

山岳地における高速道路橋の耐震補強設計

廣瀬 彰則¹・長岡 久嗣²・山本 泰造³・筒井 将仁⁴

¹正会員 博(工) 株式会社エイト日本技術開発 本社（〒164-8601 東京都中野区本町5-33-11）

²正会員 株式会社エイト日本技術開発 四国支社（〒790-0054 愛媛県松山市空港通2-9-29）

³正会員 工修 西日本高速道路株式会社 四国支社（〒760-0065 香川県高松市朝日町4-1-3）

⁴正会員 工修 西日本高速道路株式会社 四国支社（〒760-0065 香川県高松市朝日町4-1-3）

1. はじめに

道路橋の分野では、新設・更新から保全・長寿命化へとシフトし、関連する多くの構造計画の場においても、既存構造物の直接補強だけでなく支承交換による構造系変更などを考慮するケースが多くなっている。さらにこのために使用する支承に対して、今までにない様々な機能を必要とする状況も発生してきており、構造設計に影響する支承設計システムに関わる新技術の開発もこれまで以上に要求されてきている。

地震災害リスクに対応するため、多くの既設橋に対して必要な改築または補強対策を行わなければならないが、橋梁上部工・下部工そして基礎工それぞれの接合部において、互いに弱点を形成することの無いよう入念な検討がなされなければならない。そのような中であって、たとえば支承機能の充実・適切な選択は、都市内で近接連担する高架橋の合理的な「部分新設または保全、長寿命化事業」に貢献できるばかりでなく、工事用施工機材の搬出入ルート・施工用足場などの確保にリスクを伴う山岳地の橋梁に対する事業では、より重要な検討因子の一つとなる場合もある。

本論文は、四国横断自動車道・高知自動車道の川之江JCTよりおよそ11.500km 高知IC方面寄り、馬立PA手前に位置する新黒松尾橋（図-1）に対して実施した耐震補強設計を対象として、採用した構造系変更事例の紹介とその特色を示すものである。

新黒松尾橋は、道路橋示方書¹⁾（昭和55年版：以下、S55道示と称す）に基づく構造物であり、急峻な山岳地に位置するため比較的橋脚高さが大きく、柱断面の主鉄筋配置に段落としを採用しているほか、一連の連続桁内で橋脚高さが大きく異なること、平

面線形を有すること、さらには上り線に隣接する馬立PAからの合流ランプが付加されており幅員が上下線で大きく異なること、などから地震時応答特性とその耐荷力評価が特殊なものとなっている。



図-1 橋梁位置図

2. 背景・目的

(1) 背景

兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧仕様から東北地方太平洋沖地震後に改定された道路橋示方書²⁾（以下、H24道示と称す）に至る過程で、道路橋の耐震設計法の変遷に伴い、既往の橋梁構造物に対する耐震補強設計を行うためには、その構造全体を「よく見て最適化を図る」姿勢がますます重要となってきた。

既存施設の有効活用に取り組む観点から、新設・更新から保全・長寿命化へとシフトしており、関連する多くの構造計画の場において、特に一般的な補強・改築施工に大きなリスクを伴う場合には、支承

に対しても今までにない様々な機能を必要とする状況も発生してくる。このため、このような課題に対応するための新たな設計技術の開発も重要課題の一つと考える。

(2) 最近の研究開発の動向

a) 移動方向選択型機能分離支承の開発

既設橋の耐震補強を計画する際には、橋脚などの躯体そのものの耐震性能を向上させることを目的として、RC 巻き立て工法などを行うことが一般的である。しかしながらこの工法では、多くの場合脚柱など躯体の剛性を高めることにつながることから、既設基礎への影響に配慮して免震構造や地震時水平反力分散構造のように、支承構造の変更による構造系変更を図ることで橋全体の耐震性を向上させる工法が採用されることも少なくない。

一方で、この免震構造や地震時水平反力分散構造は、地震応答エネルギーをアイソレータとしての支承の減衰機構を用いることによって吸収しようとするものであるが、下部構造及び基礎の合理化を期待できる反面、地震時応答変位は大きくなる。この場合、隣接構造物との遊間量がこの応答変位を吸収することができるかが課題である。

たとえば、上下線が分離の上部構造が近接している場合の橋軸直角方向照査の段階で、橋脚のせん断応答がクリティカルとなり、免震設計とすることで、橋脚柱と基礎の補強回避を図ることによって補強工事を削減しようとするケースである。また、橋脚高さが高い場合で柱の主鉄筋が段落としされているケースも同様の検討対象となる。このとき、免震支承等への交換により直角方向のせん断応答を軽減、もしくは加速度応答を低減することが可能となるが、同時に橋軸方向の応答変位も大きくなり、意に反して既存の橋軸方向遊間では吸収できなくなってしまう。このような場面では、橋軸方向と橋軸直角方向との間で応答変位量の異なる移動方向選択型機能分離支承設計システムが必要となる。この移動方向選択型ゴム支承も現在研究開発が進められており³⁾、実用化に至っているところである⁴⁾。

b) 機能分離型支承の適用

支承構造の一つに、積層ゴムと荷重支持板に起こる摩擦力を減衰機構として利用するの機能分離支承がある。一般に減衰機構としては、鉛プラグ入り積層ゴム支承のように、鉛などの減衰材により機械的に履歴減衰を期待する構造が採用されることが多いが、このような支承構造は、一連の設計・施工・維持管理の流れの中では問題ない一方、大規模地震に

