

論文 長支間 PC 床版の移動輪荷重走行疲労試験による耐久性評価

長谷俊彦^{*1}・上東 泰^{*1}・安松敏雄^{*1}

要旨:本試験研究は、PC 床版鋼 2 主桁橋で場所打ち長支間 PC 床版の疲労耐久性評価を目的とし、日本道路公団試験研究所所有の大型移動載荷疲労試験機を用いて、従来の多主桁橋 RC 床版と 2 主桁橋長支間 PC 床版の実物大供試体による移動輪荷重走行疲労試験を実施した。その結果、PC 床版についても RC 床版と同様の押し抜きせん断疲労破壊が確認された。そこで、既往の RC 床版疲労強度推定式を用いて長支間 PC 床版の押し抜きせん断疲労強度の実験値を S-N 線上で比較すると、長支間 PC 床版は、押し抜きせん断疲労に対して RC 多主桁床版よりも高い耐久性があることが評価できた。

キーワード:鋼 2 主桁橋、長支間 PC 床版、疲労、移動輪荷重走行疲労試験、耐久性

1. はじめに

本論では、鋼 2 主桁橋の場所打ち長支間 PC 床版の疲労耐久性評価を目的として、大型移動載荷疲労試験機を用いた実物大供試体の移動輪荷重走行疲労試験を行い、RC 床版と長支間 PC 床版の押し抜きせん断疲労特性を検証するとともに、大阪大学松井教授らの提案した RC 床版疲労強度推定式^{1), 2), 3)}を用いて評価した。

2. 床版の疲労強度推定法

2.1 床版疲労損傷の評価法

鋼橋 RC 床版の疲労損傷に関する研究が進められ、今日では、松井らにより輪荷重走行疲労試験による押し抜きせん断強度をパラメータとした S-N 線が提案され、RC 床版の実験に基づく疲労強度推定式¹⁾により、押し抜きせん断疲労寿命の予測がある程度可能となってきた。

しかし、プレストレスの導入された PC 床版については、定性的にプレストレスにより疲労耐久性が向上することは考えられているが、定量的に疲労寿命を推定できない現状である。

2.2 PC 床版の疲労強度推定式

RC 床版の疲労強度推定式として、松井らは過去の RC 床版が押し抜き疲労破壊していること

に起因して最終破壊直前の梁状化床版の押し抜きせん断力が最大となる状態の応力状態を図-1のようにモデル化できるとして、梁状化床版の押し抜きせん断耐力算定式(1)式¹⁾を導いている。

$$P_{sx} = (2\tau_{smax} \cdot X_m + 2\sigma_{tmax} \cdot C_m)B \quad \dots(1)$$

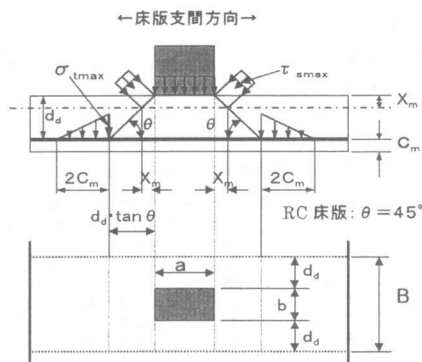


図-1 床版押し抜きせん断破壊の力学モデル

また、梁状化した床版の押し抜きせん断耐力(P_{sx})に対する作用せん断力 P の割合を (P/P_{sx}) とし、その繰返し回数(N)の関係で対数式を用いて、移動輪荷重走行疲労試験結果から RC 床版(乾燥状態)の疲労強度推定式を以下の(2)式¹⁾として導きだしている。

$$\text{Log}(P/P_{sx}) = -0.078351 \text{Log}N + \text{Log}1.520 \quad \dots(2)$$

その後、PC 床版に対して押し抜きせん断耐力

*1 日本道路公団 試験研究所 道路研究部 橋梁研究室 (正会員)

算定時にプレストレス導入による効果の補正を行なう方法が提案されている。それには、RC床版の P_{sx} の算出式(1)に、プレストレス導入角度変化によるせん断耐力増加補正係数を考慮した(3)式³⁾が与えられる。

$$P_{sx} = (2\tau_{smax} \cdot X_m \cdot \alpha m + 2\sigma_{tmax} \cdot C_m) B \dots (3)$$

