

(20) PRC橋の長期変形挙動について

オリエンタル建設(株)技術研究所 ○落合 勝
 同上 正会員 手塚 正道
 日本道路公団札幌建設局 高橋 昭一
 宇都宮大学工学部建設学科 正会員 佐藤 良一

1. まえがき

PRC部材は、RC部材とPC部材との中間領域の構造体であり、所要のひび割れ条件を満足するようにPC鋼材と鉄筋によって補強されたコンクリート構造体である。PRCの利点として、PCと比較した場合、PC鋼材量(プレストレス量)の減少により、クリープによる過度の変形が抑制できること、一般的にコストが低減できること、コンクリートの締固めが容易になること、等が挙げられる。このような点からも、近年PRCがコンクリート橋に適用されるケースが増加してきている。

一方、実橋におけるPRC部材の長期挙動に関する研究はいくつか検討されているが、クリープ・収縮ひずみの値については統一的な評価が得られるまでには至っていない。また、クリープの影響を忠実に取り入れて、コンクリートおよび鉄筋のひずみ・応力、変形等の挙動を打設後から忠実に計測し、比較検討した例はほとんど無いように思われる。

そこで本研究は、長期変形挙動を実測を通じて明らかにし、さらに、プレストレスの導入から静荷重が作用し長期材齢に至るまで連続的にクリープ解析を行い、実測値との比較検討を通じて、実橋のコンクリート応力・ひずみ、鉄筋応力および曲率に関して考察を行った。また、150日程度までの比較検討は既に報告^[1]しており、今回は計測期間をさらに延長して約400日程度までの測定結果について検討した。さらに、本年新たに土木学会コンクリート標準示方書(以下、JSCEという)が制定され、クリープ、収縮ひずみの予測値として我が国独自の方法が提案されており、これらについてもCEB-FIP MODEL CODE 1990(以下、MC90という)を交えて、実測値と比較検討を行った。

2. 実橋の概要

本橋は、支間40.80mのPRC単純2主箱桁橋であり、PRC単純箱桁の道路橋としてはわが国最大支間長を有するものである^[2]。桁の支間中央における断面諸元および鋼材配置図を図-1に示す。PC鋼材量は、1ウェブ当たり12T12.4(SWPR7A)が4ケーブルと、通常のPC部材と比較すると約1/2の鋼材量である。また、主鉄筋には、施工可能な最大鉄筋量として下床版にD25-2段(ctc100)を配置した。その結果、設計においては、静荷重作用時に支間中央下縁に約30kgf/cm²の引張応力を発生させている。

施工は、支間中央付近に支柱を設けた支柱式固定支保工施工である。コンクリートの打設は2回に分けて行い、下床版およびウェブ打設後、15日間おいて上床版を打設した。プレストレスの導入は、上床版打設3日後に行い、さらに9日後に支保工を撤去した。また、橋面の舗装は、上床版打設後からおおよそ400日後に行われた。

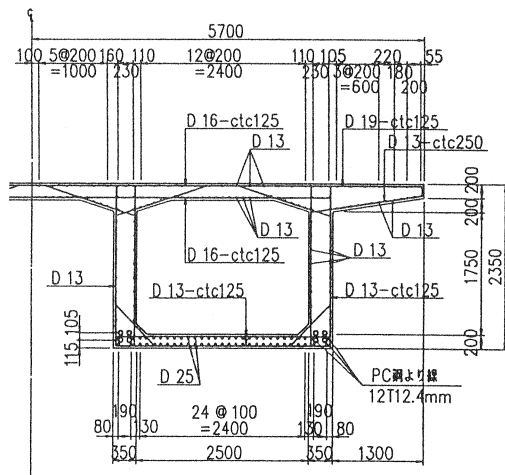


図-1 断面諸元および鋼材配置図(中央断面)

3. 測定の概要

測定は、実橋のコンクリートのひずみ・応力、無拘束ひずみ、鉄筋応力、傾斜角、およびコンクリート温度である。図-2に実橋に埋設した計測器の位置を示す。中央断面については、上縁から80mmの位置に埋込型ひずみ計および鉄筋計、100mmの位置に有効応力計および無応力計を埋設し、下縁から65mmの位置に埋込型ひずみ計および鉄筋計、100mmの位置に無応力計を埋設した。下床版にはひび割れが発生する可能性があるため、鉄筋計を橋軸方向に6本埋設した。また変形の経時的な測定に力点を置き、支点付近および支間1/4点付近の2ヶ所に傾斜計を設置し、たわみ角を測定することで曲率を算出した。

