

[2049] 十字型プレキャスト・プレストレスト・コンクリート 耐震要素の耐震性能について

正会員○大沼 正昭 (東北工業大学 工学部)

正会員 川股 重也 (東北工業大学 工学部)

1. はじめに

鉄筋コンクリート造の建物が大地震により何等かの構造的な被害を被った場合、その建物を修復して再使用するために極めて多大な経済的負担を強いられることはこれまでの被害の度に経験してきたことである。過度な変形を生じて損傷した部位に対してその強度と剛性を回復させるためには何等かの補修・補強が必要である。しかし、破損箇所が建物の自重を支える柱やはりであるだけに補修・補強は技術的に困難であるばかりでなく経済的にも大きな負担となる事が多い。そこで筆者らは、建物の重量を支える構造と地震等の横力に抵抗する耐震要素とを敢えて分離することで万が一の被災時にも容易に交換可能な新しいプレファブ耐震構法について研究開発を行なっている。

これまでに、主筋にアンボンドPC鋼棒と普通鉄筋を併用したPCトラス耐震要素を考案し図1のごとく建物の外壁面にPCトラス耐震要素を連続配置することで合理的な耐震構面を形成する新しい耐震構法について一応の成果が得られている。

しかし一般の建物に本構法を活用するためには、汎用性のある耐震要素の開発や要素間の接合方法の合理化等解決すべき問題も数多く残っている。

そこで今回は、PCトラス耐震要素と同様に高い耐力と優れた変形性能を兼ね備え、尚かつより汎用性のある要素形状を模索し図2のごとくにラーメン構造に相応するフレーム型と外壁面に兼用できるパネル型の2種類の十字型プレキャスト・プレストレスト・コンクリート耐震要素を試案した²⁾。いずれの型も、主筋には、曲げ補強筋として平行配置した普通鉄筋と圧縮側コンクリート部分とトラスを構成するようにX型配置したアンボンドPC鋼棒とを併用することで、高い初期剛性と高い耐力、さらには残留変形に対する高い復元性を与えながら、過大な地震力に対する靱性能力とエネルギー消費能力の改善を計っている。

本論では十字型耐震要素の模型実験結果とその耐震性能について報告する。

2. 実験概要

実験は、フレーム型とパネル型の2種類についてそれぞれ普通鉄筋とPC鋼棒の配筋比率を変えた合計4体の試験体について行なった。図3と図4にそれぞれの試験体の形状と配筋を示

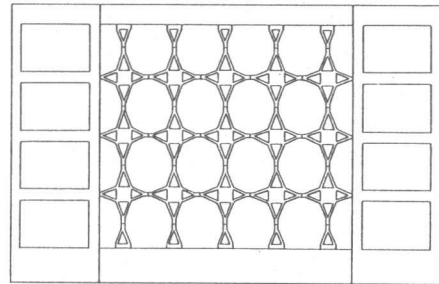
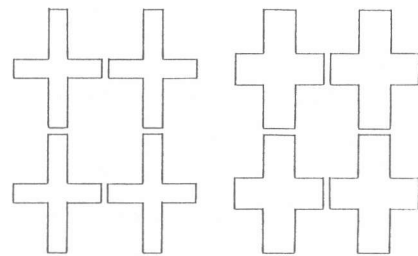