$\alpha m = 1/\tan \theta$, $\theta = (1/2)\tan^{-1}(2\tau_{cr}/\sigma_{pe})$
 τ_{cr} : せん断ひび割れ発生応力度 (N/mm²)
 $\tau_{cr} = 1.005(\sigma_{tmax}^2 + \sigma_{tmax} \cdot \sigma_{pe})^{1/2}$
 σ_{pe} : 有効プレストレス (N/mm²)

3. 移動輪荷重走行疲労試験

3.1 試験供試体

表-1 輪荷重走行試験 試験ケース

(単位: mm)

	PCA-0, PCB-0	PC-1	RC-1
供試体			
備考	PC床版(軸載荷) 床版厚 300,240mm	PC床版(輪載荷)	RC床版(支間 2,750mm の連続版相当)

■ 移動載荷範囲(幅500mm)

表-2 試験供試体諸元一覧表

供試体	床版厚 (cm)	床版支間 (m)	方向	PC	鉄筋 (mm)	PC鋼材 (mm)
PCA-0	3.0	6.00	橋軸	×	D19@100	—
			直角	○	D10@100	1S21.8@500
PCB-0	2.4	6.00	橋軸	×	D19@100	—
			直角	○	D13@100	1S21.8@500
PC-1	2.5	4.00	橋軸	×	D19@100	—
			直角	○	D13@100	1S21.8@500
RC-1	2.5	2.25	橋軸	×	D16@125	—
			直角	×	D19@125	—

※鋼材(鉄筋: SD345, PC鋼材: SWPR7B, ポステンション)

疲労試験を実施した供試体の設計諸元を表-1, 表-2に示す。

PCA-0は、床版支間 6,000mm で床版厚は道示の純支間から求まる最小厚 300mm とした。プレストレスはポストテンションにより、床版設計荷重に対してコンクリートの許容引張応力度以下となるように導入した。

PCB-0は、床版支間 6,000mm で床版厚は、道示の最小床版厚規定を無視して、より薄い 240mm とした。プレストレスの導入レベルは、床版設

計荷重に対してコンクリートの許容ひび割れ幅以下となるようにした。

実際の輪荷重走行疲労試験において、試験機の能力と時間的な期限の問題から上記 (PCA-1, PCB-1) の2体を1軸載荷で疲労破壊させることが困難であった。そこで、1輪載荷で輪荷重を上げて疲労破壊までを確認する試験ケースとして、従来の多主桁RC床版相当のRC-1及び、RC-1と同じ床版厚 250mm で同程度の押し抜きせん断耐力 P_{sx} となるPC床版のPC-1を計画した。

RC-1は一般的な多主桁の連続版床版支間 2,750mm の輪荷重載荷状態を単純版供試体で再現するために、同じ床版厚で床版支間 2,250mm とした。また、鉄筋量は、設計曲げモーメントに対して、道示の許容応力度に対する望ましい余裕量をもった応力になるような配置とした。

PC-1は、RC-1と同じ床版厚 250mm とし、道示の単純版PC床版として規定を満足する床版支間 4,000mm とし、床版支間方向のプレストレスの導入レベルは床版設計荷重に対してコンクリート許容引張応力度以下となるようにした。

3.2 試験方法

(1) 載荷方法

載荷装置は、日本道路公団試験研究所の移動載荷疲労試験機を使用した。移動載荷の荷重制御方式は、表-1に示す 3,000mm の載荷範囲において、実橋の輪荷重の通過状態を再現するため、両端部から 600mm 内で輪荷重をゼロから設定荷重間で増減させ、中央の 1,800mm 範囲で設定した輪荷重を一定に保持する台形分布載荷としている。

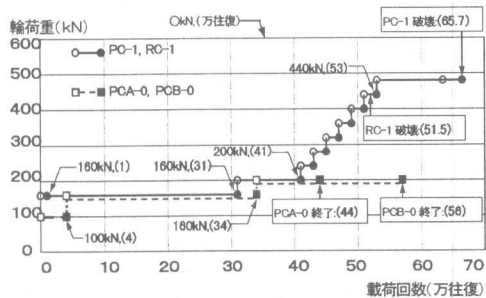


図-2 輪荷重走行疲労試験載荷荷重ステップ

載荷荷重は、PCA-0、PCB-0 を 1 軸（2 輪）載荷で支間中央に載荷し、PC-1、RC-1 は 1 輪載荷で支間中央部に載荷した。

また、荷重ステップは、図-2 示すように移動輪荷重を段階的に増加させながら実施し、PC-1、RC-1 については、輪荷重 200kN 以降の輪荷重を 2 万往復毎に 40kN ずつ増加させて供試体が破壊するまで試験を行った。なお、計測は各載荷ステップ毎の輪荷重走行試験の前後に静的載荷状態で計測した。

