

道路構造の見直しに起因した 新たな橋梁計画設計に関する一考察

A Consideration About the Importance of the Flexible Design Method

中野光雄*・坪村健二**・飯山かほり***・廣瀬彰則****

Mituo Nakano, Kenji Tsubomura, Kaori Iiyama, Akinori Hirose

*兵庫県但馬県民局県土整備部八鹿土木事務所朝来事業所 (〒679-3431 兵庫県朝来郡朝来町新井80-3)

** 中央復建コンサルタンツ株式会社 (〒533-0033 大阪市東淀川区東中島4-11-10)

***工修 中央復建コンサルタンツ株式会社 (〒533-0033 大阪市東淀川区東中島4-11-10)

****博 (工) 中央復建コンサルタンツ株式会社 (〒533-0033 大阪市東淀川区東中島4-11-10)

Generally, in case we plan design of a bridge, we have to consider so many prerequisites, for example, a road alignment, right-of-way limit, geographical feature and environmental condition etc. These prerequisites are fixed at the stage where road structure was determined. However, if some design conditions are expanded, we can select a diverse form as a bridge structure. These shows that the possibility of a bridge design spreads rapidly.

In this paper, we show an example that a more rational bridge form was selected, it was caused by change of structure of road. This shows that another approach of the planning method is effective.

Key Words : environment protection, precious plant, v-leg rigid-frame bridge, cost reduction

キーワード：環境保全，貴重植物，鋼V脚ラーメン橋，コスト縮減

1. はじめに

従来，公共工事における各種構造物等の形式選定・検討作業は，いわゆる「上流から下流へ」と，各設計段階の成果を引き継ぎながら深度化をはかる手法で行われている．具体的には計画段階から予備設計または概略設計段階を経て詳細設計段階へと遷移しているのである．しかしこれらの場合一般的に下流から上流へ向かう逆方向の見直し検討はなされなかったのが実態である¹⁾．

一方で国土交通省では，社会経済情勢の急激な変化を受け，主として対象とする事業の持つべき価値の再評価を通じて，すでに完了したあるいは計画進行中の設計成果にまで踏み込んだ『公共事業コスト構造改革プログラム』²⁾³⁾⁴⁾に基づく見直し作業に取り組んでおり，各地方自治体に対しても同様の姿勢が求められている．このことは，今後の公共事業の進め方に，上流で決定された整備方針を下流におけるより合理的な判断のもとに変更することができるフレキシビリティ

を有することの重要性を示唆している．

新設道路事業において盛土構造で計画され，すでに用地取得が終了していた区間に希少植物の自生が確認され，実施設計段階で生態環境への影響低減をねらった橋梁構造への計画変更が実施されることとなった．新構造検討に際しては，盛土構造であったために建設用地幅が幅員方向に大きく広がっていることに着目し，それを利用した構造形式を検討した．本論ではその経緯とその構造の優位性について述べる．

環境要因への配慮を最優先課題としながらも結果的に用地取得上の制約条件が外れた橋梁形式検討は，より広い設計空間を対象とするものとなり，一般的な解に比較しても優位な構造形式の選定が実現できた．これは従来の設計深度化の枠組みをはずした新たな『計画・設計』手法の可能性を示すものと考えられる．

2. 対象橋梁の概要

2.1 道路構造の計画と見直しの経緯

対象とする路線は、旧国道と主要地方道とを跨ぐ新設町道であり、旧国道側起点から山裾に沿う形で土工構造が主体となり計画されている。図-1に対象路線の中心線を示す。本路線の土工区間の終点部には前後を山に挟まれた小谷があり、終点側のトンネルにつながっている。当初、この高低差 15～20m程度を有する小谷区間の道路は盛土構造として計画されていた。

ところが、実施設計段階において、この小谷の起点側尾根部に「兵庫県レッドデータブック（平成 7 年版）」⁵⁾に貴重種 C ランク指定される『カタクリ』の群生が認められ、これらの保護を目的として道路構造の見直しが行われた。