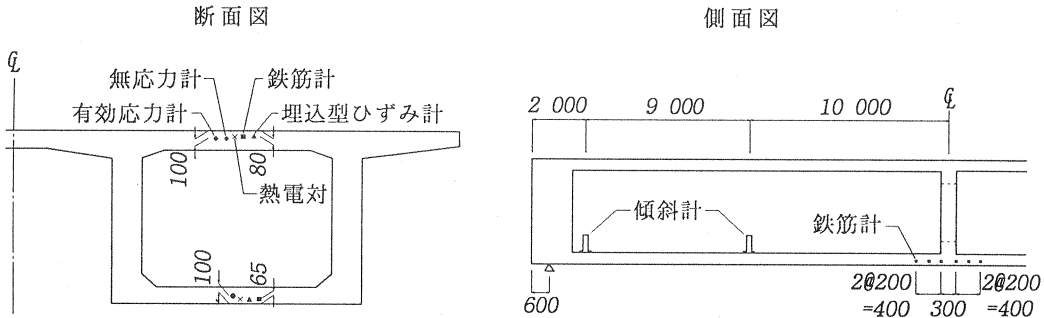


図-2 実橋測定位置

また、実橋の計測と平行して上床版コンクリートを対象として、図-3に示すようなダミー供試体を用いて、クリープ、収縮ひずみの測定を行った。これらのダミー供試体は実橋箱桁内に設置し測定を行っており、クリープ用供試体は、実橋と同日にプレストレスを導入し、導入応力は約65kgf/cm²である。また、緊張力およびストレスロスの管理にはロードセルを用いて行っている。

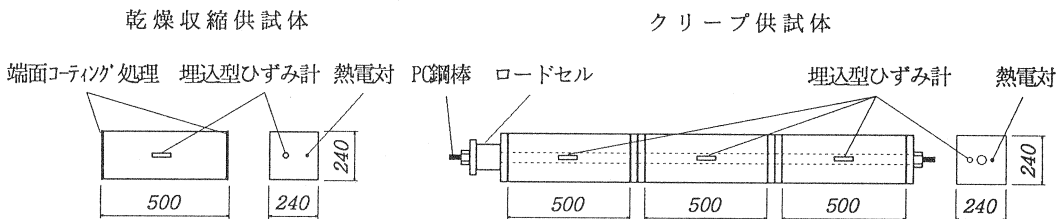


図-3 ダミー供試体形状寸法

また、コンクリートの強度は、実橋打設時に採取した円柱供試体 (φ100×200mm) を用いて測定し、その結果を表-1に示す。養生条件としては、緊張時は現場養生の供試体、28日は20±3℃の水中で養生された供試体を用いて試験を行った。

表-1 コンクリートの強度試験結果 (単位: kgf/cm²)

		緊張時	
			28日
下床版	圧縮強度	423	420
	ヤング係数	3.11×10 ⁵	3.29×10 ⁵
ウェブ	引張強度	-----	26.0
	圧縮強度	330	423
上床版	ヤング係数	2.92×10 ⁵	3.22×10 ⁵
	引張強度	-----	30.3

4. 解析方法^[3]の概略

クリープ解析には、応力履歴を考慮したstep-by-step法を用い、プレストレスの導入から静荷重の載荷および長期材齢に至るまで連続的にクリープ解析を行った。本橋は、箱形断面、且つ鉄筋およびP C鋼材が多段に配置されているため、長期変形のクリープ解析の計算は煩雑である。そこで、部材高さによって変化するコンクリート幅に対して、断面を5層のコンクリートブロックに分け、多段鉄筋およびP C鋼材に関しては、コンクリートブロック各層に分けてクリープ解析を行った。なお、リラクゼーションは考慮していない。