(2) 計測項目

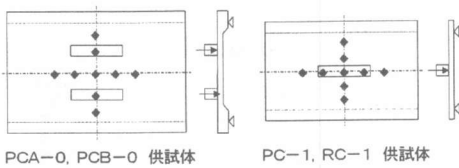


図-3 計測位置図

計測は、図-3 に示すような各試験供試体の主要ポイントについて、床版たわみ、鉄筋ひずみ、ひび割れ観測を行った。

3.3 支間6mのPC床版試験結果

計測結果は、下記の(1)床版たわみから(3)鉄筋ひずみについて、疲労試験の途中段階における100kN 静的載荷時の計測値を、100kN 載荷荷重分に相当する計測値として整理した。

(1) 床版たわみ

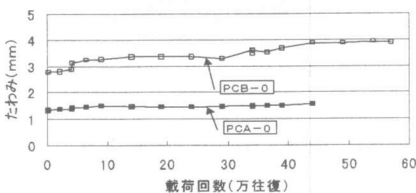


図-4 100kN 床版たわみ経時変化図

PCA-0 は、1.4mm から 1.6mm の値を示しており、各荷重サイクル内の範囲内においては、たわみの増加はわずかしか認められない。44 万往復の繰り返し載荷を終了した後も、100kN 静的載荷時の活荷重たわみ量の増加がなく、剛性低下が認められず弾性挙動を示している。

PCB-0 については、PCA-0 に比べて各載荷荷重ステップ毎に徐々に増加する傾向は見られたが、57 万往復の載荷後も急激なたわみの増加傾向は認められなかった。

(2) 主鉄筋ひずみ

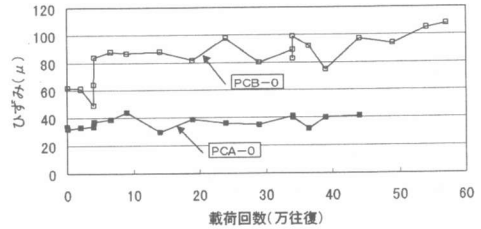


図-5 100kN 主鉄筋ひずみ経時変化図

たわみ計測結果と同様に、PCA-0 は 35μ から 40μ と一定ひずみ量で 44 万回往復まで計測値の増加が認められない。PCB-0 は 80μ から徐々にひずみ量の増加が認められるが、40 万往復終了以後では増加が認められない結果であった。

(3) 配力鉄筋ひずみ

主鉄筋と同じ傾向の計測結果が得られた。PCA-0 はあまり増加傾向は示さず、PCB-0 は徐々にひずみが増加している状況となった。

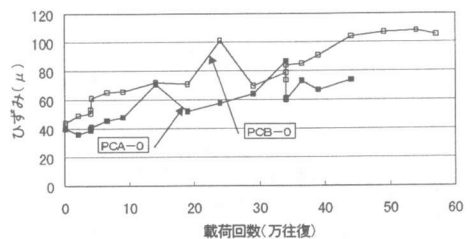
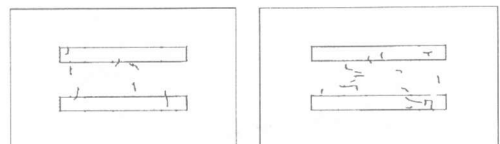