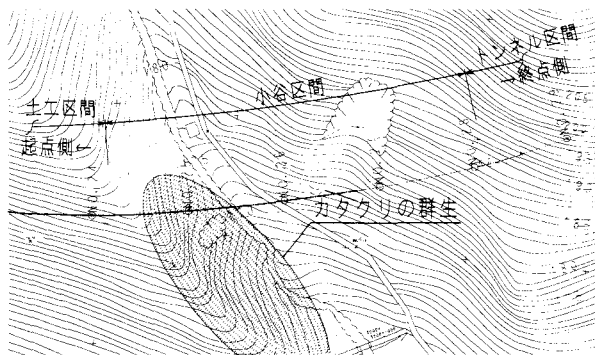


図-1 地形図

2.2 保全対策方針

(1) 生育状況の把握

橋梁計画の前段階として、カタクリの生育状況を把握した。調査項目を以下に示す。

- ・カタクリ生育状況 : 個体分布状況
開花・結実状況
- ・生育地の立地環境 : 照度(相対照度・積算日射量)
土壌(土壌含水比・三相分布)

本地点におけるカタクリの生育状況を図-2に示す。本調査地のカタクリは、尾根に多く分布し、開花個体も尾根に多い状況であった。これは、生育地付近の林床が全体的には暗く日照が不足しており、比較的日照条件のよい尾根が分布の中心になっているためと推測された。

(2) 保全対策方針の決定

貴重植物の群生がルート上に認められた時点で、その保護・育成のためにルートを変更することも考えられるが、学識経験者を交えた検討会において、“大幅な計画ルートの変更を行わなくとも盛土計画としていた小谷区間を橋梁構造に変更することで、植物生育環境の変化を最小限に抑えることが可能”と判断された。

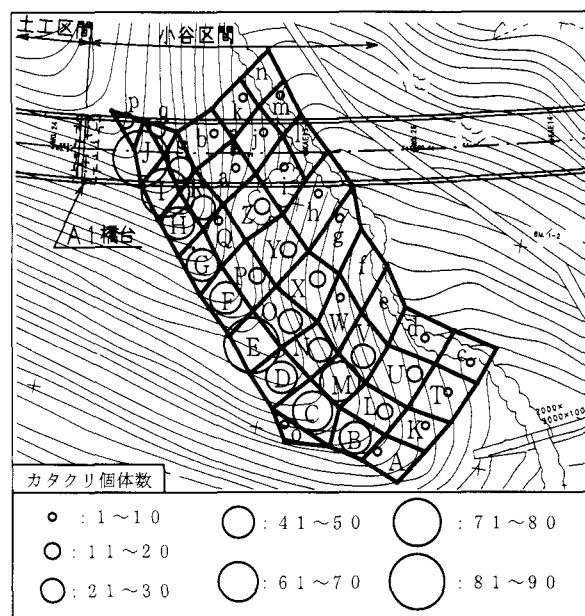


図-2 本地点におけるカタクリの生育状況

ここで、橋梁の設置に伴いカタクリが受ける直接的、間接的影響を以下のように整理した。

- ・直接的影響 : 橋梁下部工の構造物掘削
- ・間接的影響⁶⁾ : I. 日照条件の変化
II. 土壌水分条件の変化
III. 橋梁による降雨の遮断

直接的影響を受けるのは構造物掘削範囲であり、それについてはカタクリ群生地へ構造物を設置しないことで影響を逃れることが可能であった。

しかし、間接的影響のうち上記 I, IIIについては、群生地の一部が橋梁上部工の遮蔽による影響を逃れられないため、その部分については移植を提案した。具体的な移植範囲は以下とした。

- I. 橋梁上部工による日陰線を作成し、太陽高度が高く1日のうちで日照量が多い10時から14時までのうち2時間以上が日陰となる範囲
- III. 橋梁上部工直下となる範囲

さらに、移植したカタクリを橋梁施工完了後に元に戻すことも念頭においた。この範囲としては、生育地立地環境の調査結果から、カタクリの生育にとって照度条件、土壌条件が比較的良好となる生育範囲 D,N (図-2)を中心とした尾根に沿った部分が適している。

以下次章においては、カタクリ保全の条件と同時に経済性、施工性等の通常考慮すべき計画条件に配慮した橋梁計画について記述する。

2.3 橋梁計画

(1) 橋台位置の検討

カタクリへの直接的、間接的影響を回避した上で、経済性に優れる橋台位置を検討した。特にカタクリが隣接するA1橋台位置は、

- ・ 構造物掘削をカタクリに支障させない
- ・ カタクリへの水脈を阻害しない

ことに配慮し決定した。水脈を阻害しないためにはカタクリ群生地の上流側地盤内に永久構造物を設置しないことが重要であるため、ここでは橋台を図-3に示すように尾根線より起点側に設置することで対処した。