解析方法の概略は次の通りである。断面のひずみおよび応力分布は、軸方向力および曲げモーメントの釣合い条件より得られ、さらにひずみの直線性を仮定すれば、重心位置および曲率が求められる。クリープ、収縮ひずみによるストレスロスが生じた場合は、鉄筋、P C鋼材それぞれのひずみとその位置でのコンクリートの変化ひずみが等しいという適合条件を用いて各々のひずみ分布を求めることができる。また、持続荷重が載荷された場合、所定の持続荷重の下で、ひずみの直線性を仮定したコンクリート、鉄筋およびP C鋼材のすべてに平面保持が成立すると仮定すれば、ひずみ

および応力分布を求めることができる。また、載荷荷重によってひび割れが発生しない場合、各段階によって換算断面が異なるため、厳密には各段階の断面の応力、ひずみ分布を重ね合わせるのが正しい。しかし、ひび割れ断面では重ね合わせることができないため、ひび割れがない場合もひび割れ断面と同様にその時点での全応力に基づいた釣合いから算定した。なお、今回の解析では総ステップ数を15として計算を行った。

解析に用いたコンクリートの材料特性として、圧縮強度、弾性係数および引張強度は表-1に示す標準養生された材齢28日の値を用いた。クリープ係数、および収縮ひずみの値は、表-2に示す3種類の組合せにて計算を行った。なお、解析に用いた実測値のクリープ係数は回帰式から算出した。JSCEによる算出条件としては、図-4に示す実際の外気環境を参考にして、湿度は一定として75%を用い、温度は可変として着目点までの平均コンクリート温度(経過200日以降は平均気温)を用いた。実橋に関して、700×700mmの検査用開口部が1ヶ所設けてあり、これを考慮して箱内部分を露出面積としたV/S(V:体積, S:表面積)を用いて、クリープおよび収縮ひずみを算出した。

表-2 クリープ、収縮ひずみの組み合わせ

	クリープ係数	収縮ひずみ
CASE-1	JSCE	JSCE
CASE-2	実測値	上床版実測値
CASE-3	実測値	下床版実測値

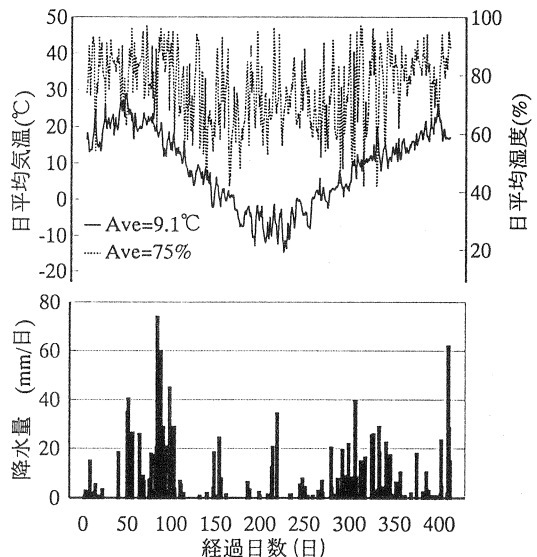


図-4 環境条件

5. 測定結果および考察

図-5~8にクリープ係数、収縮ひずみの実測値をJSCE、MC90による予測値と併せて示す。図-5に示す実橋のクリープ係数に関して、JSCE、MC90の値は初期材齢において進行に違いを見せるが、約400日では、ほぼ同等の値である。また、図-6に示すダミー供試体のクリープ係数は、材齢10日程度まではMC90と良く一致しているが、10日以降、実測値は急激に進行している。この理由として、この時期が7~8月の夏期に相当しており、気温の上昇に伴うクリープの進行は、JSCE、MC90による予測値よりも大きいことが考えられる。また、材齢300~400日間の進行度に対しても同様のことがいえる。図-7に示す実橋の収縮ひずみに関して、上床版の実測値をみると、経過40~200日程度において、収縮ひずみの回復が生じている。これは、橋面が未

舗装であるため、降雨の影響によるものと思われる。一方、下床版は降雨の影響を受けないため、収縮が進んでいる。また、クリープ係数の場合と同様に、夏期に相当する材

齢20~100日、300~400日の期間はJSCE、MC90の予測値よりも大きな進行を示す。図-8に示すダミー供試体の収縮ひずみは、降雨の影響を受けない下床版の収縮ひずみと同様な傾向を示し、材齢約400日では、JSCEの予測値とほぼ同等の値である。