図1. PCトラス耐震構面



(1) フレーム型 (2) パネル型

図2. 十字型耐震要素

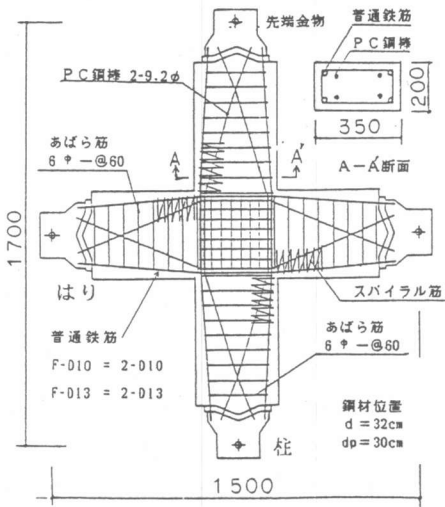


図3. フレーム型試験体配筋図

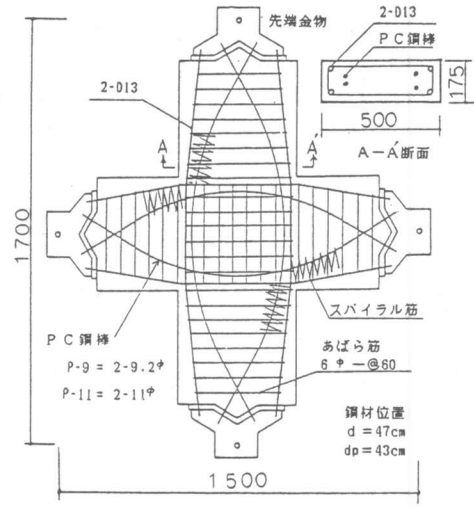


図4. パネル型試験体配筋図

表1. 試験体一覧

試験体名	F-D10	F-D13	P-9	P-11	
断面 ●印-PC鋼棒 ○印-普通鉄筋					
	b × D (cm)	20 × 35	20 × 35	17.5 × 50	17.5 × 50
	d (cm)	32	32	47	47
	d p (cm)	30	30	43	43
配筋	PC鋼棒	2-9.2φ C種	2-9.2φ C種	2-9.2φ C種	2-11φ C種
	普通鉄筋	2-D10 SD30	2-D13 SD30	2-D13 SD30	2-D13 SD30
鉄筋量 (Pt %)	PC鋼棒	0.208 %	0.208 %	0.162 %	0.231 %
	普通鉄筋	0.222 %	0.397 %	0.309 %	0.309 %
合計	0.430 %	0.605 %	0.471 %	0.540 %	
鋼材の降伏引張り力 (t)	PC鋼棒	14.626 t	14.626 t	14.626 t	20.907 t
	普通鉄筋	4.686 t	8.382 t	8.382 t	8.382 t
合計	19.312 t	23.008 t	23.008 t	29.289 t	
終局プレストレス率	0.757	0.636	0.636	0.714	
PC鋼棒の設計緊張力 (鋼棒一本当り)	5.0 t	5.0 t	5.0 t	7.0 t	
平均プレストレス (kg/cm ²)	28.57	28.57	22.86	32.00	

す。普通鉄筋とPC鋼棒は中央パネル部分を通し配筋としその両端にネジ加工をして先端金物にナットで定着した。普通鉄筋は曲げ補強筋として材軸にほぼ平行に配置し、PC鋼棒は圧縮側コンクリート部分とトラスを構成するようにX型に配置した。これはコンクリートのせん断破壊を避けるために、荷重増加に伴い曲げ抵抗から徐々にトラス抵抗に移行させることを意図したものである。フレーム型ではせん断スパン比が比較的大きいためPC鋼棒はX型に直線的な配置をしたが、パネル型ではせん断スパン比が小さく幅広となるためにPC鋼棒は加工に無理のない

曲線配置とした。プレストレスを導入することで部材の初期剛性を高めると共に、残留変形を小さく抑える高い復元性を与えている。また、PC鋼棒をアンボンド形式で用いることで鋼棒の可伸縮範囲を長く採り、RCラーメン部材のような大きな塑性変形にも追従できるようにした。したがって、この場合PC鋼棒を塑性域まで使用することから、ネジ部での破断を避けるためにネジ部がD種で母材部分がC種の特種な鋼棒を用いた。

表1に試験体の断面性能一覧を示す。フレーム型ではPC鋼棒は2-9.2φを用いて、普通鉄筋をD-10とD-13に変えた2体を用意し、主筋の配筋比率による履歴特性への影響を見た。また、パネル型はフレーム型の約2倍の高い耐力を目標に設計しており、せん断スパン比の小さな形状でも同様の耐震性能が期待し得るかという点とプレストレスレベルを高めた場合の影響を見るために普通鉄筋には2-D13を用いて、PC鋼棒は2-9.2φの場合と2-11φを用いた場合の2体

を用意した。各試験体共に正加力時に圧縮側となる部分にスパイラル筋を配筋して終局時での効果を見ようと試みた。

試験体に使用したコンクリートと鋼材の材料定数を表2と表3に示す。使用したコンクリートは粗骨材の最大粒径15mm以下の早強コンクリートで蒸気養生を行なった。

表2. コンクリート強度

(単位: kg/cm ²)				
材令	試験体名	圧縮強度	引張強度	ヤング率
23日	F-D10	651	29.6	2.98×10^5
22日	F-D13	638	26.6	3.13×10^5
10日	P-9	580	29.9	3.26×10^5
10日	P-11	580	29.9	3.26×10^5