A2橋台については、特別な制約がないため、一般的な経済性に着目した比較を行い、この結果橋長は79mとなった。

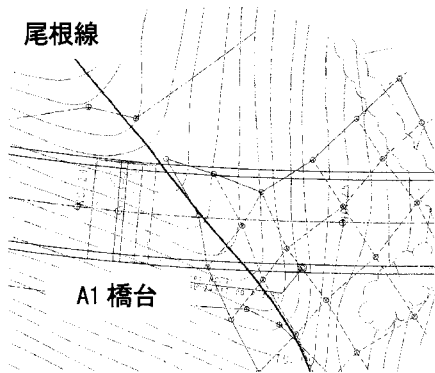


図-3 水脈を阻害しないA1橋台位置の設定

(2) 橋梁形式の検討

1) 支間割検討

本橋の支間割パターンとしては、表-1に示す7形式が考えられる。ここで、表の斜線範囲はカタクリ生育範囲を表している。中間橋脚の設置条件としては、橋台位置と同様“構造物掘削をカタクリに支障させない”“カタクリへの水脈を阻害しない”ことが重要であるため、表-1の7形式のうち制約範囲に下部工を設置しない形式<1>、<2>、<7>を比較形式案に選定した。

2) 橋種検討結果

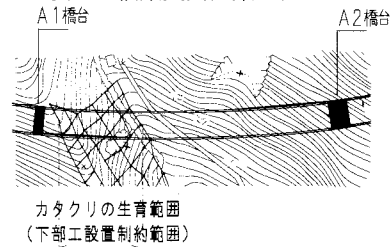
1)において抽出した3形式5橋種に対して、施工性を検討した結果、形式<1>鋼床版箱桁橋および形式<2>PCコンボ橋は、道路線形や地形の制約上、架設の難易度が高く、他案に比較し不利となることが判明した。よって残りの3橋種に対して比較検討を行い、最も経済性に優れる鋼V脚ラーメン橋を採用した(表-2)。

(3) 下部工形式の検討

1) A1橋台

A1橋台は、カタクリへ最も近接する下部工であり、躯体を最小化することが橋長の短縮につながり経済的

表-1 橋梁支間割案の抽出



ケース	支間パターン	〈備考〉 橋種例
〈形式1〉	A1 A2	〈1支間案〉 鋼床版箱 PC吊床版
〈形式2〉		〈2支間案〉 鋼RC板桁 PCコンボ
〈形式3〉		〈同上〉
〈形式4〉		〈同上〉
〈形式5〉		〈3支間案〉 鋼RC板桁 PCポステン
〈形式6〉		〈3支間案〉 鋼ラーメン 中路アーチ
〈形式7〉		〈3支間案〉 鋼Vラーメン

表-2 橋梁形式選出表

ケース	側面形状	事業費 (千円)	選出
第1案 PC吊床版橋		382,500	
第2案 鋼床版板桁橋		305,500	
第3案 鋼V脚ラーメン橋		289,000	○

となるため望ましい。最小化を図るには、以下が考えられる。

- ・ 外的要素 慣性力の低減
- ・ 内的要素 基礎規模の縮小、形状の工夫

そこで前者への対処としては、橋軸方向の支承条件を可動として上部工慣性力を低減し、後者への対処としては、斜面における構造物掘削を最小化するべく、橋軸方向は単列深礎としてフーチング幅を縮小、直角方向は段差フーチング形式を採用している。結果として、下部工規模および掘削量が最小化され、かつ用地境界を侵さない構造となった。

2) P1 橋脚および A2 橋台

P1 橋脚および A2 橋台は、カタクリ生育範囲からやや離れてはいるものの、自然環境の変化、地形改変を極力避けるために、基礎規模の縮小化、形状の工夫を行った。

特に中間橋脚で規模の小さい P1 橋脚については大口径深礎 $\phi 3.0\text{m}$ を採用しており、深礎天端面円周方向に沿って地形の山側に土留め壁を設けることで、現地形に全て埋戻せるよう配慮した。

