

## 報告 塩害に対し長期耐久性を目指した PC 橋の施工

古村 豊<sup>\*1</sup>・三浦 一浩<sup>\*2</sup>・渡辺 幹雄<sup>\*3</sup>

**要旨**：本橋は、青森県陸奥湾沿岸に架橋する橋長 410m の海上橋である。構造形式は、9 径間のポストテンション方式 PCT 桁橋である。架橋地は、塩害と凍害の影響を受ける北日本特有の海岸環境にあることから、その設計、施工において十分な塩害対策が必要であった。本橋では、VE 提案により設計、材料、施工面から品質確保と長期的な耐久性確保を目的としてプレキャストセグメント工法が採用された。さらに徹底した塩害対策として W/C の低減、PC 鋼材の多重防錆対策、透水性型枠の使用などによりリスク低減を図った。本報告は本橋の設計、施工における塩害対策について報告する。

**キーワード**：塩害対策、プレキャスト化、マルチレイヤープロテクション、透水性型枠

### 1. はじめに

本橋は、青森県陸奥湾に面した国道 4 号線の建設工事の一環として、国土交通省より発注され、建設中の橋長 410m の海上橋梁である。構造形式は、3 径間連結ポストテンション方式 PCT 桁橋を 3 連で構成する計 9 径間の PC 橋梁である。

架橋地である青森県陸奥湾沿岸部は、東北地方特有の季節風や海岸環境条件により塩害および凍害の影響の激しい地域として知られている。本橋の設計、施工を行うにあたっては、その設計耐用年数を 100 年として徹底した塩害対策を行った。本橋では、長期的な耐久性確保を目的として総合評価方式の VE 提案において主桁のプレキャストセグメント化が採用された。さらに、主桁コンクリートの高強度化、W/C の低減、塩化物イオンの浸透深さの予測評価、マルチレイヤープロテクション<sup>3)</sup>の概念を取り入れた PC 鋼材の多重防錆対策、セグメント目地部のカップラーシースの採用、透水性型枠の使用、間詰め床版のコンクリートの耐久性向上、樹脂被覆 PC 鋼材用定着具の定着性能確認試験の実施、凍害対策を目的とした空気量の増加など、種々の対策を行った。

### 2. 橋梁概要

#### 2.1 工事概要

本橋の工事概要を以下に示す。国道 4 号土屋バイパス建設工事は、青森市浅虫から平内町中野までの総延長 4.2km の付替え建設工事である。本橋は、バイパス計画区間に存在する 7 カ所ある急カーブのうちの 1 つを回避するために海上に架橋される道路橋である。

工事名：一般国道 4 号 土屋大橋上部工工事

発注者：国土交通省 東北地方整備局

施工者：ピーエス三菱・安部日鋼工業 JV

工事場所：青森県東津軽郡平内町大字土屋地内

工期：2005 年 7 月 8 日～2007 年 6 月 25 日

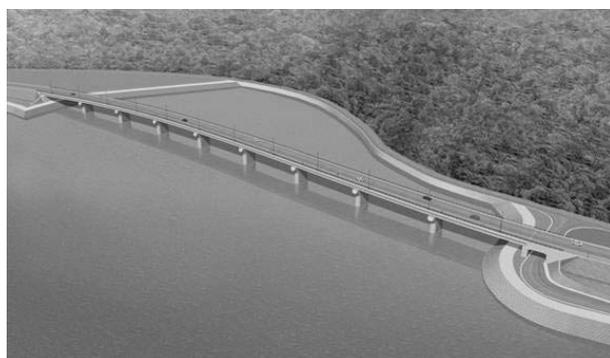


図-1 完成予想図

\*1 (株) ピーエス三菱東北支店 技術部設計グループ 工修 (正会員)