よって一度被災した後の継続性、またさらなる大規模地震による被災に対して減衰効果が確保されるのか不透明な部分がある。

このような事象については、平成28年（2016年）熊本地震のように連続して発生した大規模地震の被災状況を踏まえると、今後の課題とも言わなければならない。これに対して、先の機能分離支承は荷重支持板の摩擦力により減衰効果を期待する構造であり、原理的には非常にシンプルな減衰機構となる。鉛プラグ入りの積層ゴム支承と同等の減衰効果を得られるのであれば、大規模地震による被災後の継続性や修復性、交換のし易さという観点で、採用のメリットは大きい。熊本地震の教訓⁵⁾を踏まえると、これからの耐震補強の場面で、機能分離型支承の検討の余地は大いにあると考える。

(3) 本研究の目的

前述のように、既設橋への耐震補強の場面においては、橋の置かれる環境、設計のよりどころとしている指針等をよく理解し、検討結果の最適解を求めることが必要である。耐震補強の対象となる橋梁の多くは、S55道示に基づいて設計・施工されたものであり、L1地震動の耐震性能しか確保されていない。

そのうえで、場合によってはその実態に適した支承システムを調整・採用する必要もあり、一義的な概念で計画するのではなく多面的な検討を実施することが重要である。

ここでは、30 年以内に大規模地震が発生する確率が高い地域⁶⁾に位置しながら、山岳地の高速道路橋である新黒松尾橋に着目して、以下の主課題への対応を主目的に検討作業する中で、独自の「支承設計システムの考え方」を導入して地震時応答に及ぼす影響の解析的評価を行った。本稿はこれに基づく設計結果の一部とその効果を報告するものである。

- 1) 衝突回避または安全性照査
- 2) 構造物動的振動特性の把握と対策工法の適用
- 3) 基礎の無補強化を目指した工法の選択

3. 対象橋梁および解析モデル

(1) 対象橋梁

図-2 に新黒松尾橋の一般概要図を示す。本橋は橋長 445.000m の、鋼(4+3)径間連続非合成鈑桁とRC(5+5)径間連続中空床版で構成される混合橋となっており、下部・基礎工はすべてRC構造である。