以上より決定した本橋の形式は図-4 のとおりである。

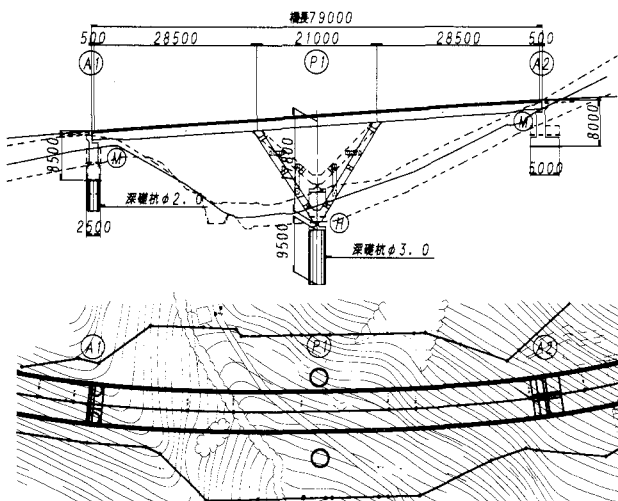


図-4 橋梁側面図および平面図

(4) その他の検討

架橋地域は冬期において路面凍結の恐れがあるため、凍結防止剤（塩化ナトリウム、塩化カルシウム）の散布による交通の確保が考えられる。凍結防止剤の使用は構造物に対する塩害の発生、また動植物など周辺環境への悪影響が懸念される⁶⁾。そこで、本橋では下記の周辺環境対策を採用した。

A. 高欄形状

高欄は通常使用される鋼製ビーム型でなく“全壁式”を採用することで、橋面排水の幅員外への飛散を防ぐものとした。

B. 排水系統

橋台部の雨水排水処理については、カタクリ生育地に排水を流さないよう、橋面排水を躯体前面に落とさないよう排水工を設置するとともに、流末を尾根より十分な離隔を確保した位置まで導いた。

C. 伸縮装置

橋面下への排水量を可能な限り減ずるべく、非排水型を採用し、止水材を設けた。

D. 融雪装置

本橋は縦断勾配が大きく、かつ縦断の高い終点側がトンネル構造であることに着目し、“トンネル湧水を利用した融雪装置”を検討中である。湧水量に余裕があれば、凍結防止剤の使用を避けられる可能性がある。

3. 用地条件を活用した構造検討

3.1 検討概要

(1) 特異的な用地条件

対象区間は、当初『盛土構造』で計画されていたが、盛土構造として必要な用地の買収がなされた後にカタクリの群生が明らかとなり、その生育環境を阻害しない道路構造として急遽『橋梁構造』へ変更された経緯がある。このため、通常では道路幅員程度しか確保されない用地幅が、盛土分の必要用地として道路横断方向に大きく確保されていた。そこで、通常では存在しない“余剰用地”を有効利用し、合理的かつ経済的な構造形式を検討した。

(2) 構造検討案

架橋区間の地形は、横断方向に急峻な傾斜を有していた。急傾斜地形上に設置される構造物は、地震荷重を代表とする水平荷重に対し傾斜方向の構造安定性にやや劣る。そこで、この“余剰用地”を活用し、図-5に示すように橋脚を直角方向に開くことで、傾斜方向（橋軸直角方向）の構造安定性の改善を目指した。

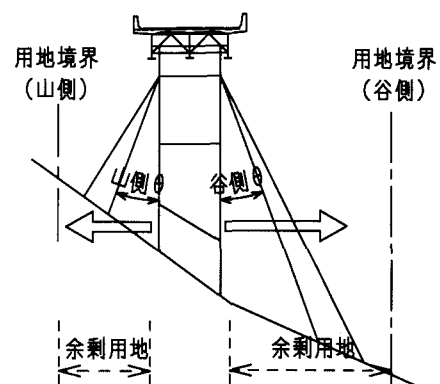


図-5 余剰用地を活用した構造

表-3 構造検討ケース

検討 ケース	開き角度 θ (°)		直角方向下部工配置							
	山側	谷側	山側 θ				谷側 θ			
			25°	20°	10°	0°	0°	10°	20°	25°
①	0	0								
②	0	10								
③	0	20								
④	0	25								
⑤	10	10								
⑥	20	20								
⑦	25	25								