\*2 (株) ピーエス三菱東北支店 技術部設計グループ

\*3 (株) ピーエス三菱東北支店 PC 工事部

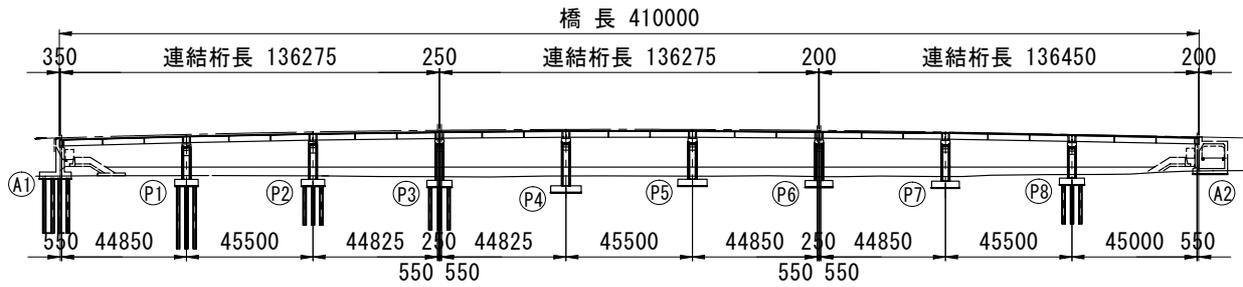


図-2 橋梁一般図（側面図）

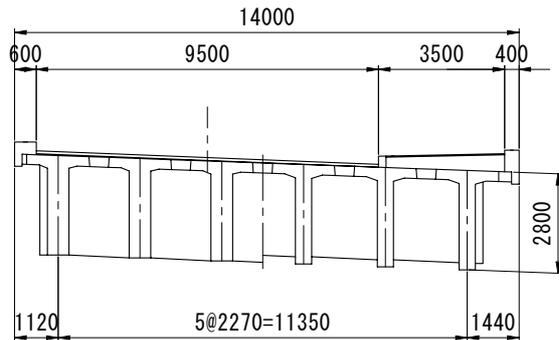


図-3 標準断面図

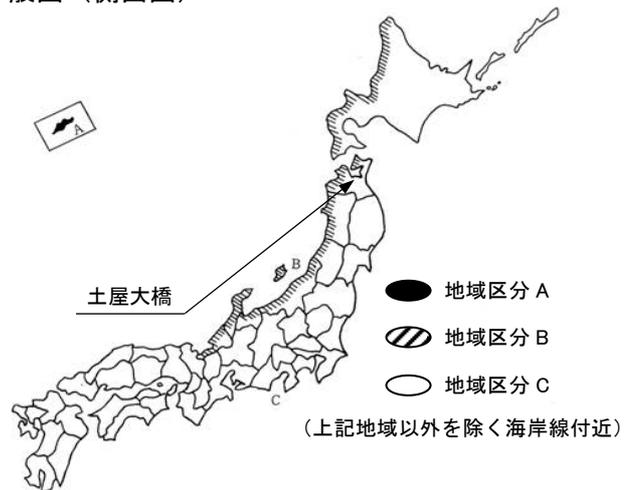


図-4 架橋地点の塩害地域区分

## 2.2 橋梁概要

本橋の橋梁一般図を図-2および図-3に示す。本橋のPCT桁は、桁長約45m、桁重量約200tであり、PCT桁としては国内最大クラスの規模である。

## 2.3 塩害環境

道路橋示方書では、これまでの塩害損傷の実態および飛来塩分量全国調査の結果、コンクリートの塩分浸透試験に基づき、設計耐用年数を100年と想定した場合の塩害の影響による最小かぶり、塩害の影響地域区分を定めている。本橋が架橋される塩害環境は、地域区分C、塩害対策区分Sであり塩害の影響度合いが激しい環境下にある（図-4参照）。

## 3. 桁製作および架設方法

主桁セグメントの製作は、塩害や冬期施工の影響を受けない全天候設備を有するJIS工場屋内ヤードにおいて、冬期間を通して製作した。主桁セグメントは、架橋場所までトレーラーにて運搬した。主桁組立は、A1橋台背面に造成し



写真-1 主桁架設状況

た主桁組立ヤードで行った。主桁架設は、主桁を自走台車にて架設位置まで引き出し、2組桁による下吊り式架設桁架設工法によって、A1～P1径間から順次架設した。

本橋の主桁重量は、約200tと国内最大クラスの規模であり、1組桁の最大適用範囲（国土交通省基準）である155tを大きく超えている。このため1組桁架設桁によって架設する場合は、転用の見込めない新たな架設桁が必要となり不経