図-6 配力鉄筋ひずみ経時変化図

(4) ひび割れ状況



(左) PCA-0 (右) PCB-0

注) 幅 0.1mm 以上のひび割れを示す。

図-7 試験終了後のひび割れ状況図

PCA-0、PCB-0 共に発生したひび割れは、ひび割れ幅が最大でも 0.18mm の微少なひび割れでほ

とんどのひび割れ幅が0.1mm以下であった。

3.4 RC床版, 4m支間PC床版試験結果

計測結果は, PCA-0, PCB-0 と同様に, 100kN 載荷荷重分に相当する計測値として整理した。

(1) 床版たわみ

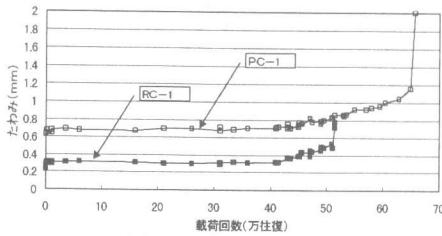


図-8 100kN 床版たわみ経時変化図

PC-1, RC-1 共に 41 万往復終了までは, たわみの増加がなく一定の値を示している。41 万往復を超えたあたりから徐々にたわみが増加しており, RC-1 は 51.5 万往復, PC-1 は 65.7 万往復で押し抜きせん断破壊により終局を迎えた。

図-9, 図-10 に直角方向のたわみ分布を経時変化で比較した。また, 表示方法は床版中央の疲労試験前の計測値 σ_0 を基準として, σ_0 に対する比率で無次元化した。

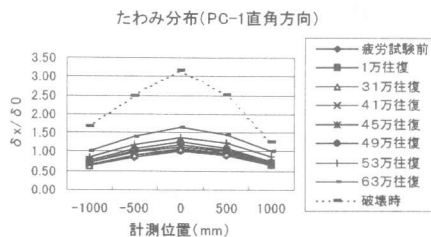
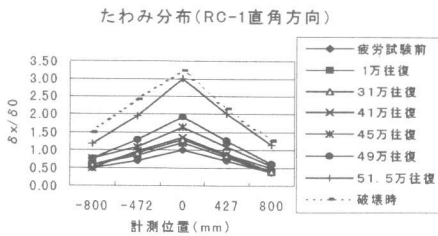


図-9 100kN 直角方向たわみ分布経時変化図

橋軸直角方向のたわみ分布は, RC-1 が疲労試験の経過に伴い破壊直前で, 当初の 3 倍程度の

たわみ量になるのに対し, PC-1 は 1.5 倍程度とその半分の増加量に留まっている。また, RC-1の方が全体的に荷重ステップ毎にたわみが増加していく傾向が大きい。

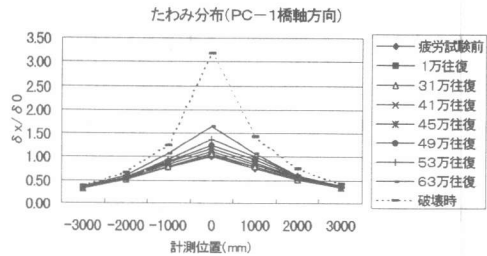
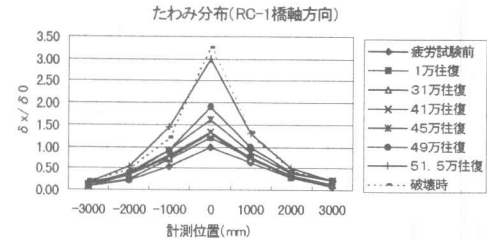


図-10 橋軸方向たわみ分布経時変化図

橋軸方向分布についても, 破壊直前までの挙動は, RC-1 も PC-1 も増加量は橋軸直角方向と同様の傾向を示している。

(2) 主鉄筋ひずみ

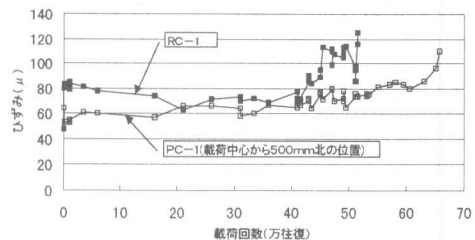


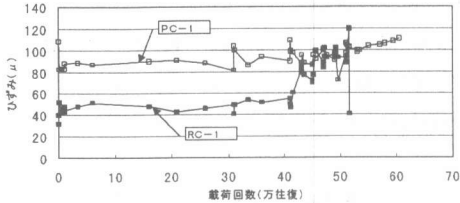
図-11 100kN 主鉄筋ひずみ経時変化図

PC-1, RC-1 共に, 41 万往復までは 60μ , 40μ 前後の値で一定となっている。41 万往復以降は両者共に徐々にひずみが増加している。増加傾向は RC-1 の方が著しい。

