

報告 衛星写真と現地調査による津波被害を受けた橋梁の調査

白石 卓也*1・丸山 久一*2・田中 泰司*3・山口 貴幸*4

要旨: 本報告では東日本大震災で津波により被災した橋梁を対象に衛星写真を用いて衛星写真上から被害の概要を把握した。また、被害を受けた全橋梁を対象とした現地調査を行い、被害状況の確認および、橋梁の諸元の計測を行った。調査の結果、東日本大震災で桁流失・移動等の津波被害を受けた橋梁数は合計で 222 橋であった。構造形式等の影響を確認したところ、鋼橋で、橋長が 15m 以上の場合に、被害率が大きくなる傾向が確認された。また、摩擦抵抗力と被害状況の比較を行ったところ、抵抗力の評価だけでは、実際の津波被害を予測できないことが示され、津波波力の予測と評価が重要であることが再確認できた。

キーワード: 東日本大震災, 津波, 衛星写真, 橋梁

1. はじめに

2011年3月11日に発生した東日本大震災では、東北から関東にかけて甚大な被害が生じた。阪神淡路大震災以降、構造物の耐震補強が進んでいたこともあって、地震動による被害は鉄道高架橋、道路橋とも、耐震補強されていなかった橋梁にとどまり、耐震補強されていた橋梁に目立った被害はなかった。

今回の地震による橋梁被害の最大の特徴は、津波による流失、落橋、破壊が生じたことである。しかし、被災地域が岩手県～千葉県と広大であったため被災から数ヶ月経てもなお、津波被害の全容が掴みきれていない状況であった。そこで本研究では、津波による橋梁被害の危険度の判定ができるようにすることを最終目標として橋梁の津波被害の全容を把握し、津波によって橋梁に作用する波力の概要を検討するために被害橋梁の全数調査を行うこととした。まず、衛星写真を用いて衛星写真上から橋梁被害の概要を把握した。次に、現地調査を行い、被害状況の確認と橋梁の寸法の計測を行った。得られたデータを集計し、流出した橋と流失しなかった橋の特徴や共通点について検討を行った。また、幸左らが提案する津波波力の算定式²⁾を用いて、調査結果を整理し、波力評価に向けた課題を明らかとした。

2. 調査対象

調査対象地域は東日本大震災で津波被害を受けた岩手県、宮城県、福島県、茨城県の4県と千葉県の一部である。津波の遡上高さによらず、海岸から4kmまでに架かっている道路橋および鉄道橋を調査対象とした。

3. 衛星写真による被害調査

3.1 衛星写真を用いた調査方法

衛星写真による調査には Google Earth³⁾ を用いた。地震前後の高解像度の衛星写真が提供されていることが、このソフトウェアの大きな特徴である。図-1、図-2に南三陸町志津川周辺の地震前後の衛星写真を示す。この例では左側の鉄道橋と右側の道路橋の2橋が落橋していることが分かる。このように、地震前後の状況を比較しながら、被害状況の確認を行った。

図-3に大槌町周辺の調査例を示す。ここで赤いマークは流失・桁移動等の被害を受けた橋梁を表す。黄色のマークは被害のない橋梁を表す。このように被害の有無を分類しながら対象地域の全橋梁の調査を行った。なお、被害状況が写真だけでは判断できないものには緑のマークを付けた。衛星画像が不鮮明な地域や構造物については、国土院が公開している、被災地周辺の斜め写真



図-1 南三陸町志津川周辺の衛星画像
(地震前, 2010年6月25日撮影)



図-2 南三陸町志津川周辺の衛星画像
(地震後, 2011年4月6日撮影)

*1 長岡技術科学大学大学院 建設工学専攻

*2 長岡技術科学大学 環境・建設系 教授 (正会員)

*3 長岡技術科学大学 環境・建設系 助教 (正会員)

*4 長岡技術科学大学 環境・建設系 技術職員 (正会員)



図-3 大槌町周辺での調査例



図-4 石巻市周辺の国土地理院による斜め航空写真



図-5 津波被害橋梁の分布図
(現地調査の結果を反映したもの)

表-1 衛星写真による被害橋梁の調査結果
(現地調査の結果は反映していない)

	岩手県	宮城県	福島県	茨城県	千葉県	合計
調査数	657	1078	726	700	—	3161
被害あり	61	149	61	2	2	275
被害不明	8	14	53	6	—	81