表3. 鋼棒・鉄筋・番線の引張強度

(単位: kg/cm ²)				
	降伏点	降伏歪	引張強度	ヤング率
P C 鋼棒 9.2φ	12930	0.63%	13108	2.04×10^6
〃 11φ	12311	0.60%	12669	2.03×10^6
S D 30 D10	3718	0.20%	5441	1.8×10^6
〃 D13	3832	0.21%	5688	1.8×10^6
S R 24 6φ	3423	0.17%	4892	2.0×10^6

加力装置を図5に示す。十字型試験体の先端金物のうち3ヵ所をテフロンすべり支承で支持し、残る1ヵ所に油圧ジャッキで水平力を加えることで静的釣り合いによる反力を利用した加力方法を採用した。加力装置の寸法の都合で十字型試験体を横に90度回転させて、柱・はりの位置関係が逆の状態で行なっている。加力は各試験体共に、増分層変形角 $R=0.005\text{rad}$ ごとに各2回づつの定変位繰返し加力を行なった。

水平たわみと中央パネルのせん断ひずみをひずみゲージ式変位計を用いて測定し、層変形角 R は、上下の先端金物位置での水平たわみから算出した。普通鉄筋とP C 鋼棒のひずみ分布は、ゲージ長2mmのワイヤーストレインゲージにより、またコンクリート部分のひずみ分布はゲージ長30mmのモールドゲージを埋め込み測定した。

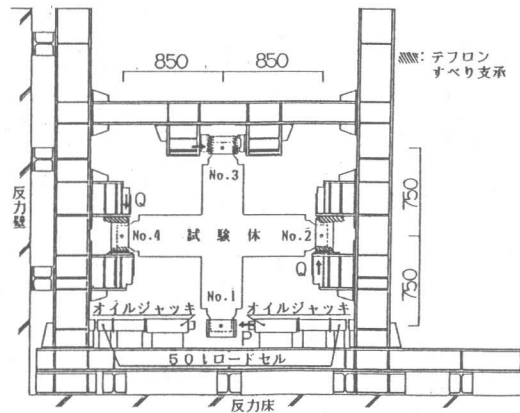


図5 加力装置

3. 実験結果と考察

フレーム型試験体ではいずれも、層せん断力 $Q=4.0\text{t}$ で曲げによる初亀裂が生じ、その後変形の増加と共に亀裂数が増加している。F-D10試験体では $Q=7\text{t}$, $R=0.003\text{rad}$ で普通鉄筋が降伏し、 $Q=9.4\text{t}$, $R=0.022\text{rad}$ でP C 鋼棒が降伏した。これら主筋の降伏後も極めて安定した履歴性状を示し、 $R=0.04\text{rad}$ まで加力変形させたところで引張側のP C 鋼棒が破断したため実験を終了した。F-D13試験体では $Q=9\text{t}$, $R=0.005\text{rad}$ で普通鉄筋が降伏し $Q=11\text{t}$, $R=0.022\text{rad}$ でP C 鋼棒が降伏している。 $Q=12\text{t}$, $R=0.032\text{rad}$ にて圧縮側コンクリートの圧壊による耐力限界が確認できたので破壊させずに実験を終了した。

実験で得られた層せん断力と層変形角の関係を図6と図7に示す。プレストレスの効果で初期剛性が高く、普通鉄筋の降伏後もP C 鋼棒のひずみは弾性範囲内であるために、除荷過程での残留変形は極めて少なく高い復元性を示している。定変位の繰返し加力による耐力低下も極く僅かですべて問題にはならない。また、履歴曲線はP C 部材とR C 部材のほぼ中間的なループ性状を示している。