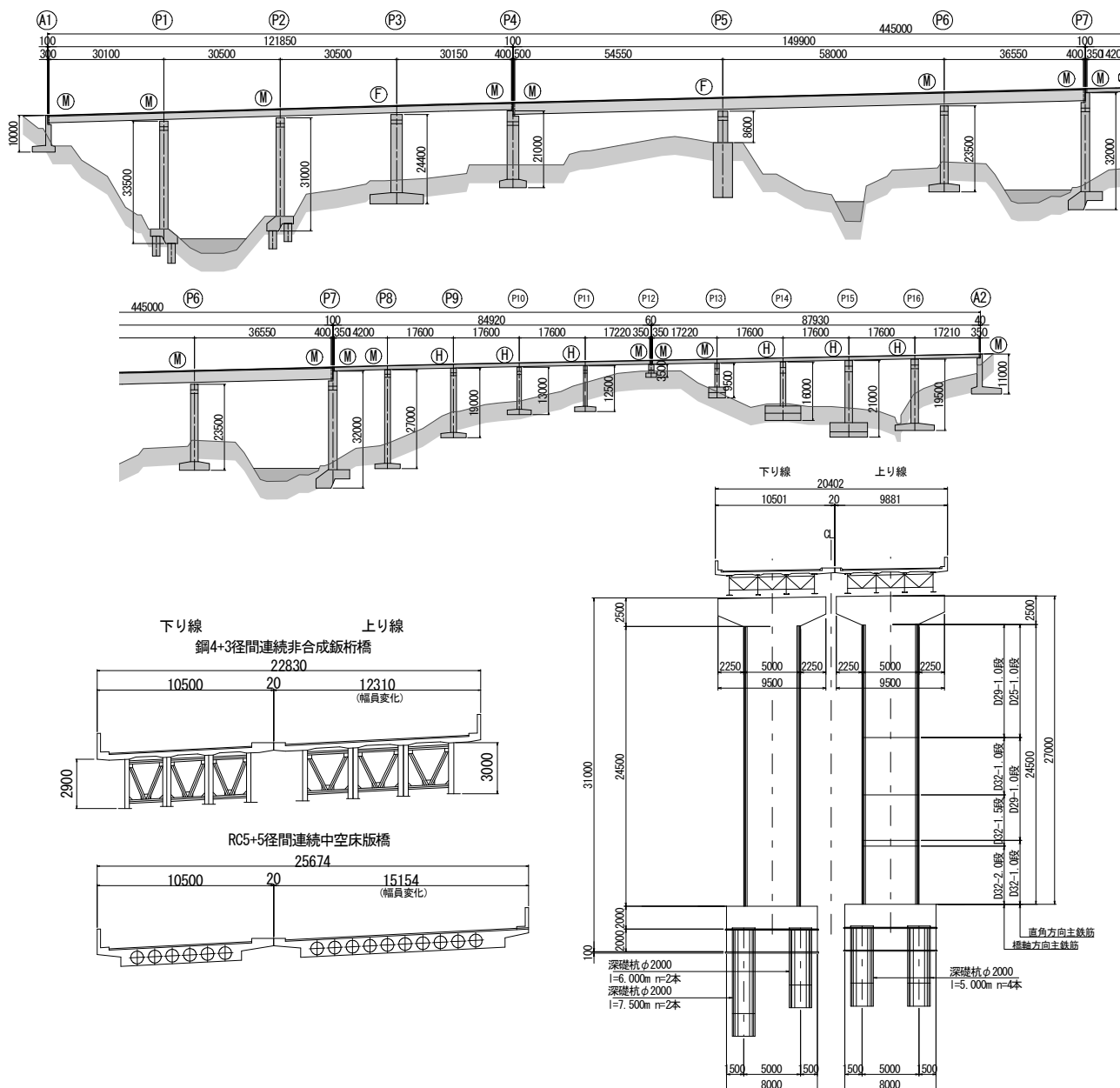


図-2 橋梁一般図(概要)

a) 設計条件

- 道路規格 : 第1種 第3級 B規格
- 橋 長 : 445.000m (上・下線)
- 有効幅員 : 上り線 8.500m+α
下り線 8.500m
- 斜 角 : 90°
- 設計速度 : V = 80km/h
- 設計荷重 : TL-20 , TT-43
- 平面線形 : A=225 ~ R=600
- 横断勾配 : i=2.0% ~ i=5.0%
- 適用基準 : 設計要領第Ⅱ集(日本道路公団
昭和55年4月)
: 道路橋示方書・同解説Ⅰ～Ⅴ
(日本道路協会 昭和55年2月)

b) 検討対象

対象橋梁を図-3に示すように梁～ばね要素でモデル化した。

以下の報告については、橋梁全体の構造計画検討のうち橋脚高さが大きい鋼桁区間を対象として行った部分について述べるものとする。

c) 解析モデル

上部構造は全断面剛性の線形部材、橋脚は段落としがあり損傷箇所が不明確であるためM-φの非線形ばね要素(Takedaモデル)でモデル化している。

支承部については、二次剛性を有するバイリニア型のばね要素でモデル化した。

入力地震動は、H24道示の標準波(Ⅰ種地盤 レベルⅡ タイプⅠ及びタイプⅡ地震動)6波を用い、

橋軸ならびに橋軸直角方向に対して解析している。
なお、動的解析ソフトにはJT-Khokaを用いた。

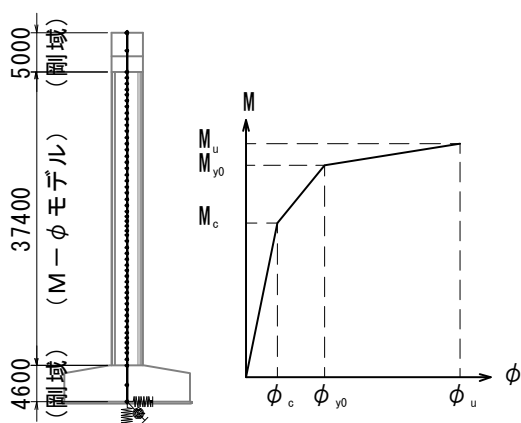


図-3 解析モデル

4. 既設橋梁における耐震補強の課題

(1) 地震時の衝突回避または安全性照査

a) 上部工と橋台との衝突回避または安全性照査

既設橋梁の遊間は主桁の温度伸縮量にて設定されている場合が多い。上部工と橋台の衝突により上部工の座屈やパラペット基部の致命的な損傷、変位拘束により想定を上回る応答が生じる可能性があるため、衝突を回避する必要がある。ただし、温度伸縮量が小さいコンクリート橋等その遊間が50mm以下と小さく物理的に衝突回避が困難となる場合は衝突による安全性照査を行うこととした。

b) 上部工と掛け違い橋脚との衝突回避

既往の地震にて掛け違い橋脚段違い部と上部工の衝突により段違い部に損傷が生じた事例がある。上部工を支持する段違い部に致命的な損傷が生じると落橋につながる可能性がある。

c) 中央帯部上下線床版の衝突回避

上下線が隣接する既設橋梁の中央帯部遊間は施工目地分のみであることが多く、当該橋梁の中央帯部遊間は20mmである。上下線各々をモデル化した動的解析結果より、最大応答変位は現況遊間を超え衝突する状況となる。衝突が生じると変位拘束によるせん断応答値の増加、上部工押し出しによる曲げ応答の増加等想定以上の応答値が発生する可能性がある。

