のひび割れ状況を図5に示す。一定軸力下の試験体(B1～B7)は、いずれも主筋の圧縮降伏、コンクリートの圧壊が、主筋の引張降伏より先行し、最大耐力が決まった。その後、中段筋沿いに圧縮ひび割れがはいり、コンクリートの圧壊が進み、最終的には軸力を保持できなくなって破壊(以下最終破壊と呼ぶ)に至った。中子のあるB1～B4は、材端部のかぶりコンクリートの剥落後もすぐには大きな破壊には至らず、最終的には部材中央部でもかぶりコンクリートが剥落して破壊に至った。これに対して、中子の無いB5～B7は、かぶりコンクリートの損傷が進まないうちに最終破壊に至った。

正と負で軸力の異なるB8は、軸力比の大きい正側では一定軸力下の試験体とほぼ同様の破壊性状を示したが、軸力比の小さい負側では主筋が引張降伏し、コンクリートの圧壊は見られなかった。

3.2 復元力特性 P-Δ効果を補正した水平力-水平変位関係を図6に示す。各試験体の復元力特性を比較すると次のようになる。

表2 材料特性
(1) コンクリート

圧縮強度 (kgf/cm ²)	弾性係数 (kgf/cm ²)	割裂強度 (kgf/cm ²)
1015	3.39x10 ⁵	55.5

(2) 鉄筋

材料名	E _s	σ _y	ε _y	σ _m
D13 (SD40)	1.867	3867	2071	5816
D19 (SD35)	1.849	3458	1870	5221
5φ (SR80)	2.035	7892	3878	8741
7φ (SR80)	2.123	8738	4117	9516
5.5φ (SR35)	2.080	3507	1686	3888
5φ (SR120)	1.876	11482	6126	13405

E_s:弾性係数(10⁶kgf/cm²), ε_y:降伏歪(μ)
σ_y:降伏強度, σ_m:引張強度(kgf/cm²)