図-9~11に上床版のコンクリートひずみ、応力および鉄筋応力の実測値を解析値と比較して示す。ひずみの実測値は、打設直後からの全ひずみから温度変化によるひずみを差し引いたもので、応力に関わるひずみと収縮ひずみの和を表したものである。解析値は、緊張直前から行っている。なお、プレストレス力と自重の割合から、支保工が受け持つ死荷重は全死荷重の60%とした。図-9によれば、ひずみの実測値は極初期材齢において大きな引張りひずみを示し、支保工撤去までの約12日間において、全ての解析値と実測値が一致していない。また、図-10、11に示すように、鉄筋応力およびコンクリート応力も同様に引張り応力の発生が認められる。その原因としては、①凝結前の水和熱によるひずみは、

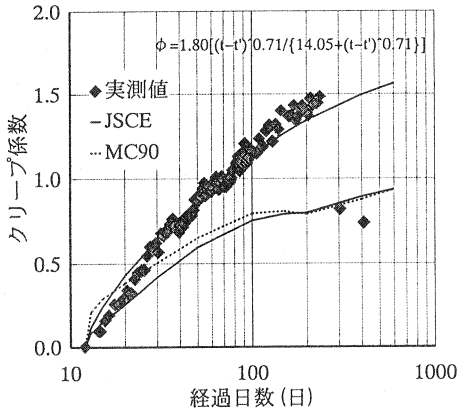


図-5 クリープ係数 (実橋)

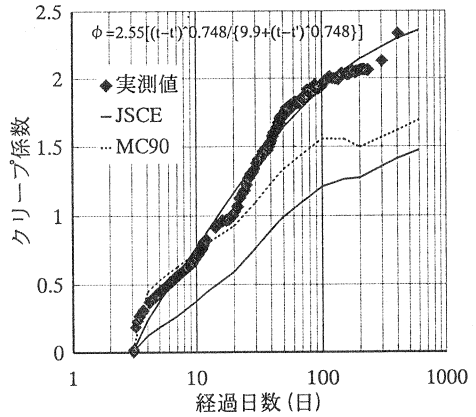


図-6 クリープ係数 (ダミー供試体)

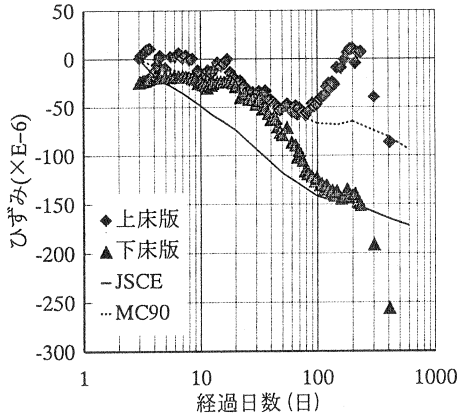


図-7 収縮ひずみ (実橋)

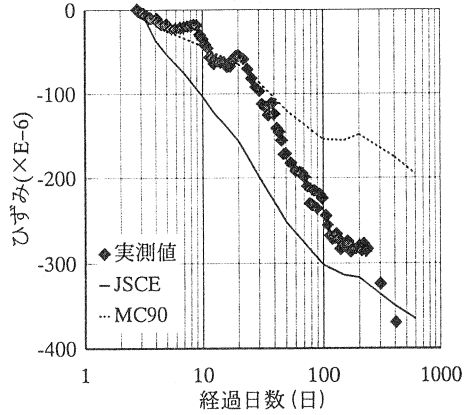


図-8 収縮ひずみ (ダミー供試体)

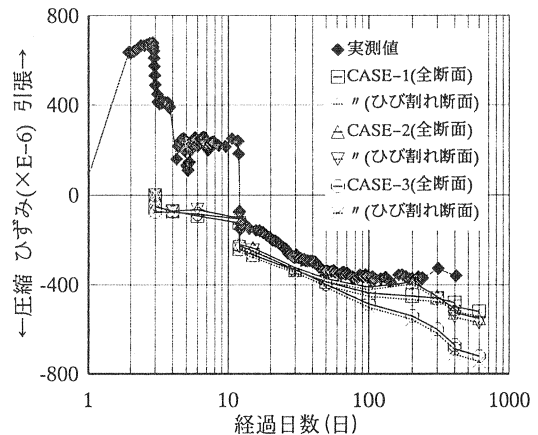


図-9 上床版コンクリートひずみ

埋込型ひずみ計によれば相当に大きな値を示すこと、②水和熱の影響による微細なひび割れの発生、③プレストレス導入において、支保工の負担する桁重量の変化が不明確であること、等が挙げられる。