また、衝突により床版や横構・横桁に致命的な損傷が生じる可能性もある。

(2) 構造物特性の把握とその対策

a) 段落とし

現況は最適化に関する観点から軸方向鉄筋および帯鉄筋を応力状態に応じて段落とし配筋している。

既往の被災事例においても段落とし部の損傷が多く確認されており、段落とし部のせん断破壊は脆性的であるとともに安全性、供用性および復旧性に大きく影響するため、状況を十分把握する必要がある。

b) 構造物の動的振動特性に応じた対策工法の適用

山岳橋梁はその地形条件より橋脚高さおよび基礎形式が異なる場合が多い。対象橋梁群の多くはL1地震動に対して設計・施工が実施されたものが多く、特に支承条件が全脚固定となる橋軸直角方向は、橋脚高さの違い(橋脚剛性)により、地震時の上部工分担質量を死荷重反力分担比としていた建設当時と比べて大きく異なり、支承及び下部工において耐震性能が不足することとなる。

RC巻立てや炭素繊維シート巻立てにより直接耐震補強を行う案も考えられるが、基礎工への負担増加や各橋脚の応答変位の相違から地震時の挙動が複雑となるため、免震支承への取換えによる変位の吸収や作用力の軽減を検討することが重要となる。

表-1 橋軸直角方向分担重量

	静的解析			動的解析			
	Rd (kN)	Wu (kN)	Wu /Rd	支承反力 (kN)		最大応答 変位 (mm)	
				I	II	I	II
A1	1,548	5,201	3.36	2,877	3,195		
P1	4,231	55	0.01	2,355	2,348	116	162
P2	3,457	1,455	0.42	1,889	1,571	187	262
P3	4,332	6,587	1.52	3,692	3,894	191	246
P4L	1,648	1,918	1.16	2,701	2,681		
P4R	2,963	1,703	0.57	2,348	2,444	146	184
P5	8,707	12,045	1.38	5,894	6,212	124	156
P6	6,952	3,846	0.55	3,102	3,238	200	236
P7L	1,983	3,011	1.52	4,415	5,033	171	194
合計	35,821	35,821	1.00	29,273	30,616		

(3) 基礎の無補強化を目指した工法の選択

山岳橋梁の基礎はその施工条件から深礎杭基礎が多く採用されている。深礎杭は斜面上に位置し補強を行う場合に大規模な仮設構造物が必要となるほか、増し杭を行う場合には新たな用地取得が必要となる。

(4) 施工条件の制約

建設時は、本線土工部を進入路として利用するとともに河川等の交差条件がある場合は仮栈橋等を構築していた。一方、耐震補強時は、本線を供用させながらの工事となるため、通行車両に対する安全性を確保しなければならない。また、山岳橋梁の場合、セミトレーラ等による桁下部への資材搬入が困難な場合が多く、耐震補強規模の縮小化が課題となる。

5. 新黒松尾橋構造改築のポイント

(1) 地震時の衝突回避

a) A1桁端部切断及び主桁連結

機能分離支承採用により既設橋台へ作用する水平力を調整するとともに桁端部の切断により衝突を回避し、荷重支持板の履歴減衰を確保する方針とした。また、桁端部の維持管理空間に配慮した切断範囲を設定した。

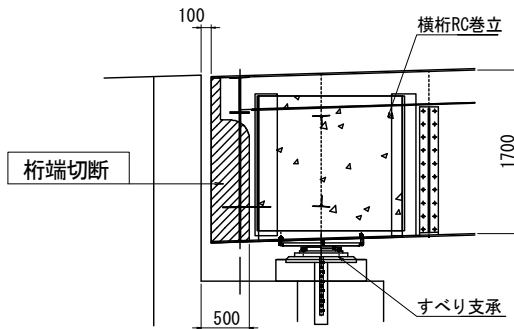


図-4 A1橋台桁端部切断による衝突回避

b) 掛違い橋脚高桁高側固定化による衝突回避

掛違い橋脚の高桁高側支承固定化により上部工と段違い部の衝突を回避し、段違い部の致命的な損傷を防止する。また、主桁連結化を合わせて実施し、主桁どうしの衝突を回避するとともに落橋に対する安全性向上を図る。