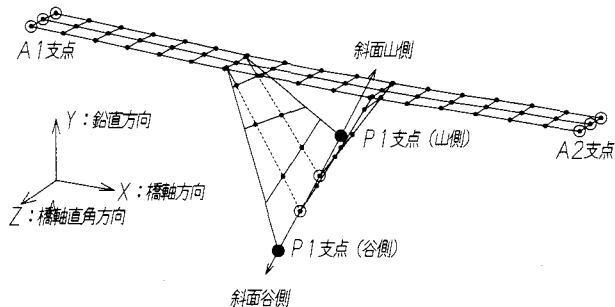


図-6 立体解析モデル

表-4 支点条件の設定

支点バネ方向	端支点	中間支点
橋軸方向 K_x	0 (自由)	地盤バネ
直角方向 K_y	地盤バネ	地盤バネ
鉛直方向 K_z	沓鉛直バネ	地盤バネ
X軸まわり回転バネ $K_{\theta x}$	0 (自由)	0 (自由)
Y軸まわり回転バネ $K_{\theta y}$	0 (自由)	剛なバネ
Z軸まわり回転バネ $K_{\theta z}$	0 (自由)	0 (自由)

3.2 検討方法

(1) 検討ケースおよび検討方法

直角方向に安定となる形状として、表-3 に示す7 ケースを対象に検討を行った。表中開き角度 θ は、図-5 に示す傾斜方向の角度 θ に対応しており、黒枠 (■) の位置は橋軸直角方向の各支点の位置を表す。

各検討ケースに対し静的解析を行い、それぞれで算定された全体変形量および下部工反力を、構造安定性評価の指標とした。静的解析に用いた震度の算定については、次項 3.3(2)において述べる。

固有値解析および静的非線形解析には、解析ソフト DYNA2E Ver7.0.1 (CRC ソリューションズ) を用いた。

(2) 解析モデル

解析には図-6 に示す立体解析モデルを用いた。部材断面は、震度法による決定断面とした。

主桁、床版およびV橋脚ははり要素でモデル化した。V橋脚については非線形部材とし、材料非線形特性は、死荷重時の軸力を考慮した曲げモーメント-曲率関係を用いた。支点条件は表-4 に示すとおりとした。

表-5 各ケースに対する固有1次振動モード

検討ケース	橋軸方向	T(s)	橋軸直角方向	T(s)
① 両0		1.23 (70.4)		0.63 (80.9)
② 片10		1.21 (71.3)		0.56 (80.4)
③ 片20		1.17 (72.0)		0.50 (77.7)
④ 片25		1.16 (72.3)		0.47 (73.2)
⑤ 両10		1.09 (68.3)		0.47 (80.2)
⑥ 両20		0.96 (65.8)		0.38 (68.8)
⑦ 両25		0.90 (64.1)		0.31 (60.1)

() 内は、モード寄与率 (%) を示す。

表-6 各ケースの固有周期および設計水平震度

検討 ケース	固有周期 T(s)		設計水平震度 k_{hc} (タイプII)	
	橋軸方向	直角方向	橋軸方向	直角方向
①	1.23	0.63	0.95	2.00
②	1.21	0.56	0.96	2.00
③	1.17	0.50	1.01	2.00
④	1.16	0.47	1.02	2.00
⑤	1.09	0.47	1.11	2.00
⑥	0.96	0.38	1.31	2.00
⑦	0.90	0.31	1.43	2.00

3.3 固有値解析結果

(1) 振動形状の変化

各検討ケースに対する1次振動モードを表-5 に示す。固有周期 T(s) から、橋軸方向、橋軸直角方向ともに開き角度に比例して短周期化する傾向が見られる。これは、開き角度に比例して全体として剛性が向上し、変形量が減少するためである。

また、モード寄与率はケース①において7~8割と最も高く、ケース番号に比例して低くなるものの、全ケースとも6割を超えており、1次振動モードが卓越していると判断される。

(2) 設計水平震度の設定

平成 8 年道路橋示方書・同解説 V. 耐震設計編 5.3 より、架橋区間の地盤種別（Ⅰ種地盤）に対応する設計水平震度は、固有周期 T (s) に対して下式で表される。

$$k_{hc} = c_z \cdot k_{hc0}$$

$$k_{hc0} = 2.0 \quad (0.3 \leq T \leq 0.7)$$

$$k_{hc0} = 1.24 T^{-4/3} \quad (0.7 < T)$$

ここで、

k_{hc} : 地震時保有水平耐力法に用いるタイプⅠ
またはタイプⅡの設計水平震度

k_{hc0} : 地震時保有水平耐力法に用いるタイプⅠ
またはタイプⅡの設計水平震度の標準値

c_z : 地域別補正係数

各ケースに対する固有周期 T (s) と設計水平震度 k_{hc} の関係を表-6 に示す。ただし、ここでの k_{hc} の設定は、卓越している 1 次モード周期に対する震度を適用し、さらに本橋の静的照査レベルにて最大震度となるよう、地震時保有水平耐力法タイプⅡを対象としている。