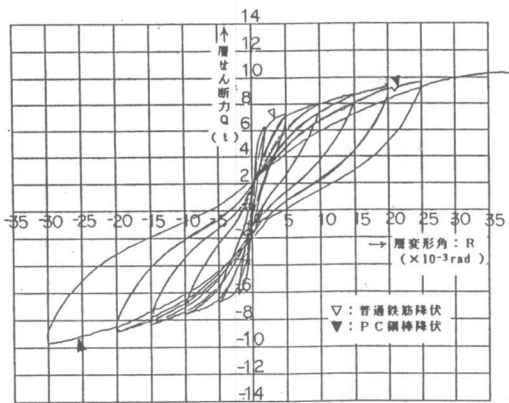


図6. F-D10試験体の履歴曲線

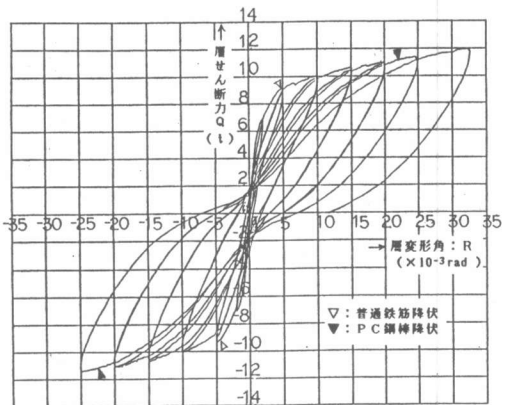
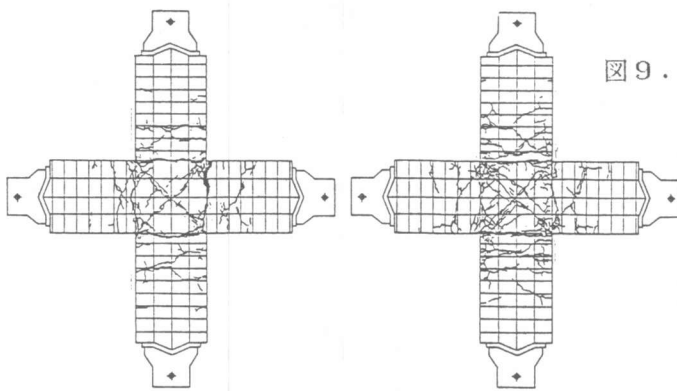


図7. F-D13試験体の履歴曲線

フレーム型試験体の亀裂図の比較を図8に示す。F-D10試験体とF-D13試験体の比較では、普通鉄筋量の多いF-D13試験体の方が、亀裂数も多く全体に分散しており、普通鉄筋に沿った付着割裂による亀裂も明確である。また、パネル部分についても普通鉄筋量の多いF-D13試験体の方が亀裂数が多くパネル全面に分散している。層変形角とパネルのせん断歪との関係を図9に示す。F-D10試験体ではパネルのせん断歪が極めて小さいのに対して普通鉄筋量の多いF-D13試験体では層変形角に比例してパネルのせん断歪も増大している。



(1) F-D10試験体

(2) F-D13試験体

図8. 最終亀裂図の比較

F-D13試験体の主筋のひずみと層変形角の関係について図10と図11に示す。PC鋼棒は、アンボンド形式で使用しているために可伸縮範囲が長く一様に伸びるために、ひずみレベルはそれほど高くなく、さらに正負の変形に関係なくPC鋼棒に常に引張力が働いている。また、PC鋼棒のひずみが初期値を持っているのはプレストレスを与えるためにPC鋼棒に初期ひずみを与えているからである。さらに、 $R=0.022\text{rad}$ でPC鋼棒のひずみ変化率が急変したので降伏と判定した。普通鉄筋のひず

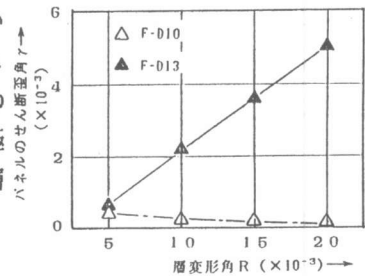


図9. パネルのせん断歪形の推移

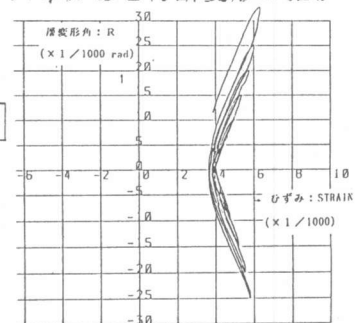


図10. PC鋼棒のひずみ

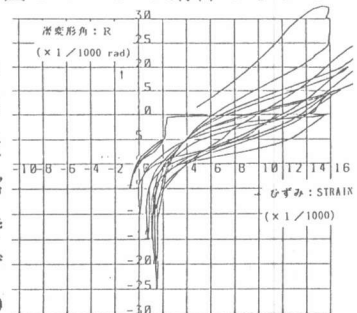


図11. 普通鉄筋のひずみ

みは、一般のRC曲げ部材と同様に引張側で大きな塑性ひずみが生じていることを示しており、圧縮側では、亀裂の変動に伴う残留変形の蓄積を示している。また、図7において普通鉄筋降伏時の層変位角がF-D10試験体に較べて大きいのはパネル部分からの普通鉄筋の抜け出し量が多いものと考えられる。