表－1 塩害対策一覧

項目		仕様	採用理由	
の コ ン ク リ ー ト 施 工	主桁製作方法	プレキャストセグメント化	VE提案	
	水セメント比	43%以下→実施工：35.9%	発注者マニュアル <sup>4)</sup> 準用	
	単位セメント量	330kg/m <sup>3</sup> 以上→実施工：432kg/m <sup>3</sup> 早強ポルトランドセメント	発注者マニュアル <sup>4)</sup> 準用	
	単位水量	160kg/m <sup>3</sup> 以下→実施工：155kg/m <sup>3</sup>	VE提案	
	空気量	6.0%（凍結融解抵抗性）	発注者マニュアル <sup>4)</sup> 準用	
	型 枠	透水性型枠	発注者要件	
	打設時期（場所打ち）	冬期間の打設を回避	発注者マニュアル <sup>4)</sup> 準用	
	間詰めコンクリート	ひび割れ防止対策として膨張材を使用	温度応力解析評価	
鉄筋	鉄筋防錆	エポキシ樹脂塗装鉄筋（220±40 μm）	(1)式により防錆必要	
	加工・組立	樹脂被覆結束線の使用	発注者マニュアル <sup>4)</sup> 準用	
P C 鋼 材	PC鋼材防錆		(1)式より防錆不要となるが マルチレイヤー プロテクション によるリスク低減を実施	
	シース	標準部		ポリエチレン製シース
		目地部		セグメントカップラーシース
	定着具防錆			エポキシ樹脂塗装仕様（220±40 μm）
か 鋼 材 の	標準部（床版上面）	70mm（35mm）	発注者マニュアル <sup>4)</sup> 準用	
	スペーサ	モルタルスペーサ	発注者マニュアル <sup>4)</sup> 準用	
	インサート	セラミック製	発注者マニュアル <sup>4)</sup> 準用	

済な施工となる。このことから本橋の主桁架設方法は、2組桁による架設桁架設を採用した。

#### 4. 塩害対策

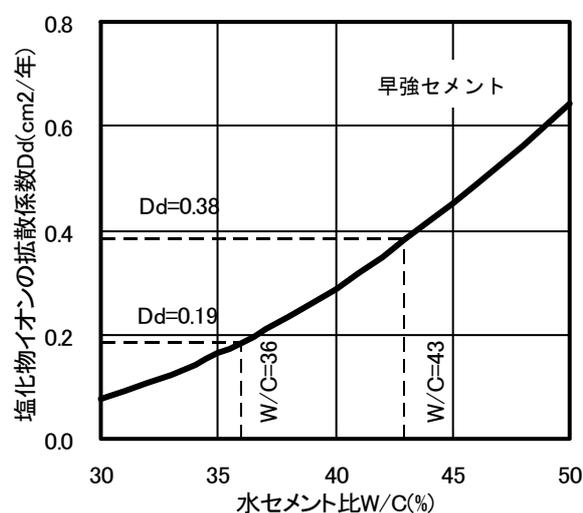
##### 4.1 塩害対策概要

設計耐用年数を100年とする本橋の塩害対策は、緻密なコンクリートとすることで外部環境から侵入する塩化物イオンの拡散速度を低減、施工過程で侵入する塩化物を抑制、PC鋼材にマルチレイヤープロテクションの概念を取り入れた多重防錆機能とすることで耐久性に対するリスクをより低減する方針とした。本橋の塩害対策を表－1に示す。

##### 4.2 主桁の塩害対策

###### (1) プレキャストセグメント化

本橋ではVE提案により耐久性向上を目的として主桁のプレキャストセグメント化を提案した。プレキャスト化による効果は、優れた工場設備による品質管理、熟練工員による製造管理、



図－5 Dd－W/C の関係<sup>2)</sup>

屋内設備による製造、沿岸部でのコンクリート打設作業の省略などが挙げられる。本工法の採用は、塩害対策として重要な部材の耐久性を向上させることができるほか、工期の短縮および建設資材の削減により環境保全にも貢献できるため、非常に有益な提案であるといえる。セグ

メント製作では、W/C を当初設計の 43%から 35.9%に低減して主桁部材の耐久性の向上を図った（図-5 参照<sup>2)</sup>）。また、単位セメント量、単位水量、ワーカビリティの改善を目的に高性能減水剤を使用し、スランプを 15cm として施工した。さらに、主桁コンクリート表層部の緻密化を目的として、セグメント型枠に透水性型枠を採用した。