(図-4 参照) 4)を参考にすることで、データ補完を行った。

3.2 衛星写真の調査結果

表-1 に衛星写真を使った被害橋梁の調査結果を示す。なお、ここに示した値は後述する現地調査の結果を反映していない。衛星写真を使った調査では、あわせて3161橋の被害の有無を確認した。千葉県は落橋被害が茨城県寄りに集中していたため、千葉県全域にわたる詳細な調査は省略した。被害ありと判定された橋の数は宮城県が多く、続いて岩手県と福島県がほぼ同数であった。茨城県と千葉県では被害橋梁数が2橋ずつであった。被害が不明な橋梁に着目すると、福島県に多いことがわかる。その理由としては浸水地域が多いため衛星写真からの確認できない橋が多かったこと、福島第1原子力発電所付

近では橋梁が瓦礫に埋まったままであり、被害が判別できないケースが多かったことが挙げられる。衛星写真による落橋被害の全体図を図-5に示す。流失した橋の最北は岩手県洋野町、最南は千葉県匝瑳市であり、落橋の被害は岩手県～千葉県まで広く分布していたことがこの調査により判明した。

4. 現地調査

4.1 調査方法

衛星写真による調査では瓦礫に埋まっている橋、浸水地帯にある橋などでは、損傷を判定できないという衛星写真の特性上の問題がある。そこで、衛星写真で被害ありと推定された橋梁と被害不明の橋梁を対象として、現地調査による被害の確認を行うことで、調査結果の精度

表-2 現地調査項目

橋長（径間割等）	落橋防止装置の有無
橋幅（舗装幅等）	橋面から水面の高さ
構造高 投影高	桁の流失の有無
床板厚，舗装厚	橋脚台の流失の有無
斜角	高欄などの破壊状況
構造形式（RC，PC，鋼橋）	浮遊物の状況

表-3 衛星写真などの各種資料調査による調査項目

緯度，経度	海からの距離
住所	河口部の川幅
橋名	建設年
路線（鉄道，国道，県道等）	設計者
川の名称	施工者
本流か支流か	使用目的（車道，歩道）



図-6 現地調査の様子

向上をはかった。衛星写真により得られた位置情報，衛星写真をもとに現地へ赴いて実際の被害状況を直接確認した。現地調査では桁移動や桁・橋脚の流失・橋台の沈下が起こっていた場合に被害ありと判定し，高欄の破損等，軽微な損傷だけの場合は被害なしと判定した。調査に際しては被害の有無，橋梁の形状の測定や構造形式の調査を行った。また，比較のため流失等の被害のあった橋の前後の，被害の無かった橋の形状も計測した。表-2に示す調査項目に関してデータを収集した。橋の形状計測にはレーザー測距計，巻尺，コンベックス，スタッフ，ノギスを使用した。特に桁が流失していた場合には巻尺，スタッフでの計測ができないので図-6に示すように傾斜計付きのレーザー測距計によって橋長や水面下までの高さを測定した。断面形状に関しては現地で流失した橋桁を探し出し，その断面を測定するのが理想的ではある。しかし，2011年8月の調査開始時点ではすでに多くの橋の撤去，解体が完了しておりほとんどの場合，橋桁の形状を直接測定することができなかった。そこで流失した



図-7 大槌町周辺の災害復興計画基図（国土地理院提供）

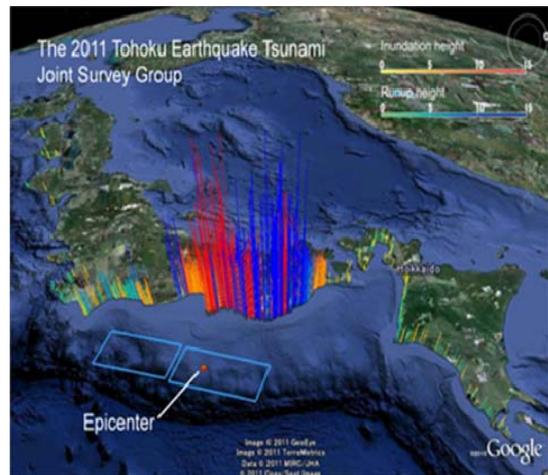


図-8 津波浸水高分布⁵⁾の全体図(海岸工学委員会)