表-6 より、開き角度の増加に比例して、橋軸方向、橋軸直角方向ともに短周期化し、逆に設計水平震度は増大していく傾向にある。ただし、橋軸直角方向については全ケースともに震度の上限値 ($k_{hc0} = 2.0$) ととなる。

3.4 立体解析結果

(1) 変位

図-7 に、各ケースの上記震度による地震力戴荷時における橋軸方向および橋軸直角方向の最大変位分布を示す。

横軸の橋軸方向水平変位に着目すると、ケース①～④（開き無し、または片側のみ開くケース）においては大きな差異は見られないものの、ケース⑤～⑦（両側とも開くケース）から、開き角度に比例して全体の变形も小さくなることがわかる。この場合、開き角度を大きくすることにより桁かかり長が縮小でき、伸縮装置の規模縮小が可能となり、維持管理において効果がある。

次に、縦軸の橋軸直角方向水平変位に着目すると、開き角度にほぼ比例して全体の变形が小さくなる様子が顕著に表れている。この場合、開き角度を大きくすることにより橋軸直角方向斜面谷側への地震時安定性に対して効果がある。

以上から、橋軸方向、橋軸直角方向の地震時変形量と開き角度の関係は明らかであり、全体の傾向として、開き角度が大きいほど耐震安定性に優れるといえる。

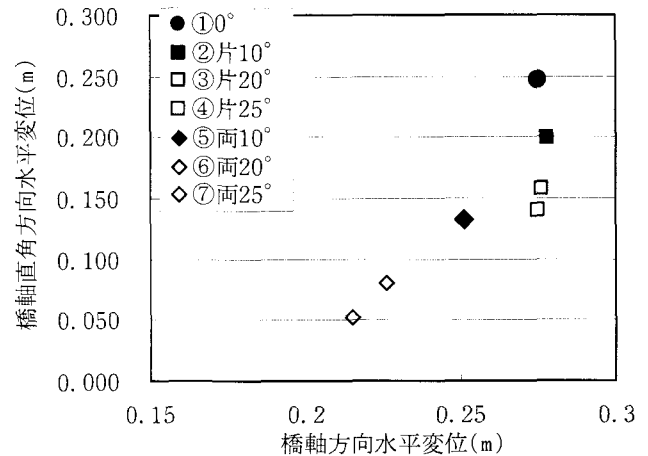


図-7 橋軸および橋軸直角方向最大変位

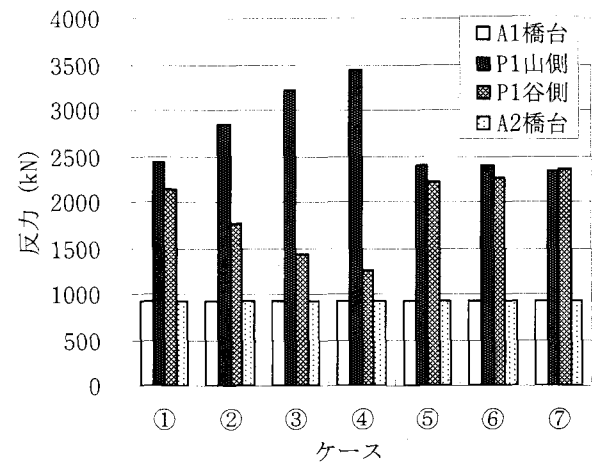


図-8 各ケースの下部工ごとの自重分担

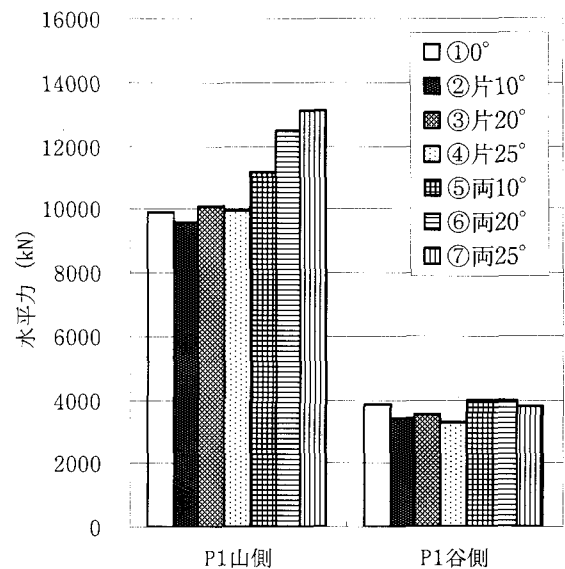


図-9 各ケースの下部工ごとの自重分担

(2) 反力

続いて、下部工支点反力に着目する。

1) 常時（死荷重時）鉛直反力

図-8 に、死荷重作用時における各ケースの下部工反力分担を示す。