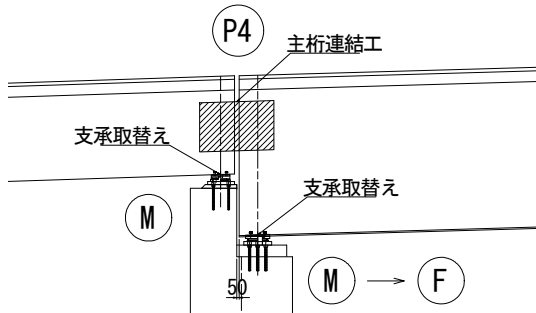


図-5 掛違い橋脚固定化及び主桁連結化による衝突回避

c) 地覆切断による中央部床版衝突回避

地覆切断により衝突を回避し、橋軸直角方向の挙動の明確化及び荷重支持板の履歴減衰を確保する。

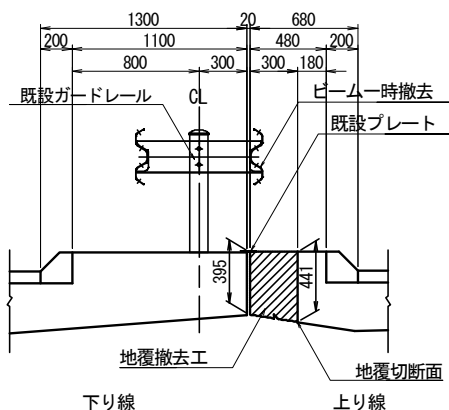


図-6 掛違い橋脚固定化及び主桁連結化による衝突回避

(2) 構造物特性の把握とその対策

a) 段落とし部の曲げ破壊

一般に段落とし部の損傷判定は、降伏曲げモーメントを慣性力作用高さにて除し算定する降伏耐力が基降落伏耐力の1.2倍以上確保されているか否かでを行う。その結果、橋軸方向および橋軸直角方向ともに多くの段落とし部が先行破壊となる。

動的解析においては段落とし部が降伏に至るか照査を実施するが、多くの段落とし部にて降伏に至る結果を得た。また、動的解析においても一部の段落とし部が先行して損傷する傾向にある。

表-2 現況橋軸直角方向降伏発生時刻（Ⅰ-1-2）

単位：秒

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
段落⑧	弾性	—	—	—	—	—	—
段落⑦	弾性	—	—	—	—	—	—
段落⑥	弾性	—	—	—	—	—	—
段落⑤	弾性	—	—	—	—	35.0	弾性
段落④	弾性	弾性	—	—	—	35.0	26.7
段落③	弾性	75.7	75.7	—	—	35.0	26.7
段落②	弾性	75.7	75.7	弾性	—	弾性	34.9
段落①	弾性	75.7	75.7	75.7	75.7	弾性	34.9
基部	弾性	26.7	26.2	26.1	26.1	34.9	26.8

表-3 現況橋軸直角方向降伏発生時刻（Ⅱ-1-1）

単位：秒

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7
段落⑧	弾性	—	—	—	—	—	—
段落⑦	弾性	—	—	—	—	—	—
段落⑥	弾性	—	—	—	—	—	—
段落⑤	弾性	—	—	—	—	4.8	弾性
段落④	弾性	弾性	—	—	—	4.8	4.7
段落③	弾性	4.8	5.7	—	—	4.8	4.7
段落②	弾性	4.8	5.6	弾性	—	弾性	4.7
段落①	弾性	4.8	4.7	5.6	5.6	5.7	4.7
基部	弾性	4.7	4.7	4.7	4.6	4.8	4.7

b) 段落とし部せん断耐力

コンクリートが負担するせん断耐力は、有効高、軸方向引張鉄筋比および荷重の正負交番作用の影響を受け、それらに関する補正係数を乗じ算定する。

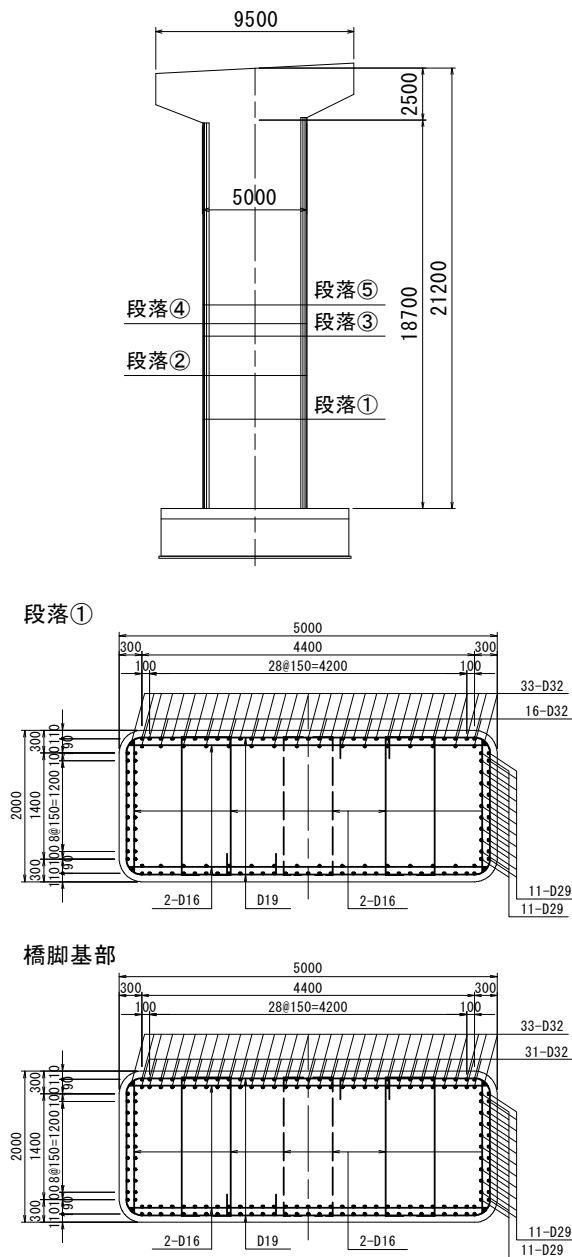
段落とし部は基部に比べ軸方向引張鉄筋量が少ないため、コンクリートが負担するせん断耐力がおのずと小さくなる。また、基部の軸方向鉄筋が2.0段もしくは1.5段配筋の場合、2段目にも配置する配力鉄筋をせん断補強鉄筋とみなせるため、基部と段落とし部にてせん断耐力が2倍程度異なることもある。