## (2) 透水性シートの選定試験

透水性シートを鋼製型枠に使用して施工した事例は少ない。このためセグメント桁製作に先立ち実物大の部分試験体（桁長 3.0m）を製作して表-2 に示す項目について確認試験を行った。試験は、2 社の鋼製型枠用の透水性シートを対象として桁製作工程を再現して実施した。両製品の試験結果には、色むら発生、シート材のめり込みなどに顕著な差が確認されたため、この結果を考慮して A 社製品を採用した。また、シートの転用は両製品とも不可能であり、コスト面で課題となった。

表-2 試験結果概要

	A社製品	B社製品
シートの貼付け	△ 施工性難あり	△ 施工性難あり
打設作業	○ 異常なし	○ 異常なし
脱 枠	○ 異常なし	× シート食込み
外 観	○ 良好	△ 色むらあり
シートの転用性	× 転用不能	× 転用不能

## 4.3 PC 鋼材の防錆対策

### (1) 塩化物イオンの浸透深さの予測評価

主桁の PC 鋼材の防錆仕様の検討を目的として、設計耐用年数 100 年間の塩化物イオンの浸透深さを、ミニマムメンテナンス PC 橋の開発に関する共同研究報告書<sup>1),2)</sup>に準じて評価した。その検討方法は、設計耐用年数の 100 年間における鋼材位置での塩化物イオン量が鋼材の腐食発

生限界塩化物イオン量を超えないように、(1)式のフィックの拡散方程式から評価検討を行った。

$$Cd = \gamma d \cdot Co \left( 1 - \operatorname{erf} \frac{0.1c}{2\sqrt{Dd \cdot t}} \right) \quad (1)$$

$$Cd < C_{corr} - C_{init} \quad (2)$$

$Cd$  : 鋼材位置の塩化物イオン量の期待値

$\gamma d$  : 鋼材位置の塩化物イオン濃度  $Cd$  の設計値のばらつきを考慮した安全係数 (1.0)

$Co$  : コンクリート表面の塩化物イオン濃度

$c$  : 100 年後の腐食発生限界塩化物イオン量となるコンクリート表面からの深さ

$t$  : 塩化物の侵入に対する耐用年数 (100 年)

$C_{corr}$  : 鋼材腐食発生限界量 (1.2kg/m<sup>3</sup>)

$C_{init}$  : 初期塩化物イオン量 (0.07kg/m<sup>3</sup>, セグメント製作工場の試験値)

$\operatorname{erf}$  : 誤差関数

本橋の架橋地点の飛来塩分量が不明であったため、本橋の地域区分 C の平均値から算定した  $Co$  値<sup>2)</sup> (4.1kg/m<sup>3</sup>) のほかに、波しぶきが直接部材にかかる飛沫帯の  $Co$  値<sup>2)</sup> (13.0kg/m<sup>3</sup>) についても評価を行った。また、W/C と  $C_{init}$  は本橋の主桁製作工場の実施工値を用いた。

検討の結果を表-3 に示す。検討の結果、両ケースの浸透深さは、主桁のシースまで到達せず、ケース 2 において鉄筋かぶり 70mm を若干超過する結果となった（図-6 参照）。このため、PC 鋼材の防錆仕様は、「かぶり + 鋼製シース + 裸 PC 鋼材」で耐久性上の要求性能を満足することとなる。

表-3 100 年後の腐食発生限界値となる深さ

CASE1	地域区分C	59.5mm
CASE2	波しぶきが部材に直接かかる場合	77.1mm

しかし、どのような防錆システムでも完全なものはないという、いわゆるマルチレイヤープロ

テクションによる評価では、耐久性に対するリスクをより低減するため、多重防食とする必要がある。本橋のPC鋼材の防錆仕様は、発注者との協議の結果、マルチレイヤープロテクションの概念を取り入れて、「かぶり+ポリエチレンシース+樹脂被覆PC鋼材」という多重防錆機能とした。さらにPC鋼材定着具を樹脂塗装仕様、グラウトキャップをポリエチレン仕様とすることで、PC鋼材を完全な絶縁状態とした。