桁が見つからなかった場合には，橋台に残っている支承やエラストイトなどの形跡から構造形式や断面図の推定を行った。被害状況の確認は約500橋，形状測定は約200橋の橋梁で行った。また現地調査後には各種資料調査により表-3に示す調査項目のデータ収集を行った。

4.2 調査結果のデータベース化

衛星写真による調査結果と現地調査の結果には多種，多様な数値・画像データが含まれる。調査結果を効率的に整理し，後に行う，分析作業を円滑に進めるために，調査結果のデータベース化を行った。

4.3 標高データ，津波浸水高

被害のあった橋，被害の無かった橋の分類をする上で，橋の標高と，津波の浸水高は不可欠な因子だと考えられる。そこで図-7に示す国土地理院発行の災害復興計画基図より，橋面の標高を特定した。また津波の浸水高には図-8に示す，土木学会海岸工学委員会が公開している津波浸水高の調査結果⁵⁾を用いた。

表-4 被害橋梁数（現地調査の結果を反映したもの）

	岩手県	宮城県	福島県	茨城県	千葉県	合計
被害あり	78	77	63	2	2	222
被害不明	1	0	26	0	0	28

表-5 用途別被害橋梁数

	鉄道	国道	県道	市道等	合計
岩手県	13	5	6	54	78
宮城県	12	10	6	49	77
福島県	3	0	12	48	63
茨城県	0	0	0	2	2
千葉県	0	0	1	1	2
合計	28	15	25	154	222



図-9 背面盛土のみ流失した鉄道橋（南三陸町）

4.4 現地調査による被害橋梁数

表-4 に現地調査によって確認・修正された被害橋梁数を示す。(仙台航空自衛隊基地内と福島第1原子力発電所の20km範囲は現地調査対象外) 現地調査の結果、被害橋梁の総数は222橋となった。この数字は表-1で示した現地調査を行う前の値よりも少ない。これは衛星写真では上空から見て橋桁が流失したり、移動したりしているように見えたものが、実際には図-9の鉄道橋のように背面盛土のみが流失していたケースや、津波によって運ばれた土砂が橋面に堆積して、上空から見るとあたかも流失したかのように見える橋などが多くあったためである。表-5に、用途別被害橋梁数を示す。国道、県道に比べ、市道等が圧倒的に多いのが今回の被害の特徴であり、それゆえに被害の全容がこの調査を行うまでに掴みきれなかったのだといえる。

5. 調査結果の考察

5.1 構造形式、橋長、水面までの高さの影響

被害のあった橋梁の数と被害の無かった橋梁の数をボックスカルバート、コンクリート版桁橋、コンクリートT桁橋、鋼橋といった構造種別に示したものを図-10に示す。なお図-10以降に示す「被害あり」とは幸左らの判定基準²⁾で上部工の被害がA判定される橋梁である。同図では橋長別に被害の有無を表した。コンクリート版

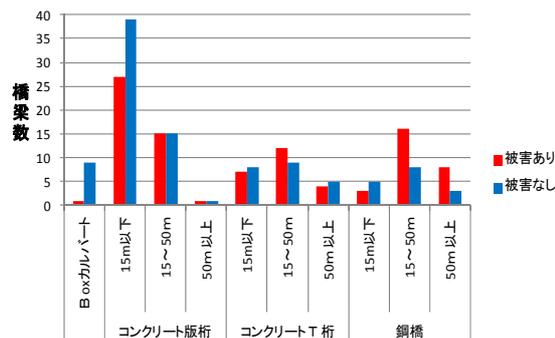


図-10 橋長、構造形式別の調査橋梁数

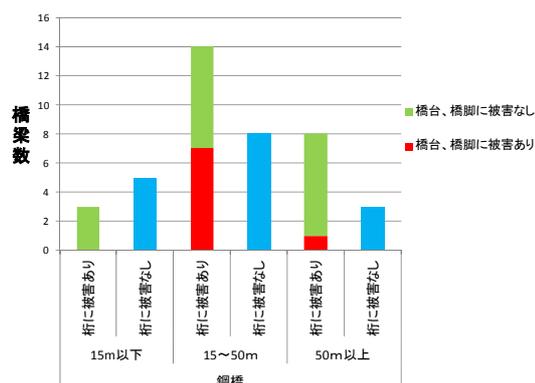


図-11 鋼橋の橋長による橋台、橋脚被害の分類

桁橋は全体の数が多いため、結果として、橋長15m以下の被害橋梁数が多い。ただし、被害なしのものに比べて、被害ありのものの方が数は少ないので被害の割合としては比較的小さい部類であった。