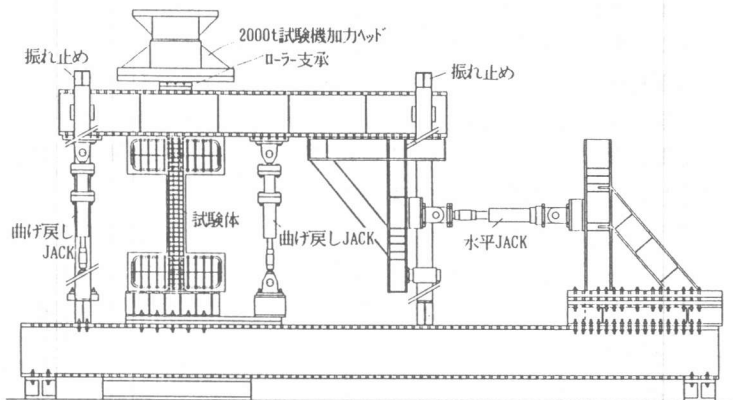


図3 加力装置

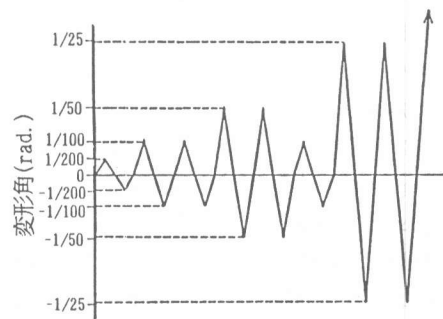


図4 加力履歴

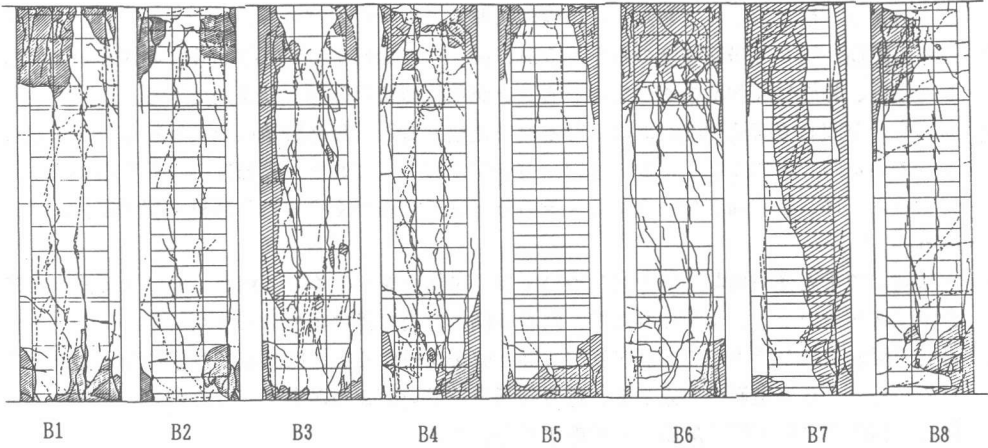


図2 ひび割れ状態

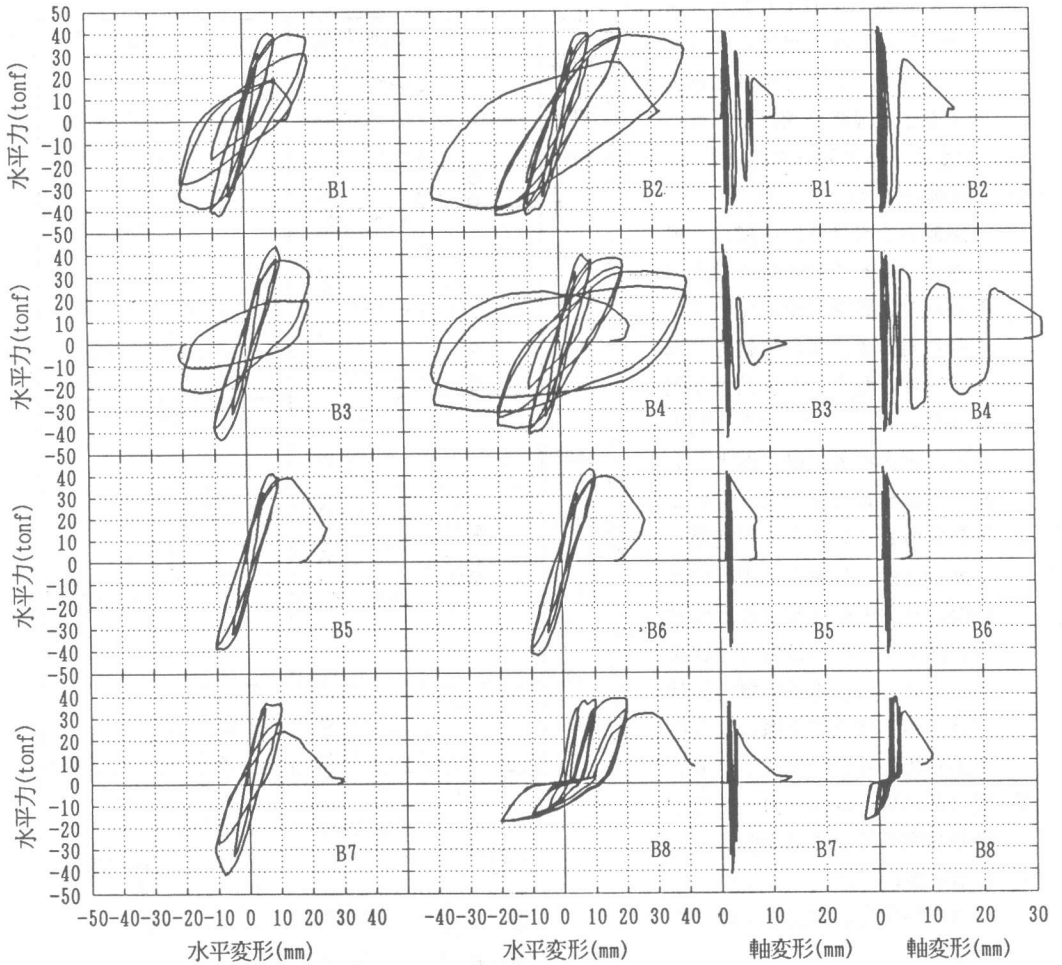


図3 荷重-変位関係

図4 軸変形

- ① p_w 、 $p_w \cdot w \sigma_y$ が等しい B1 と B5 を比較すると、中子の無い B5 は耐力低下、最終破壊ともに中子のある B1 より早期に起こっており、その性状に非常に大きな差がある。
- ② 帯筋の配筋が同じで帯筋強度のみが異なる B1、B3、B4 を比較すると、帯筋強度の大きいほど靱性能に富み、帯筋に高強度のものをを用いることが部材の靱性確保に効果的である。
- ③ $p_w \cdot w \sigma_y$ が同じで帯筋強度が異なる B2 と B4 を比較すると、最終破壊は B4 より B2 の方が早期に起こっているが、耐力の低下は B2 より B4 の方が早く起こっており、高強度の帯筋を粗いピッチで配するよりは、帯筋強度を小さくし、その分ピッチを細かくする方が部材の靱性確保に効果がある。
- ④ p_w は同じで帯筋径が異なる B5 と B6 については、帯筋径を小さくして細かいピッチで配した B5 の方が性状がよいことが予想されたが、両者の間に有為な差は認められなかった。