全体としては、可動支点である橋台に比べ、上部工およびV脚部重量を受け持つ中間橋脚 P1 の反力分担が大きくなっている。ただし、ケース①および⑤～⑦のように、左右の開き角が同じである場合は P1 橋脚の山側、谷側の反力分担はほぼ同程度であるのに対して、ケース②～④のように、左右の開き角が異なる場合は、橋脚高が低い側の反力分担が増大し、常時偏心を受けるようなアンバランスな構造となる。

2) 地震時水平反力（橋軸方向載荷時）

図-9 に、橋軸方向地震載荷時に対する P1 橋脚水平反力分担の変化を示す。

ケース①～④に対しては山側、谷側ともに大きな変化は見られないが、ケース⑤～⑦の山側 P1 橋脚は、その支点位置の高さにほぼ比例して、分担力が増加する傾向が見られる。自重の増加分が、高さが低い側の橋脚にほぼ分担されているといえる。

端部橋台は可動支点であり、水平方向分担力の変化はほとんど見られない。

3) 地震時鉛直反力（橋軸直角方向載荷時）

図-10、11 に橋軸直角方向載荷時に対する P1 橋脚鉛直反力分担の変化を示す。図-10 は斜面山側方向載荷時、図-11 は斜面谷側方向載荷時の結果である。

載荷方向に関わらず、橋軸直角方向に地震力が作用した場合は、各橋脚に対して押し込み力と引抜き力が生じている。しかし、ケース①と比較して、②から④へ、⑤から⑦へと開き量を増やしていくことにより、引抜き力および押し込み力は減少していく。特にケース⑤～⑦の両側に開く場合においては、その傾向が顕著であり最も安定性に優れている。

4) 開き角度の設定

以上をとりまとめると、変位および支点反力に着目した場合、開き角度にほぼ比例して構造安定性が向上する結果となった。ただし、開き角度を大きくすることにより、V橋脚長が長くなり鋼重が増加すること、また施工が困難となることをふまえ、これらのバランスから最適となる構造形状を抽出した。

本橋においては、深礎長が地形条件（支持層位置）から決定される最小値となる山側 P1 基礎（深礎杭 L = 5.0m）に生じる負反力と、基礎自重+基礎周面摩擦力が同程度となる角度として、ケース⑥（両側開き角度 20°）を採用し、基礎規模の最小化を図った。