被害の割合に注目すると、鋼橋で、橋長が15m以上の場合に、被害率が顕著に大きくなっていることが分かる。図-11は鋼橋の橋長による橋台、橋脚の被害数を示したものである。この図より橋長15m~50mの場合は、橋脚、橋台の損傷を伴う事例が多いことがわかる。コンクリート橋では、このような傾向が見られないことから一定以上の橋長をもつ鋼橋には桁流失とともに橋台、橋脚の被害が生じやすい要因があるのではないかと考えられる。

図-12に河川の水面から橋面までの高さの分布を示す。なお、この値は現地調査時点での値であるので河川の流況によって若干変動する可能性がある。被害の有無の割合については明確な傾向は見られなかった。

図-13は海岸からの距離の分布を示す。海岸からの距離が離れるにつれて被害橋梁の割合は減少する傾向にあった。この点については、今回対象に加えなかった橋梁も含めて今後、詳細に検討をする必要がある。図-14は標高についての頻度分布である。今回対象とした橋梁のほとんどが、標高10m以下に位置してきたことがわかる。標高10m以下の範囲においては、標高が被害割合に与える影響は確認できなかった。標高が10m以上に位置する橋梁に被害が少ないのは、今回の津波の浸水高

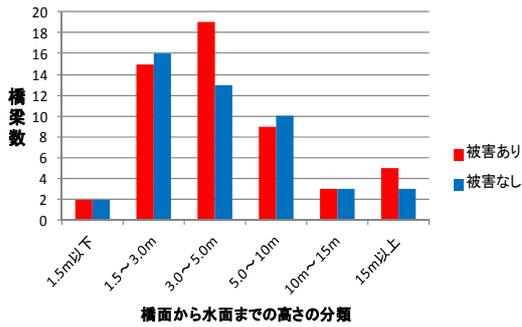


図-12 橋面から水面までの高さの分類

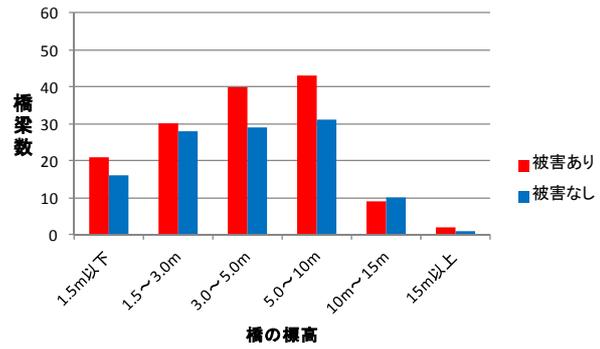


図-14 標高による調査橋梁の分類

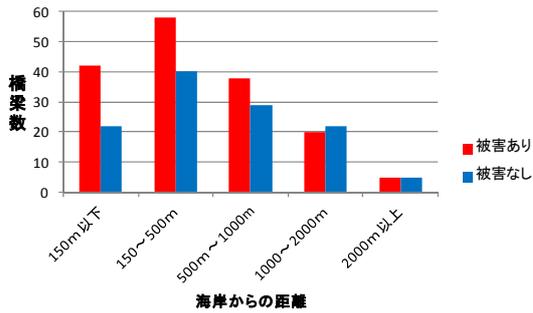


図-13 海岸からの距離による調査橋梁の分類

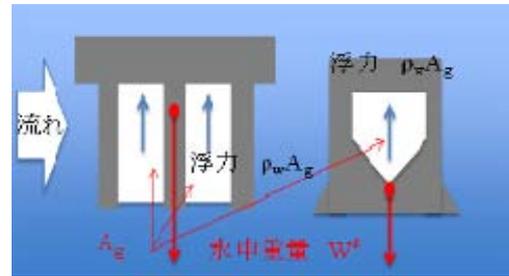


図-15 桁浸水時の浮力の作用状態

を考えれば妥当な結果だと考えられる。

5.2 桁移動に対する抵抗力の影響

今回の調査で得られた、被害の有無と橋の形状を用いて、橋梁の抵抗力の大小と被害状況との相関性を確認することにした。分析に用いる評価方法としては幸左が提案している桁抵抗力-津波作用力比の式²⁾を用いた。抵抗力作用力比 β を求める式を以下に示す。

$$\beta = \frac{\text{抵抗力}}{\text{作用力}} = \frac{\mu W}{0.5\rho_w C_d v^2 A} \quad (1)$$