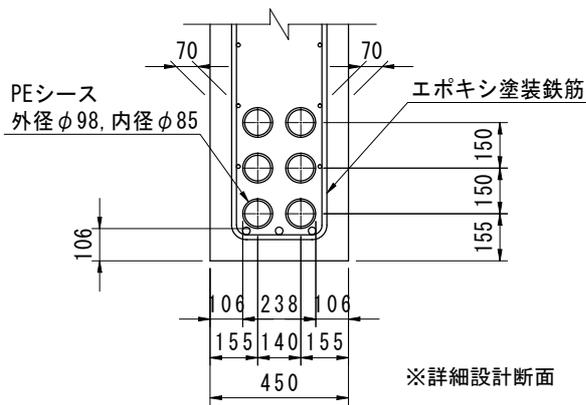


図-6 主桁のかぶり詳細断面図

(2) 定着具の定着性能確認試験

主桁PC鋼材は、樹脂被覆PC鋼材(12S15.2mm)を採用した。被覆鋼材にはポリエチレン樹脂被覆PC鋼材を、定着具には同被覆鋼材用の定着具を採用した。本定着具は、従来型の定着具に対して同被覆鋼材をくさび定着できるほか、定着体金属部に樹脂塗装を施した新しい定着具であり、本工事が最初の実績となる。



写真-2 試験後の鋼材

このため被覆鋼材に対する定着性能を確認するため、JSCE-E-503-1999に準じて定着性能確認試験を実施した。試験の結果、PC鋼材の規格破断荷重の95%(0.95Pu) 載荷時においても、めり

込みおよびズレなどの異常は確認されず、定着効率を満足する結果が得られた。

4.4 セグメント目地部の塩害対策

セグメント工法では、セグメント目地部の耐久性の確保が重要となる。セグメント目地部は、活荷重載荷時においても引張応力が生じないように設計している。しかし、もし目地部にひび割れが発生した場合、そこからの塩分侵入によってPC鋼材が腐食するようなことは好ましくない。本橋では、目地部におけるPEシースに独立行政法人土木研究所で推奨するセグメントカップラーシース<sup>2)</sup>を採用した。このシースは、図-7に示すようにセグメント目地部において2重管構造となっているため、もし目地部にひび割れが発生した場合でも、シース内へ塩化物イオンが侵入することを防ぐことが可能となる。

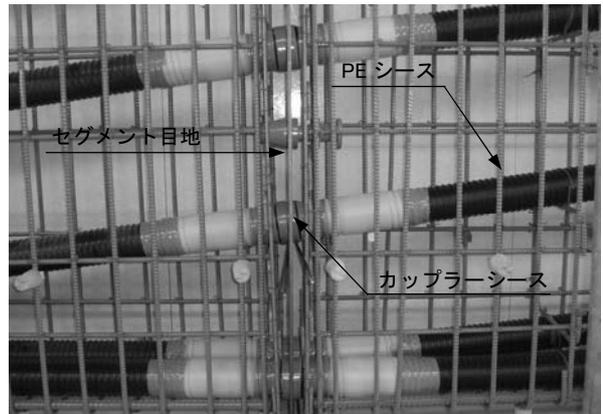


写真-3 セグメント目地

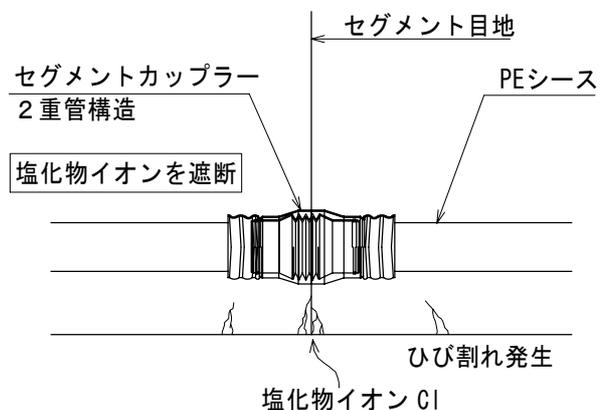


図-7 セグメント目地部の遮塩対策

#### 4.5 間詰めコンクリートの品質確保

間詰め部の床版コンクリートは、図-8に示すように主桁架設後に施工される2次施工のコンクリートである。間詰めコンクリートは、その収縮変形が主桁コンクリートに拘束されることで、収縮ひび割れが発生することが懸念される。そこで本工事では、間詰め部の床版に膨張コンクリートを使用することで、収縮ひび割れの抑制を図った。膨張材には膨張性CaOの水和