3.5 構造検討のまとめ

余剰用地を有効活用し、橋脚を橋軸直角方向に開くことでV脚ラーメン構造の橋軸直角方向安定性の向上、

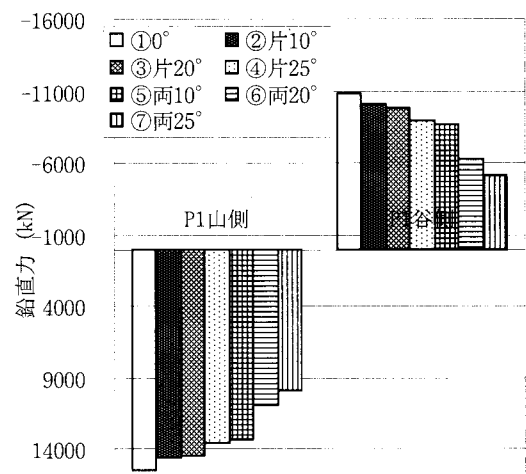


図-10 橋軸直角方向山側地震載荷時 P1 橋脚水平反力

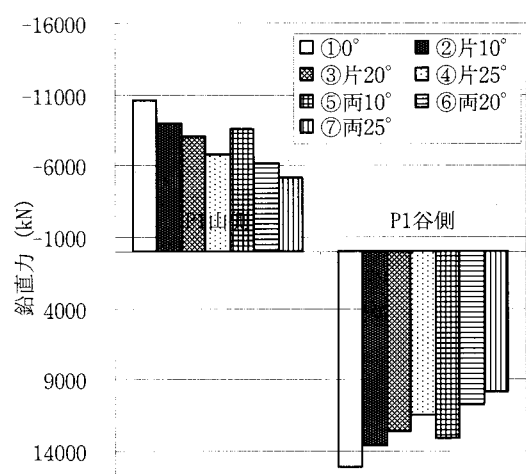


図-11 橋軸直角方向谷側地震載荷時 P1 橋脚水平反力

耐震性能の向上を果たすことができ、結果として「より経済的なあるいはより性能の高い」構造の実現と同時に、基礎が縮小できたため「地形改変を回避する」構造を実現することができた。

4. まとめ

一般に橋梁構造が採用される場合は、その幅員に一定以下の余裕を持たせた用地取得が実施されることを前提としており、実施設計段階ではすでにその取得が完了しているか取得に向けた協議が終了している場合が多い。用地の追加買収は税法上からも困難が伴うものとなることから、多くの場合で用地取得状況が計画に対する事実上の制約条件となっている。そこで本稿では、環境問題に端を発した根本的な見直しに伴い、結果として用地という“制約条件が解除”された場合の橋梁計画事例紹介を紹介し、その優位性を報告した。公共事業ではその根幹となる「上流」の計画段階から「下流」の実施設計段階までに多くの歳月を有する

ことが通例である。この間に社会環境・ニーズが変化することは今後当然見込まなければならない問題のひとつである。今後の「上流」での計画段階では、その構造物の設計段階以降のライフサイクル全般を見通した検討が今まで以上に重要となることはいうまでもないが、「下流」における実施設計段階での何らかの事情または社会情勢の予期せぬ変化への対応を有効かつ合理的に行うためにも、たとえば用地取得に関する冗長性を持たせることは、必要かつ有効な政策となり得ることを示した。このためには、今後公共用地取得に関する税の優遇措置など、必要な法改正に向けた取り組みも重要である。

なお、貴重植物保護の観点から採用した実施方針を再評価すると、橋梁計画時における環境調査結果から、本地点における貴重植物の生育環境は必ずしも良好な状態とは言えなかった。このため、事前に環境影響評価、いわゆるミティゲーションの考え方を導入し、米国国家環境政策法(NEPA)⁷⁾における環境保全対策に従って、分類実行可能な範囲で環境影響を回避・低減するための対策がなされているか否かについても評価を行っている。また、工事終了後にカタクリの移植固体を元の生育地内に植栽するという修正（影響を受けた環境そのものを修復、再生または回避することによる影響を修正すること）も検討している。

本路線の施工完了後における事後調査計画は重要であるが、植物の生育状況と橋梁の施工との関連は必ず

しも確定的とは言えないのが実態である。学識経験者の指導を仰ぎ、また関連機関との協議調整を踏まえた事後調査計画の立案、事後調査の実施を行うことが肝要であるとともに、必要に応じてさらなる環境保全対策を実施することが求められる。

参考文献

- 1) 寺田和己：設計段階における建設コスト縮減の着目点(1)(2)，建設マネジメント技術，NO. 300, NO. 301，2003. 5, 2003. 6.
- 2) 国土交通省公共事業コスト構造改革プログラム，国土交通省 HP(http://www.mlit.go.jp/kisha/kisha03/13/130331_.html)
- 3) 松本直也：コスト構造改革の取り組みについて，建設マネジメント技術，NO. 297，2003. 2.
- 4) 元永秀：コスト構造改革の検討状況について，建設マネジメント技術，NO. 297，2003. 2.
- 5) 財団法人ひょうご環境創造協会：改訂・兵庫の貴重な自然—兵庫県版レッドデータブック 2003—，2003. 3.
- 6) 養父志及夫，重松敏則，高橋理喜男：カタクリの群落の保全管理に必要な生態的諸条件，造園雑誌 Vol. 48 No. 5.，PP. 157-162，1985. 3
- 7) 文献：山村悦夫『米国国家環境政策法と環境アセスメント』環境情報科学 1996, 25-4：

(2003 年 9 月 12 日受付)