なお, PC-1 の値は床版中央の荷重中央のひずみが測定不可能であったため, 図-11 は荷重中央から 500mm 北側の支間中央のひずみを示した。

(3) 配力鉄筋ひずみ

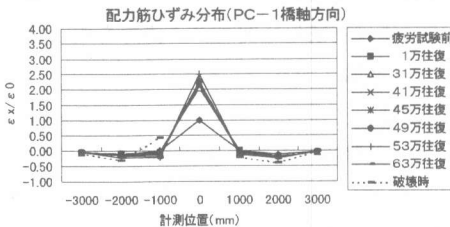
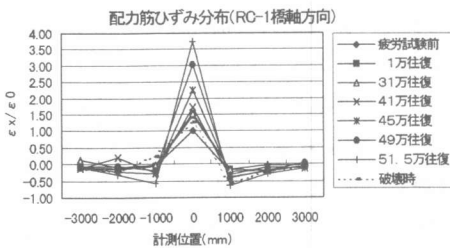
PC-1 の計測値は、 80μ から 110μ の範囲で 41 万往復まではほぼ安定しているが、41 万往復以降はひび割れの増加と共に計測値が乱れてきている。



図—12 100kN 配力鉄筋ひずみ経時変化図

ひび割れの進展にしたがって応力の再分配の傾向が見られる。しかし、破壊直前までのひずみ増加量は RC-1 より少ない。一方、RC-1 の計測値も 41 万往復までは、 40μ から 60μ 程度のひずみ量となっており、41 万往復以降は徐々にひずみが増加していく傾向にある。

つぎに床版支間中央の配力筋橋軸方向ひずみ分布の経時変化について図—13 に示す。

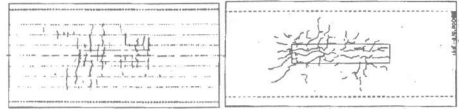


図—13 100kN 配力鉄筋橋軸方向ひずみ分布変化図

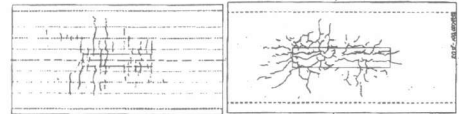
RC-1 のひずみが荷重ステップ毎に増加するのに対して、PC-1 のひずみは疲労試験開始後の初期ひび割れで一旦ひずみが増加した後、破壊直前まで一定値で増加しない傾向が見られる。これは、直角方向プレストレスにより、疲労試験

によってひび割れが進展しても、押し抜きせん断破壊面となるひび割れ面の摩擦抵抗が大きいため、せん断作用によるスリ磨き作用の進行速度が RC-1 に比べて遅いため、床版全体としての剛性が低下しにくいことと推測される。

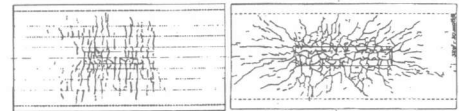
(4) ひび割れ状況



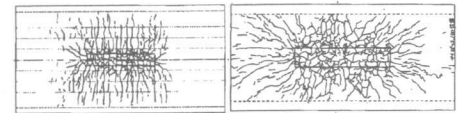
② 31万往復終了時



③ 41万往復終了時



⑦ 49万往復終了時



⑨ 53万往復終了時

PC-1 RC-1

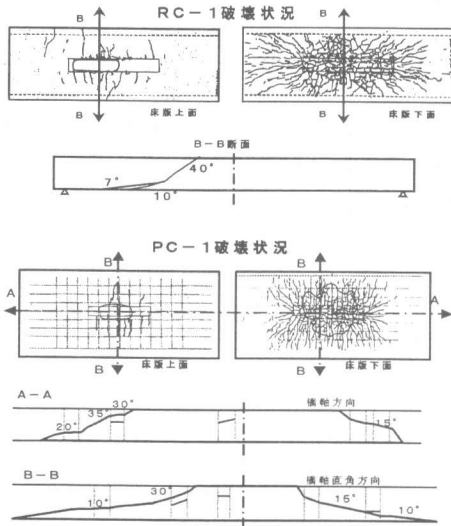
図—14 ひび割れ状況比較図

ひび割れの進展状況は、RC-1 は早い荷重段階から亀甲状のひび割れが進展するのに対して、PC-1 は橋軸直角方向のひび割れが先行し、亀甲状になるのが RC-1 に比べてかなり遅い。