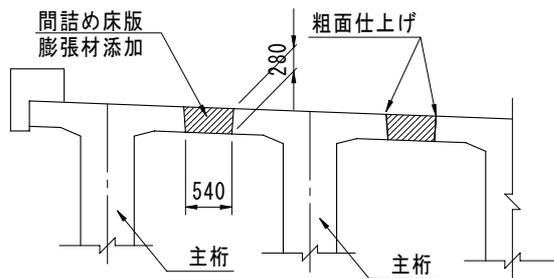


図-8 間詰め床版

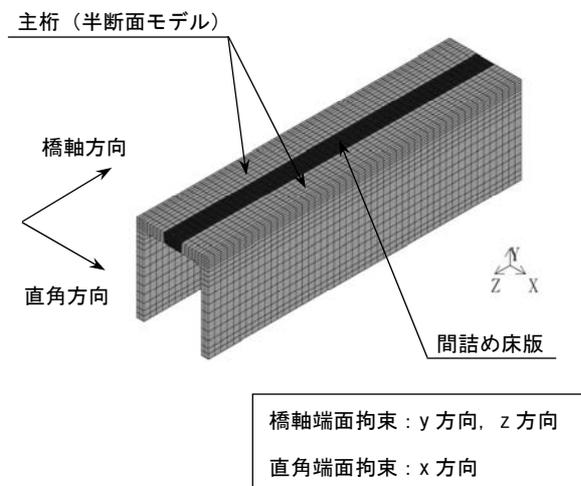


図-9 解析モデル図

生成物を膨張源とする膨張材を  $20\text{kg/m}^3$  添加した。膨張材を使用するにあたり、温度応力解析を実施した(図-9参照)。解析における膨張ひび割れは、膨張材メーカーが推奨する解析用膨張ひび割れの下限值である  $100\mu$  を考慮した。

図-10は解析によってひび割れ指数を評価した結果である。温度解析によるひび割れ指数の結果から膨張材の使用は、床版の初期品質確保に寄与できることを確認した。

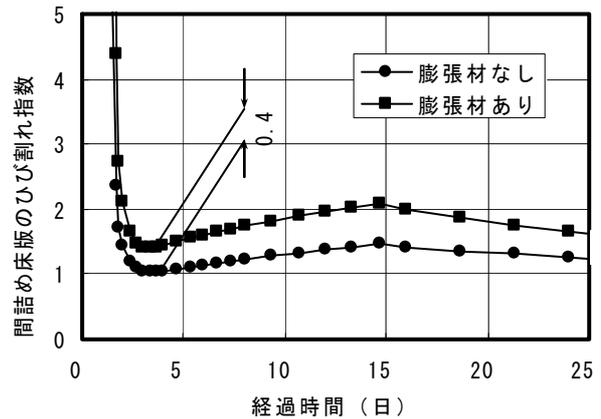


図-10 間詰め床版のひび割れ指数

#### 5. おわりに

本橋の塩害対策は設計耐用年数を100年として、VE提案によりプレキャストセグメント工法が採用されたほか、W/Cの低減、PC鋼材の多重防錆対策、透水性型枠の使用などによりリスク低減を図った。昨今の建設コスト縮減およびLCCの低減が求められるなかで、耐久性に対するリスクマネジメントが、今後、ますます重要となる。本報告が少しでも今後の同種工事の参考となれば幸いである。最後に本橋の設計、施工にあたっては、国土交通省東北地方整備局ならびに同局青森河川国道事務所より多大なご指導を頂いている。また、本橋の実施計画段階において、株式会社長大、極東鋼弦コンクリート振興株式会社のご協力を頂いている。ここに関係各位に心よりお礼を申し上げる次第である。

#### 参考文献

- 1) 国土交通省土木研究所: ミニマムメンテナンス PC 橋の開発に関する共同研究報告書 (2) -コンクリート道路橋の必要かぶりに関する検討-, 2000.12
- 2) 国土交通省土木研究所: ミニマムメンテナンス PC 橋の開発に関する共同研究報告書 (3) -PC 橋の塩害対策に関する検討-, 2001.3
- 3) 土木学会: PC 構造物の問題点とその対策(その2) 委員会報告, 2006.5
- 4) 東北地方整備局: 設計施工マニュアル [橋梁編], 2005.5