パネル型試験体では約6t前後で曲げによる初亀裂が生じ、変位の増大に伴って曲げ亀裂が進行する。

層変形角 $R=0.003$ rad で普通鉄筋が降伏し、 $R=0.012$ rad でPC鋼棒が降伏している。両試験体共に $R=0.02$ rad まで加力後、破壊させずに実験を終了した。

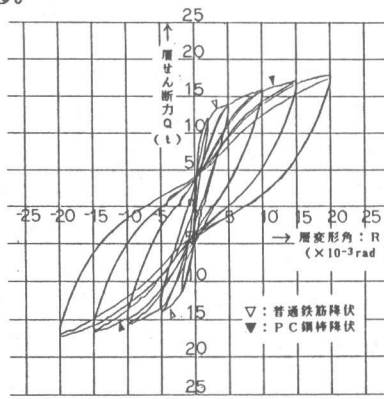


図12. P-9試験体の履歴曲線

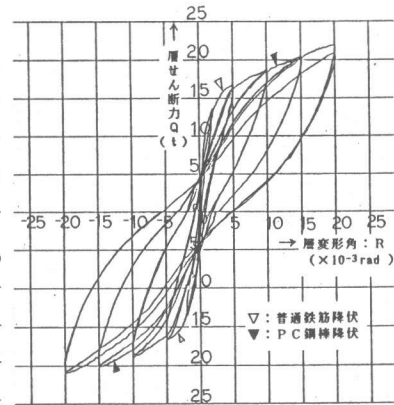


図13. P-11試験体の履歴曲線

パネル型試験体の層せん断力と層変形角の関係を図12と図13に示す。基本的にはフレーム型とほぼ同様な履歴性状を示しており、主筋量が多くプレストレス・レベルの高いP-11試験体の方が耐力も高く復元性に富んでいる。P-9試験体の最終亀裂図を図14に示す。亀裂性状はP-9型試験体、P-11型試験体共に大きな違いはなく、フレーム型に比較すると柱・はり部分の亀裂が曲げせん断型になっており、先端金物部分から斜にせん断亀裂が生じているのが特徴的である。しかし、PC鋼棒とコンクリートの圧縮側がトラスを構成しているために、せん断破壊の恐れはなく十分に安定した挙動を示している。また、中央パネル部分のせん断亀裂は、両試験体共に亀裂幅も極く小さく、ほとんど変動が無かった。

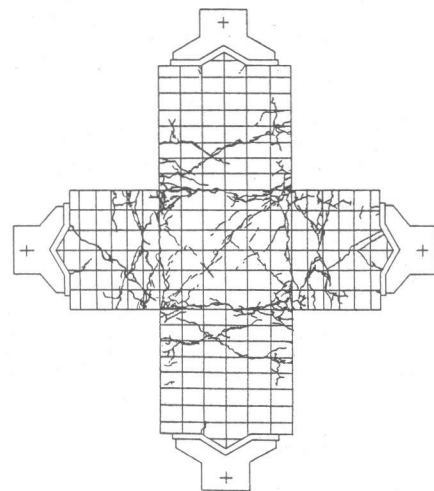


図14. P-9試験体最終亀裂図

各試験体の復元性について比較するために各載荷変位(δ)に対する除荷重時の残留変位(δ_r)の比率(δ_r/δ)と層変形角との関係を図15に示す。F-D10試験体は層変形角による残留変形率の変化は少なく普通鉄筋量の多いF-D13試験体では層変形角の増加に伴って残留変形率も増加する。パネル型試験体ではP-9試験体の方が残留変形率が大きい。すなわち、終局プレストレス率が高い場合は残留変形率が小さくなり、終局プレストレス率が低い場合は大きくな