(5) 最終破壊形態

最終破壊形態は、PC-1、RC-1 共に押し抜きせん断型の疲労破壊となった。せん断破壊面の角度は、RC-1 が約 40 度程度となっている。PC-1 は橋軸方向が RC-1 と同程度の角度になっているのに対して、床版支間方向は 30 度から 10 度と緩やかな角度となっており、押し抜きせん断抵抗面が非常に広いのが特徴である。

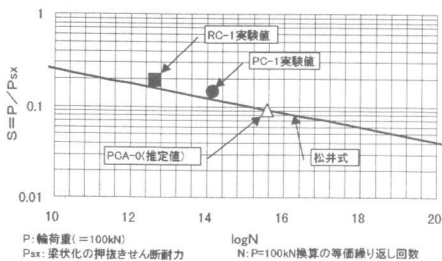
また、押し抜きせん断破壊後の床版の鋼材は、PC-1、RC-1 ともに破断した状況は見られなかった。



図—15 押し抜きせん断破壊状況図

4. 試験結果まとめ

PC-1 と RC-1 の輪荷重走行疲労試験から得られた実験結果を、100kN 等価換算繰り返し荷重で図-16 に示した。



図—16 押し抜きせん断耐力比による S-N 線図

疲労試験結果は、縦軸に供試体の梁状化床版の押し抜きせん断耐力 P_{sx} の計算値に対する $P(100kN)$ の比率を $S(P/P_{sx})$ にとり、横軸に 100kN 輪荷重のマイナー-12.67 乗則で換算した破壊までの回数を対数 $\log N$ でプロットした。PC 床版の P_{sx} の計算は、表-3 に示すようにプレストレスを考慮した $P_{sx}(2)$ を用いた。

表—3 疲労寿命の比較

供試体	記号	$P_{sx}(1)$ (kN)	$P_{sx}(2)$ (kN)	100kN 等価 繰り返し回数
PCA-0	△	889	1,091	3.69×10^{15}
PC-1	●	571	678	1.35×10^{14}
RC-1	■	513	513	4.24×10^{12}

※ $P_{sx}(1)$: PC 考慮しない, $P_{sx}(2)$: PC 考慮する

実験結果は、PC-1、RC-1 とともに松井らの S-N 線図に対して、同程度に安全側の結果となり、概ね PC 床版に対しても評価が可能であると考えられる。そこで、(2)式および(3)式を用いて PCA-0 の疲労強度の推定を行なった。

その結果、PCA-0 は、図-16、表-3 に示すように、押し抜きせん断疲労に対しては RC-1 よりも十分な耐久性を有していることが評価できた。

5. PC 床版の耐久性評価における課題

今回の試験は、長支間 PC 床版の押し抜きせん断疲労に着目して耐久性の評価を行ったため、輪荷重走行疲労試験の載荷荷重は、押し抜きせん断耐力に対する載荷輪荷重比率が高く、曲げ疲労が卓越するような設定になっていない。

したがって 6,000mm 支間を超える長支間 PC 床版については、床版厚が厚くなり押し抜きせん断耐力に対する交通輪荷重比率が小さくなるため、鋼材曲げ疲労で床版の疲労強度が決定される可能性も考えられるため、その場合の疲労荷重の設定や鋼材応力振幅の設定方法について検討する必要があると思われる。

また、今回の試験は乾燥状態での試験であるが、水の影響を考慮した場合は疲労寿命が約 1/300 程度に低下する試験報告¹⁾もあり、床版防水工の施工は必要不可欠であるといえる。

最後に、本試験を実施するにあたり、大阪大学松井教授のご指導ならびに(社)日本建設機械化協会建設機械化研究所のご協力を賜りました。ここに感謝の意を表します。

[参考文献]

- 1) 松井：移動輪荷重を受ける道路橋 RC 床版の疲労強度と水の影響について、コンクリート工学年次論文報告集, Vol.9, No.2, pp.627-632, 1987
- 2) 松井：橋梁の寿命予測-道路橋 RC 床版の疲労寿命予測-, 安全工学, Vol.30, No.6, pp.432-440, 1991
- 3) 東山, 松井：プレストレスしたコンクリート床版の押し抜きせん断耐荷力, 土木学会構造工学論文集, Vol.44A, pp.1357-1364, 1998.3