- ⑤ 帯筋の配筋は同じで主筋の配筋が異なる B5 と B7 を比較すると、B7 は B5 より早期に耐力低下を生じている。これは主筋の拘束効果、軸方向筋量の違いの 2 つが考えられるが、いずれにしても部材の靱性評価に主筋の配筋をも考慮する必要がある。
- ⑥ 試験体 B2 と同じ配筋で軸力の異なる B8 は、軸力の無い負方向では、耐力は低いですが耐力低下は起こさず、軸力が B2 より大きい正方向では最大耐力は B2 とほぼ同じだったが、B2 より早期に耐力低下を生じ最終破壊に至った。

3.3 軸変形 各試験体の軸変形－水平荷重関係を図 7 に示す。

- ① 一定軸力を受ける B1～B7 は、繰り返し変形を受ける度に軸変形が蓄積し、破壊に至っている。これに対して、正負で軸力の異なる B8 は、軸変形が蓄積する現象は見られないが、B2 と比較すると、正方向では軸力が大きいいため軸変形は大きくなっている。
- ② 試験体 B1 とこれと同じ帯筋量 ($p_w \cdot w \sigma_y$) をもち、中子の無い B5、B6、B7 を比較すると両者は、途中まではほぼ同じ性状を示しているが、中子の無い試験体は、ある地点で急激に軸変形が進み最終破壊に至っている。
- ③ 同じ帯筋量 ($p_w \cdot w \sigma_y$) を有し、帯筋強度の異なる B2 と B4 を、同じ水平変形で比較すると B2 より B4 の方が軸変形が大きくなっている。