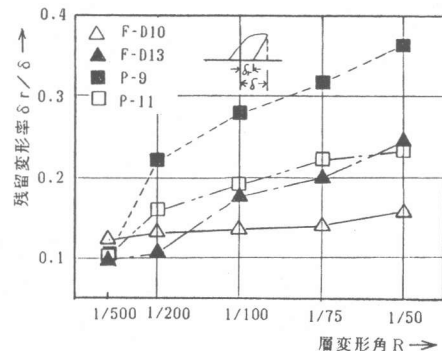


図15. 残留変形率の比較

る。つまり、主筋であるPC鋼棒と普通鉄筋の配筋量を加減することで復元性のある程度制御できる可能性を示している。

各試験体の荷重～変位関係から半サイクルごとに消費した履歴エネルギー消費量を求め、層変形角Rと履歴エネルギー消費量の推移関係を図16に示した。層変形角 $R=1/200$ 以下の範囲ではフレーム型、パネル型共にPC鋼棒と普通鉄筋の配筋比率の違いによる履歴エネルギー消費量の差は認められない。

$R=1/100$ 以上の大変形時にはフレーム型では終局プレストレス率の小さなF-D13試験体の方がエネルギー消費量が多い。また、パネル型では主筋量の違いによる耐力の差に較べてエネルギー消費量の違いは極めて小さい。これは高強度型のP-11試験体に較べて終局プレストレス率の低いP-9試験体の方がエネルギー消費率が高いためである。

部材のエネルギー消費能力を示す指標である等価粘性減衰定数(heq)と層変形角の関係を図17に示す。

heqは $R=1/200$ 以下では5～8%で、 $R=1/100$ 以上の層変形角では12～16%で比較的安定している。ここでも終局プレストレス率の低い方がエネルギー消費能力が大きいことを示している。

4. まとめ

平行配置した普通鉄筋とトラス状に配置したPC鋼棒を主筋とする十字型プレキャスト・プレストレスト・コンクリート耐震要素は、

- (1) 強度は普通鉄筋の曲げ耐力とPC鋼棒とコンクリートで構成するトラスの耐力の累加強度となる。
- (2) 終局プレストレス率とプレストレス量を操作することで復元力特性を変えることができる。
- (3) PC鋼棒をアンボンドで用いることで大きな変位靱性率を達成できる。
- (4) 主筋を適切に選定すれば、高い耐力と優れた靱性、さらに適度の復元性を確保できる。

ことから、この十字型耐震要素を用いた耐震構法は中低層建物の耐震構法として極めて合理的的であると考えられる。

(参考文献)

- 1)川股・大沼・栄, "プレキャストコンクリートトラス耐震要素の高強度化と靱性改善" 第5回コンクリート工学年次講演会講演論文集, 1983年6月 PP.293-296
- 2)川股・大沼・栄, "十字型プレキャスト・プレストレスト・コンクリート耐震要素の加力実験", 日本建築学会大会学術講演梗概集, 昭和61年8月 PP53-54

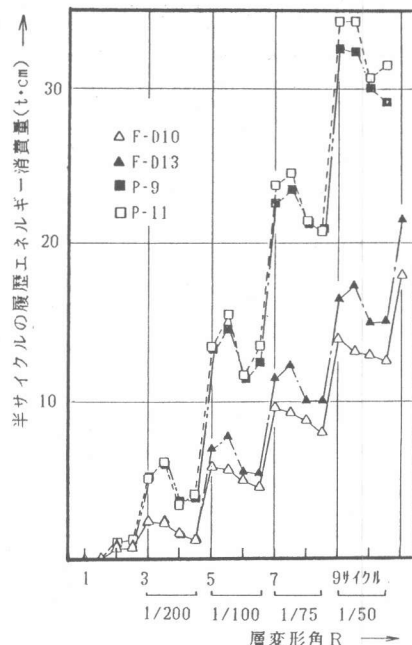


図16. エネルギー消費量

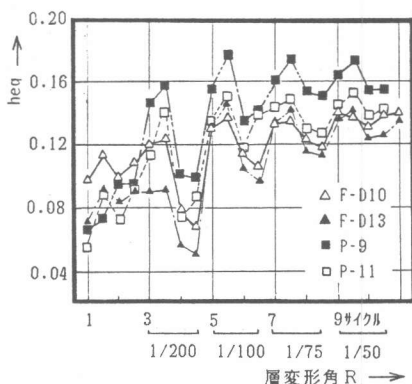


図17. 等価粘性減衰定数