支保工撤去後から経過日数約30日程度までに、急速なひずみ、応力の増加がみられる。これについては、実測のクリープ係数を用いても予測できず、微細なひび割れや水和熱による温度履歴を受けている影響とも考えられる。経過40日以降では、上床版のコンクリートひずみの実測値は、ひずみの進行が鈍化しており、これは、上床版の収縮ひずみが回復しているためと考えられる。また、鉄筋応力についても同様のことが言える。経過240日から300日にかけて、コンクリートひずみはやや回復し、鉄筋応力は増加している。この期間では収縮ひずみが上下床版とも大きく進行しており、鉄筋応力に関しては、CASE-2が良く傾向を捉えている。しかし、コンクリートひずみの回復についてはいずれのCASEにおいても予測できず、現時点ではこの点については説明することはできない。一方、コンクリート応力に関しては、解析値は材料特性の違いによる差はほとんどみられず、実測値と比較的一致しているのは、応力が自重との釣合いで決まっているからと考えられる。

図-12に下床版のコンクリートひずみを示す。これによると、支保工撤去後から経過40~50日までの引張ひずみの進行は、上床版のコンクリートひずみと同様に、上床版コンクリートの微細なひび割れや水和熱による温度履歴を受けている影響と思われる。また、経過100日~200日程度にかけて、再び引張側にひずみが進行するのは、上床版の収縮ひずみが回復したことや、下床版の収縮ひずみの進行が鈍化したことにより、下床版の実測ひずみが伸びる方向の影響を受けたためと思われる。しかし、全体的な傾向は、CASE-2と良く一致している。また、舗装によるひずみの変化が大きいことから、下床版にひび割れが発生しているものと思われる。

図-13に下床版の鉄筋応力を示す。実測値は支間中央の隔壁の影響を受けていることも考え、最大値と平均値とを併せて示した。支保工撤去後100日程度まではいずれの解析値も圧縮側へ過大評価している。これは上下床版には15日間の材齢差があり、解析に用いた上床版の実測クリープ係数と、対象とし

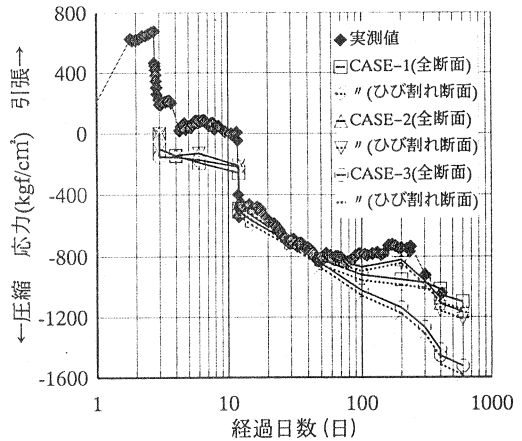


図-10 上床版鉄筋応力

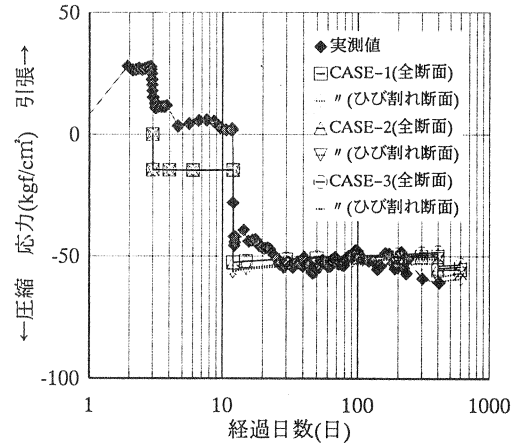


図-11 上床版コンクリート応力

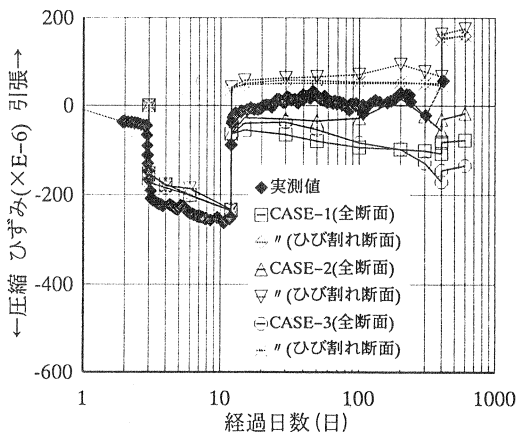


図-12 下床版コンクリートひずみ

ている下床版のクリープ係数とが一致していないことや、図-12の下床版コンクリートひずみと同様に、上下床版にひずみ差が生じた影響と思われる。また、経過100日以降、実測最大値にばらつきが生じており、下床版に微細なひび割れが生じていると考えられる。