表-4 軸方向引張鉄筋比に関する補正係数

軸方向引張鉄筋比	0.2	0.3	0.5	1.0以上
Cpt	0.9	1.0	1.2	1.5

表-5 現況P6橋脚引張鉄筋比とせん断耐力(橋軸直角方向)

	Cpt (%)	Sc (kN)	Ss (kN)	Ps (kN)	Ps0 (kN)
段落④	0.326	1,273	2,791	4,064	4,913
段落③	0.342	1,292	2,791	4,083	4,945
段落②	0.515	1,494	4,691	6,185	7,181
段落①	0.550	1,517	4,677	6,194	7,205
基部	0.674	1,608	7,439	9,047	10,120



c) 機能分離型支承採用による耐震性能確保

橋脚剛性が大きく異なり挙動が複雑であり、段落とし箇所が多い本橋に対して水平力の調整が可能となる機能分離型支承への取換えにより耐震性能を確保する方針とした。

- ・地震時変位の吸収と減衰
- ・段落とし部の耐震性能を確保
- ・下部工耐震補強規模の最小化
- ・深礎杭基礎橋脚の無補強化（基礎の無補強化）

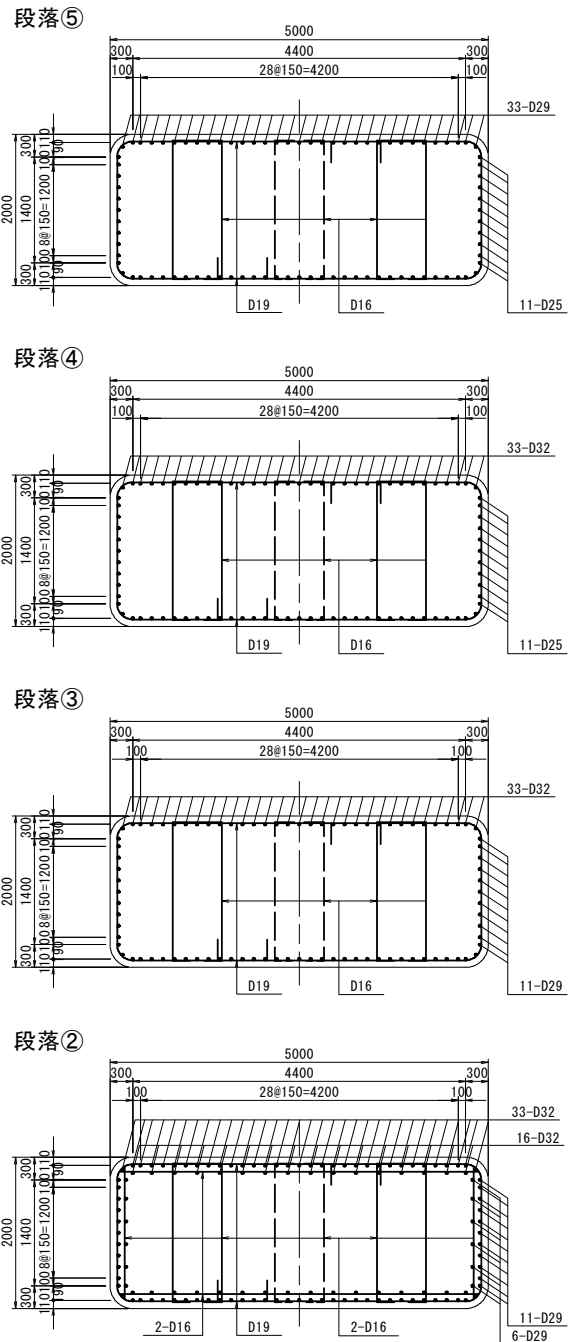


図-7 現況P6橋脚段落とし位置と配筋状況

(3) 支承破壊に対する補完性及び代替性の向上策

当該橋梁の橋軸方向支承条件は一連の上部構造 A1-P4およびP4-P7間にて一点固定構造であったが、L2地震時に対する要求性能を有する機能分離支承への取換えおよび掛違ひ橋脚の固定構造化により、落橋に対する安全性を向上させるものとした。