3.4 帯筋の歪 各変形角の 1 サイクル目のピーク時の帯筋の歪を試験

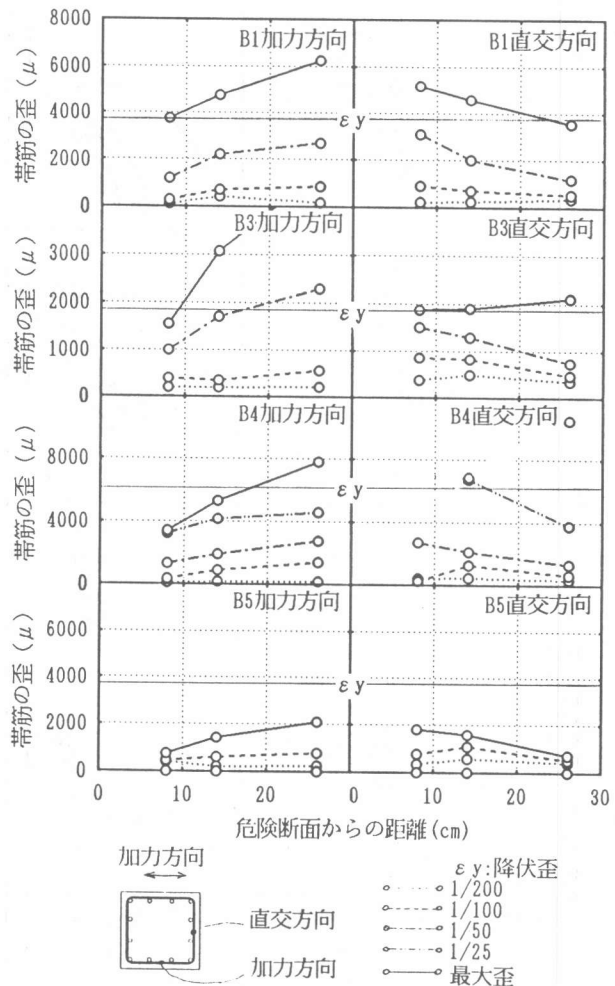


図 8 帯筋の歪

体B1、B3、B4、B5の外周フープを例として図8に示す。なお、最大歪とは部材が最終破壊に至るまでに歪ゲージで測定し得た最大の歪を表わす。

まず、加力方向とそれに直交する方向の帯筋の歪を比較すると加力方向では部材の中央部に近い領域まで歪が大きくなっているのに対して、加力方向に直交する方向の帯筋は、部材端に近いほどその歪が大きくなっている。これは、加力方向の帯筋はせん断補強筋としての役割が強く、せん断力は部材全長にわたって一定であるのに対して、加力方向に直交する方向の帯筋は拘束筋としての役割が強く、モーメントが大きくなる部材端ほど歪が大きくなったと考えられる。

次に、中子のあるものと中子の無いものを比較すると、中子のあるものは、帯筋の歪が降伏歪近くまで達しており、帯筋が効力を発揮しているのに対し、中子の無いものは、帯筋の歪が小さいうちに最終破壊に至っており、帯筋が効力を発揮しないうちに破壊に至ったのがわかる。

3.5 帯筋による横拘束力と部材の靱性能の関係

帯筋による横拘束力と部材の靱性能の間には密接な関係があると考えられる。そこで、試験体B1、B3、B4、B5について、横拘束力と部材の靱性能の関係について考察する。

水平耐力と横拘束力の関係を図9に示す。横拘束力は部材の材軸方向で最も大きくなった危険断面から部材せい位置における帯筋について示した。横拘束力は、帯筋の材軸方向の伸びによる力によって供給されると仮定し、図10に示すものと定義した。図10に示された力は、帯筋に貼った箔歪ゲージの値を基に、帯筋の履歴モデルにバイリニアを仮定した計算により求めた。図9において、横拘束力は部材断面において圧縮となる側の値としたため、水平力の正負で図が不連続となっている。

図9を見ると、中子のあるB1、B3、B4は、横拘束力が、横拘束力が帯筋が全て降伏した時の横拘束力（図9に2重実線で示された値、以下全降伏横拘束力と呼ぶ）の一定割合を越えると、横拘束力が急激に大きくなって部材の水平耐力が明確に低下している。そして、全降伏横拘束力に近づくにつれて提供できる横拘束力が頭打ちになって最終破壊に至っており、帯筋がその性能を十分に発揮していることがわかる。これに対して中子の無いB5は、横拘束力が全降伏横拘束力よりはるかに小さい時点で突然耐力低下を起し、最終破壊に至っている。