ここに、 ρ_w :水の密度 (1030kg/m³)、 v :流速 (=6m/s を仮定)、 A :被圧面積、 μ :摩擦係数(=0.6)、 W :上部工の重量、 C_d :抗力係数、である。

流速 v は各地で撮影された映像の分析結果を参考にし、6m/s と仮定した。摩擦係数 μ は庄司らの摩擦係数の測定結果⁶⁾を参考にして定めた。抗力係数 C_d は道路橋示方書⁷⁾の風荷重に対する設計式より求めた。

$$C_d = \begin{cases} 2.1 - 0.1 \left(\frac{B}{D} \right) & (1 < \frac{B}{D} < 8) \\ 1.3 & (8 < \frac{B}{D}) \end{cases} \quad (2)$$

ここに、 B :橋の総幅(m)、 D :橋の総高(m)である。本来、流速 v には、場所ごとの遡上解析や映像分析等によって得られた値を用いるべきであるが、本検討では流速一定とした。この場合、上式は、構造物自身が有する津波作用力、桁抵抗力を算定することになるので、桁移動に対する抵抗性の指標を与える式であるとみなすことができ

る。すなわち、抵抗力-作用力比 β が大きいほど桁の抵抗力が大きく、移動しにくい橋梁であることを示す。

なお、現地調査で計測できなかった項目については、以下の値を使用することにした。

高欄地覆=b400mm × h200mm、鋼板厚=20mm、床版厚=150mm、PCT桁のウェブ幅=400mm、である。

コンクリート橋においてT桁、中空部に空洞がある版桁、箱桁は断面の構造上、津波によって浸水状態に達した場合、図-15に示すように浮力が生じる。浮力を考慮した評価式は以下ようになる。

$$\beta = \frac{\text{抵抗力}}{\text{作用力}} = \frac{\mu(W^* - \rho_w A_g)}{0.5\rho_w C_d v^2 A} \quad (3)$$

ここに W^* :水中重量、 $\rho_w A_g$:桁内空間に生じる浮力とする。(なお鋼橋では浮力を考慮しなかった)

図-16に浮力を考慮しない場合の抵抗力作用力比 β と海岸からの距離の関係を示す。評価方法が実現現象の要点すべてを適切に捉えているならば、被害ありと被害なしは上下に分離されるはずである。今回の検討で被害ありと被害なしが完全に混在していることは、桁の抵抗力の評価だけでは、実際の津波被害を予測できないことを示している。津波波力の予測と評価の重要性が再確認された結果となった。

被害を受けた橋梁の β の値は0~4.6の範囲でばらついたが大半が、2.5以下であった。津波流速には6m/sという比較的大きな値を使用していることから、今回の検討では抗力の最大値に近い値を求めていることになる。そ