6. 機能分離型支承採用による効果

(1) 機能分離型支承のモデル化

機能分離型支承は、既往の研究等⁴⁾を参考に摩擦抵抗を考慮したバイリニア型ばね要素とした。摩擦抵抗時は物理的に支承は移動しないが、解析上便宜的に支承降伏時の水平変位を2mm、摩擦係数を $\mu=0.15$ とした一次剛性を与えた。

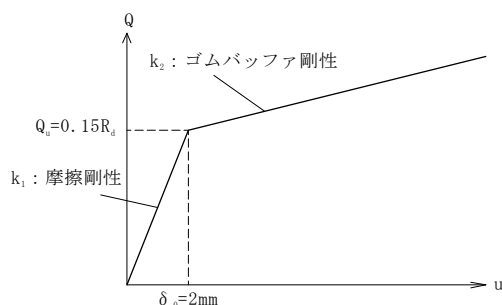


図-8 支承部モデル化

(2) 曲げ耐力への効果

機能分離型支承採用による長周期化、減衰効果による及び水平力調整により曲げ耐力を確保した。

なお、橋脚基部全てを弾性状態に制御することは困難であるが、降伏する場合において安全率を2倍以上確保できるよう支承バネ値を調整し、支承部にて減衰効果が確実に行われるよう配慮した。

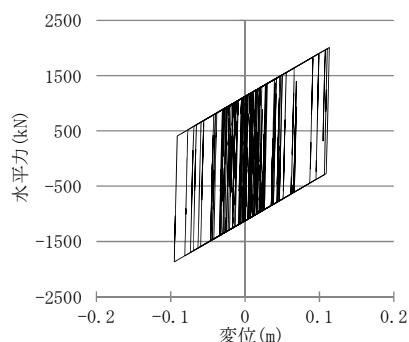


図-9 P6橋脚橋軸直角方向の履歴減衰効果 (I-1-1)

(3) セン断耐力への効果

現況状態に比べ荷重支持板部の履歴減衰によるせん断応答値の大きな低減効果はないが、段落とし部を弾性状態に制御し正負交番作用による補正係数を

乗じないPs0をせん断耐力に用いることが可能となる。

表-6 支承反力と最大応答変位(橋軸直角方向)

	支承反力(kN)				最大応答変位(mm)	
	支承取換後		取換/現況		I	II
	I	II	I	II		
A1	3,120	3,964	108%	124%		
P1	1,782	2,248	76%	96%	124	140
P2	1,682	2,115	89%	135%	130	131
P3	2,882	3,074	78%	79%	52	65
P4L	1,695	2,463	63%	92%	93	110
P4R	2,622	2,884	112%	118%		
P5	3,220	3,045	55%	49%	16	14
P6	2,336	2,125	75%	66%	81	62
P7L	2,152	2,287	49%	45%	142	108
合計	21,492	24,204	73%	79%		

表-7 P6橋脚段落とし部のせん断照査(橋軸直角方向)

基部からの高さ(m)	現況(固定)		補強後(分散)		せん断耐力	
	降伏状態	Smax(kN)	降伏状態	Smax(kN)	Ps(kN)	Ps0(kN)
9.80	降伏	4,421	弾性	4,064	4,000	4,807
8.90	降伏	4,503	弾性	4,206	4,064	4,913
8.30	降伏	4,562	弾性	4,297	4,083	4,945
6.40	弾性	4,707	弾性	4,553	6,185	7,181
4.30	降伏	4,812	弾性	4,788	6,194	7,205
0.00	降伏	4,919	降伏	5,138	9,047	10,120

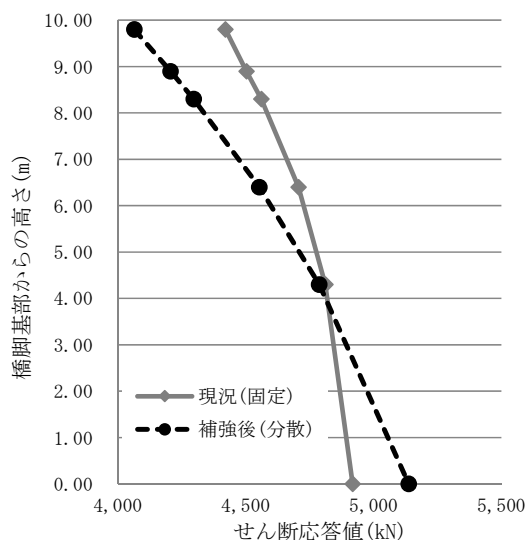


図-10 段落とし部せん断応答値

図-10に、機能分離支承採用前後における各段落とし部の橋軸直角方向せん断応答値の変化状況を示す。支承構造による水平反力の分散化を図ったことにより、表-7に示す通り大半の断面で弾性挙動化に収まることとなっており、大きな効果を得ている。