次に、横拘束力と変形角の関係を図11に示す。図が水平変形の正負で不連続となっているのは図

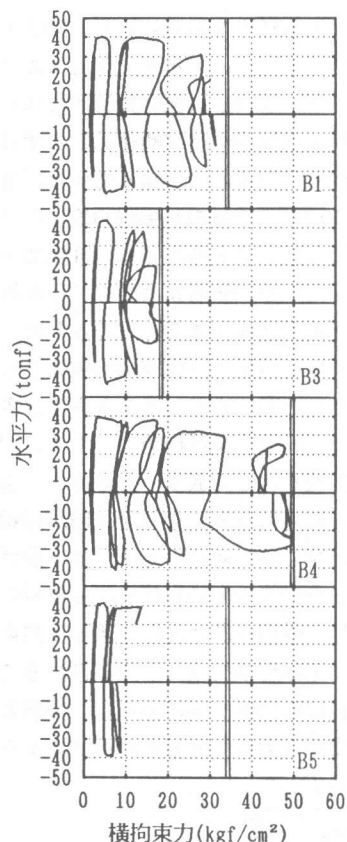


図9 水平耐力と横拘束力の関係

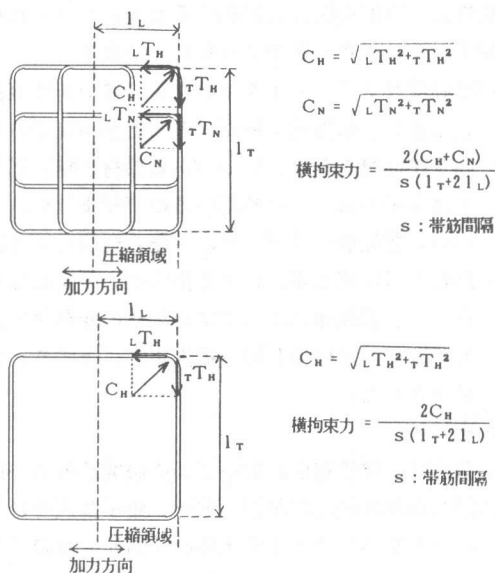


図10 横拘束力の定義

9と同じ理由である。また、図9と同様に全降伏横拘束力を2重実線で示してある。図11において各変形角の1サイクル目のピークの点(図中に○印で示す)を結ぶと、変形角が同じ時の横拘束力は試験体によらずほぼ等しく、変形角にほぼ比例している。この結んだ線は、部材が水平耐力を維持している間は、部材の水平耐力維持に必要な「必要横拘束力」を表わしていると考えられ、許容できる限界変形とこの必要横拘束力から、帯筋に必要な「保有横拘束力」が定量的に推定できる可能性があることを示している。

しかし帯筋の「保有横拘束力」は、全降伏横拘束力よりは小さいと考えられ、その大きさは主に帯筋の配筋形状に依存する。同じ全降伏拘束力を持ち、配筋形状の異なるB1とB5の靱性能が著しく異なったのは、「保有横拘束力」が違ったためと考えられる。これは帯筋が材軸方向のみではなく、材軸に直交する方向にも力を受け、曲げ変形するためであり、あらゆる帯筋の配筋形状による部材の靱性を定量的に評価するには、帯筋の曲げ変形による横拘束力を定量的に把握し、帯筋の「保有横拘束力」を評価することが必要である。そして部材の靱性能を高めるには、帯筋の「保有横拘束力」が全降伏横拘束力にできるだけ近づくような配筋形状とするのが望ましい。

4. まとめ

曲げ変形の卓越する、高強度コンクリートを用いたRC柱の靱性能と帯筋の関係を把握するために行なった柱の曲げせん断実験の結果から次のことがわかった；

- ① 高強度コンクリートを用いたRC柱の靱性確保は難しいとされるが、高強度の帯筋を用いれば要求される靱性能を確保することが可能である。
- ② 同じ帯筋量を有し、中子のある部材と無い部材の性状が著しく異なることから、帯筋の配筋形状は中子のあるものを用いるのが望ましい。
- ③ 部材の靱性能の評価には、主筋の配筋をも考慮する必要がある。
- ④ 部材の靱性能と帯筋による横拘束力の間には密接な関係があり、部材の耐力維持に必要な横拘束力は、試験体によらずほぼ部材の変形角に比例することがわかった。そしてこの必要横拘束力が、帯筋が提供し得る横拘束力に達すると耐力低下が起り、最終破壊に至るという現象が見出された。

謝辞

本研究は、建設省New RC総プロの研究活動の一環として行なわれたものである。なお、鉄筋の入手に際し東部大和電機製鋼の方々、鮎子多氏をはじめとする住友電工の方々に、試験体の製作に当たり勝俣氏をはじめとする大林組技術研究所の方々、実験を行なう際に細川助手はじめ研究室の皆さん、東京大学工学部総合試験所大型構造物試験室の技官の方々、田中氏をはじめとするフジタ工業の技術研究所の方々にお世話になった。ここに深く感謝の意を表します。

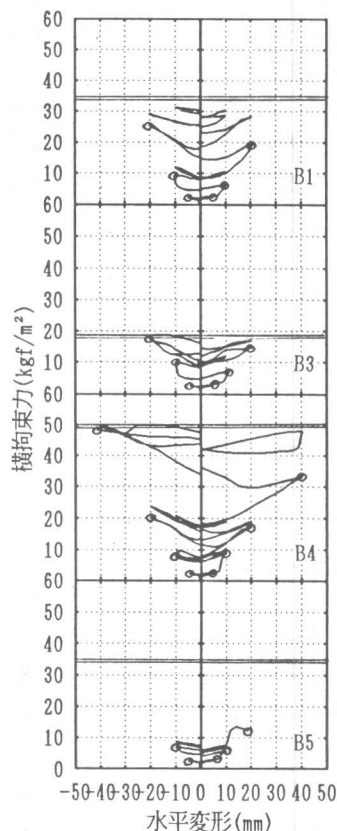


図11 横拘束力と水平変形の関係