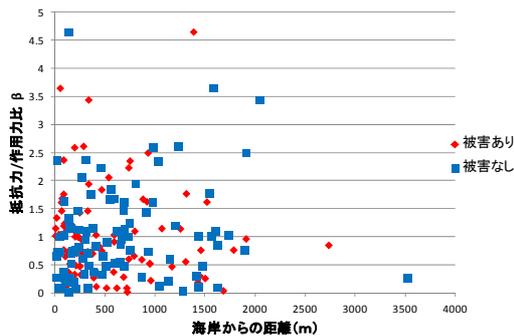


図-16 浮力を考慮しない場合の抵抗力-作用力比の分布図

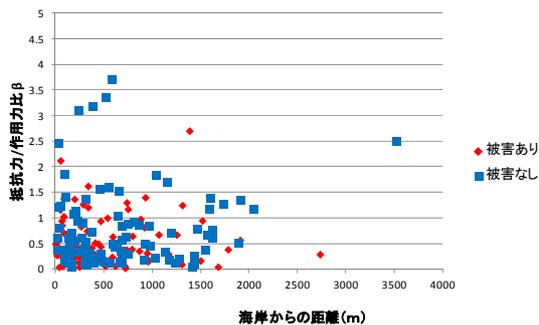


図-17 浮力を考慮した場合の抵抗力-作用力比の分布図

のため、 β が1以上でも多くの橋で、桁の流失や移動が生じているということは、抵抗力以外の浮力や揚力が無視できないことを示唆している。図-17に浮力を考慮した場合の、抵抗力作用力比 β と海岸からの距離の関係を示す。被害ありの橋梁の大半で β が1以下となったことから、津波波力としては流速6m/sの水中に没した時と同程度の力を想定するのが妥当であると考えられる。

抵抗力-作用力比 β を0.1刻みで区分した場合のヒストグラムを図-18、図-19に示す。浮力を考慮する場合もしない場合も被害ありのヒストグラムと被害なしのヒストグラムから差を見出すことができなかった。これは、自重による摩擦抵抗力に大きな有意性がないことを示している。そのため、津波被害の予測には津波による波力の発生機構および津波に対する抵抗機構についての抜本的な検討が必要である。

6. まとめ

本報告で得られた結論を以下に列挙する。

- (1) 衛星写真を使った調査と現地調査を組み合わせることにより、東日本大震災で津波被害を受けた橋梁の全容を明らかにすることができた。結果、津波被害を受けた橋梁数は合計で222橋であり、岩手県、宮城県、福島県に集中していることが判明した。
- (2) 鋼橋で、橋長が15m以上の場合に、被害率が大きくなる傾向が確認された。

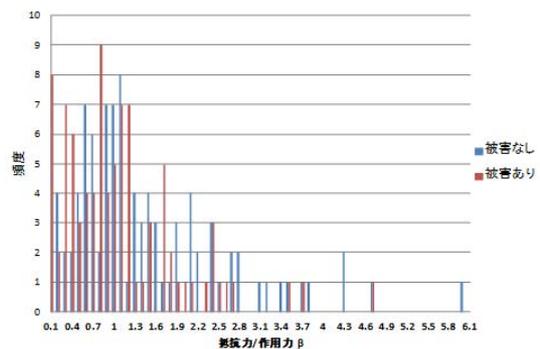


図-18 抵抗力-作用力比 β のヒストグラム (浮力を考慮しない場合)

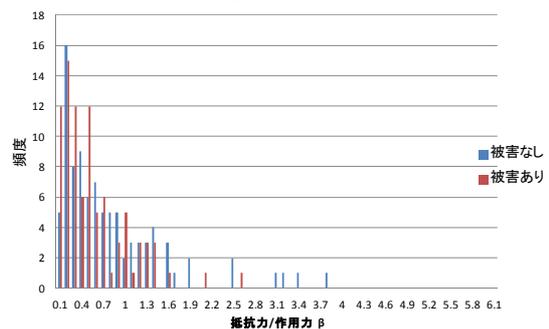


図-19 抵抗力-作用力比 β のヒストグラム (浮力を考慮する場合)

- (3) 桁の抵抗力の評価だけでは、実際の津波被害を予測できないので、津波波力の予測と評価が重要であることが再確認された。

謝辞：現地調査に際しては長岡技術科学大学 高田晋氏、佐藤祐介氏、新潟県コンクリートメンテナンス研究会 陽田修氏、吉原敬氏に多大なる助力をいただいた。

参考文献

- 1) 土木学会・日本都市計画学会・地盤工学会，東日本大震災第一次総合調査団 中間とりまとめ (案)，2011.4
- 2) 幸左 賢二 ほか：道路政策の質の向上に資する技術研究成果報告レポート No.19-2 pp.5-10，2010.6
- 3) Google Earth：
<http://www.google.co.jp/intl/ja/earth/index.html>
- 4) 国土交通省国土地理院：被災地周辺の斜め写真，
<http://zgate.gsi.go.jp/SaigaiShuyaku/20110525/index2.htm>
- 5) 土木学会海岸工学委員会：痕跡調査結果，
<http://www.coastal.jp/ja/index.php>
- 6) 庄司 学 ほか：単径間橋桁に作用する砕波津波の荷重に関する実験的検討，構造工学論文集，第55巻，pp.460-470，2009.4
- 7) 日本道路協会：道路橋示方書 I 共通編，2002.4