(4) 機能分離型支承採用上の留意事項

せん断応答値低減のために用いた機能分離型支承

の特性により表-6に示す通り、P1およびP2橋脚の直角方向最大応答変位は140mmにも及んでいる。

支承のパネ値設定に際しては、この効果を狙いながら(2)の曲げ耐力への効果を図り、かつ橋台等における桁端衝突を避けて調整しなければならない。

本設計では、後述の「支承設計システム」を考慮することにより、機能分離型支承の変位方向に一定の拘束を加える工夫を施し、それらを調整・組合わせることで目的とする支承の動的応答特性を得るものとしている。

7. 支承設計システム

(1) 機能分離型支承の可能性

a) 支承設計システムの活用

機能分離型支承採用時の設計フローを図-11に示す。鉛プラグ入り免震支承を代表とする機能一体型の免震支承は鉛直力と水平力が同時に作用するため、支承形状(せん断パネ)を任意に調整することができない。言い換えると機能一体型免震支承はその都度下部工や基礎工の照査を実施する必要がある。

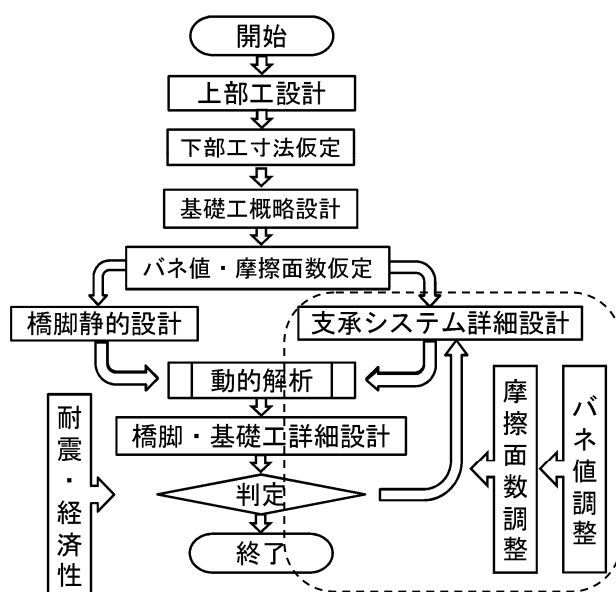


図-11 機能分離型支承による設計フロー 1)

一方、機能分離型支承はせん断パネを任意に調整できるため、基礎工への影響や施工条件等を踏まえ下部工補強工法を仮定した後、それを満足するよう耐震補強設計を行うことが可能となる。

ここでは、十分検討された構造計画の下で、すべり支承の特性を調整すること(支承設計システム：図-11 破線内)により、多くの課題を抱えた耐震設計問題に対して比較的容易に取り組むことが可能となった事例を示している。

b) 機能分離型支承の機能向上に向けて

採用した機能分離型支承はゴムのせん断数のみで水平力を調整する構造であり、摩擦による履歴減衰は上部工死荷重のみに依存する。

これについては一面すべり摩擦構造を用いているが、図-12に示す通り、摩擦係数を大きくするための支承構造の工夫も検討されている。

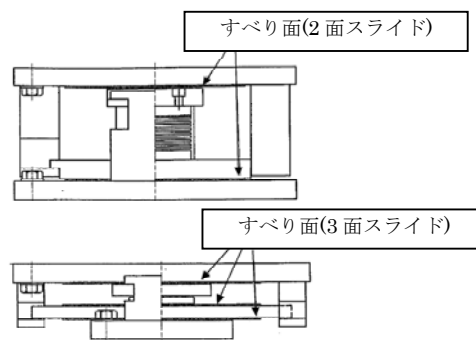


図-12 機能分離型支承のすべり面調整イメージ

8. まとめ

本論文では耐震補強設計における課題とその対策案を山岳地における高速道路橋の耐震補強事例を題材に紹介した。その際に、水平反力調整が容易な機能分離型支承を用いた支承設計システムによる間接的手法も、耐震補強設計における適用性が高いことが改めて確認できている。

保全・長寿命化に脚光が集まる中、基本に戻って今後の耐震補強に留意すべき点を以下にまとめる。

- ① 橋の挙動を橋軸方向・橋軸直角方向と決めつけず、細部の相互関連事象を見逃さないこと。
- ② 各構造部材の異方性を考慮した支承機能の選定。
- ③ 補強による部材の剛性変化により構造的合意性が損なわれないこと。

参考文献

- 1) 道路橋示方書 I～V：日本道路協会，1980.2
- 2) 道路橋示方書 I～V：日本道路協会，2012.3
- 3) 廣瀬彰則：橋梁保全・耐震補強に向けた新たな支承機能の開発，土木学会 平成28年度全国大会 第71回年次学術講演会，CS6-016
- 4) 高橋ら：複数の摩擦面を有する滑り型免震支承の開発と水平二方向振動台実験による性能検証，第18回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，2015.7
- 5) 木村嘉富：熊本地震による道路構造物の被害と復旧への技術的支援，平成28年度国総研講演会，2016.12.8
- 6) 防災情報のページ，内閣府，2018.2，
<http://www.bousai.go.jp/kyoiku/hokenkyousai/jishin.html>