図-14にプレストレス導入後の曲率を示す。実測値は、傾斜計から得られるたわみ角から、死荷重を等分布荷重と仮定して算出した値である。経過40日以降、実測値は減少しており、いずれの解析値もその傾向を捉える事ができない。この理由として、解析では断面を一様としているが、実橋では上下床版の収縮ひずみ差により負の曲率が生じていることが挙げられる。また、橋面の舗装により、大きく曲率が増加しているおりに、このことからひび割れの発生が認められる。

6. まとめ

PRC単純箱桁橋の約400日の測定結果と、載荷時材齢を考慮したstep-by-step法に基づくクリープ解析とを比較検討した結果、本研究の範囲内で以下のことが分かった。

- (1) JSCEのクリープ係数の予測値は、実橋・ダミー供試体ともに実測値の60%程度であった。
- (2) JSCEの収縮ひずみの予測値は、降雨の影響を受けた上床版では約2倍、降雨の影響を受けない下床版では65%程度であった。また、ダミー供試体では実測値とほぼ一致した。
- (3) 降雨の影響を受けない場合の夏期のクリープおよび収縮ひずみの実測値は、JSCEの予測値よりもかなり大きく進行する。
- (4) 3つのケースについて解析を行った結果、初期材齢時を除きコンクリートひずみ・応力、鉄筋応力に関しては比較的一致しており、特に上床版の収縮ひずみを用いたCASE-2が傾向を良く捉えている。
- (5) しかし、曲率に関して、上下床版の収縮挙動が異なった場合、断面に一様とした本解析では正確にその傾向を捉えることができない。

参考文献

- [1] 落合, 手塚, 高橋, 佐藤: PRC単純箱桁橋の時間依存性挙動について, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.2, pp703-708, 1995
- [2] 鈴木, 川尻, 横山, 中島: アネップ川橋のたわみ管理, プレストレストコンクリート技術協会シンポジウム論文集, Vol.4, pp423-428, 1994
- [3] 山本, 佐藤, 涌井, 落合: PRC部材の長期変形挙動の検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.2, pp973-978, 1994

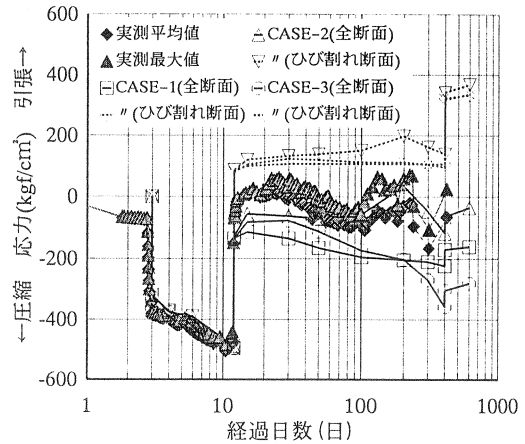


図-13 下床版鉄筋応力

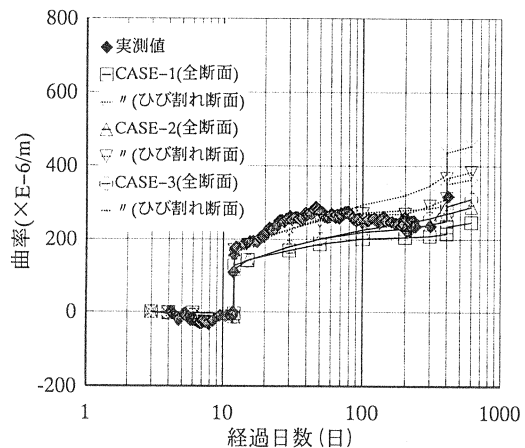


図-14 曲率