

地震発生直後における緊急輸送道確保のための 橋梁部の対策の事例

大場 宏樹¹

¹正会員 仙建工業株式会社 盛岡支店 土木部 （〒020-0033 盛岡市盛岡駅前北通 4-5）

1. はじめに

地震が発生した直後に緊急輸送道を確保することは、復旧作業において重要なことである。そのため、緊急輸送システムとして道路・鉄道等を位置付けし、整備することが必要である。

これまで、耐震設計が整備され橋梁等の耐震補強が実施されてきているが、地域的な不確実性等を考慮すれば、システム全体としての耐震性を一様に強化することは困難であり、災害時の部分的な被害はある程度免れないものとする。

緊急輸送道としての橋梁の通行安全性確保していくためには、いかに被害の継続時間を短くするかが最大の課題である。

地震直後に緊急輸送道として供される橋梁を短期的に修復するためには、地震後に行なわれる緊急点検時に橋梁の残留変位を計測して橋脚等の損傷度を把握し、その対策を実施する必要がある。

しかし、地震発生直後の災害復旧においては、余震が頻発し、十分な調査や検討の時間を確保することや応旧工事で必要とされる資機材や人材の確保がままならないのが状況である。

そのような状況の中で力学的根拠が曖昧なまま、入手可能な材料を使用して、やっとの思いで応旧工事が行なわれ、緊急道として使用しているのが現状であると思われる。

この対応を迅速に行なうためには、日頃から耐震性能と補修工法との関係を明らかにし、緊急輸送道を確保するための復旧計画を立てるための判断材料を整理しておく必要がある。これまで、大規模な地震災害が発生する都度、様々な応旧工事

が実施されてきており、災害記録誌等に公表されることも少なくないが、小規模なものや大規模なものでも材料の詳細まで公表されることは少なく、公にその内容が伝わりにくいのが現状である。これは、応旧工事で調達できた材料や工法を力学的に根拠付けする時間がないなどの理由から理論化することが難しいためと考えられる。復旧工事が進行しているある段階で、緊急車両だけでも通行可能とする対策や、安全に通行させるための判断が急がれる。

鉄道営業線上に PC 道路橋を架設する施工において、PC 桁架設時点における地震発生に備え、PC 桁に耐震設備を設け施工を実施した。その設備を設けるに当たり力学的な根拠付けを行った。その考え方は、応旧工事における橋梁上部構造の落橋防止対策に限った選択枝の 1 つとして利用可能と考え、実施した 2 つの事例を挙げる。

2. 危機耐性における時間軸

緊急車両だけでも安全に通行させるための判断を明確にしていくにあたり、その基本となる考えは危機耐性であるといえる。

危機耐性について本田ら¹⁾は、

狭義の設計段階で想定していなかった事象においても、構造物が単体またはシステムとして、破壊的な状況に陥らないような性質

と定義しており、従来の耐震性能で明示的に扱ってこなかった面を考慮するため、概念を拡張する必要があることから、a) 事象、b) 時間、c) 空間と

いう3つの軸を設けることを提案している。

また、b) 時間の拡張～レジリエンスの考慮において、地震工学の分野における Bruneau et al.²⁾ の「社会の地震への対応力Resilienceを定量的に評価する枠組みの提案」が紹介されている。そこでは、概念として、社会のインフラの機能する率を $Q(t)$ と定義し、図-1に示されるように

$$R = \int_{t_0}^{t_1} [100 - Q(t)] dt \quad (1)$$

という評価関数を設けている。

これは、「被災後」という時間を明示的に考慮することを示しており、被災後の復旧・復興過程におけるインフラの貢献を考慮することを意味する。図-1において、横軸は時間、縦軸は性能を表しており、復興過程におけるインフラの復旧は、段階を踏んで実現されていくものであり、その段階毎において確実に安全性を向上させることが必要であることを表す。具体的には、各構造物毎に復旧にあたり復旧対策が実施されることになる。

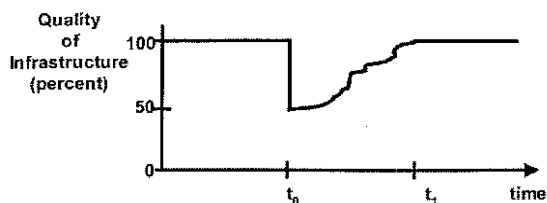


図-1 被災後のインフラの性能(%)の時間的変化の概念図。 t_0 が被災時を表す。Bruneau et al. (2003)より引用。

図-2に復興過程における性能 Q_a と経過時間 t_a を示す。性能 Q_a は一部規制を持たせて供用開始できる性能とし、それを実現するまでの経過時間を t_a とした。

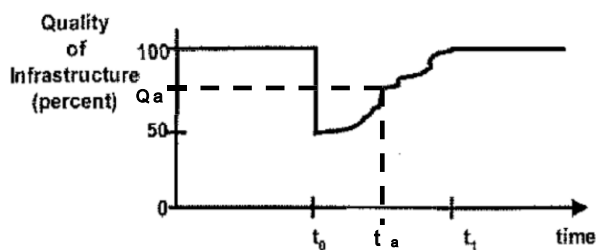


図-2 復興過程における性能 Q_a と経過時間 t_a

危機耐性を考えるにあたり性能 Q_a の値をどこにおくかが課題となる。図-3に示すとおり、性能 Q_a まで達する時間を短くするすなわち、

$$t_a - t_0 < t'_a - t_0 \quad (2)$$

とすることを目指すべきであり、

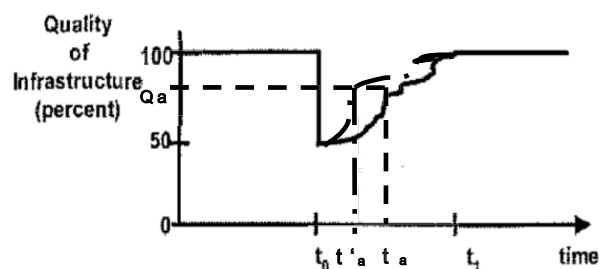


図-3 性能 Q_a を固定した場合の t_a への要求

また、到達時間 t_a を固定した場合、図-4に示すとおり、性能 Q_a を向上させ、全体の復興までの時間を短縮することが求められるすなわち、

$$Q_a < Q'_a \quad (3)$$

とすることを整備していくことが必要と考える。

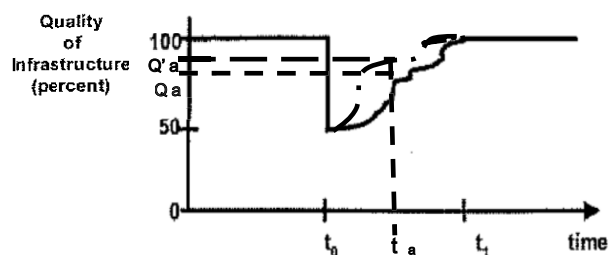


図-4 経過時間 t_a を固定した場合の Q_a への要求

3. 橋梁上部構造の落橋防止対策

既往の災害事例等から、実質的に上部構造が容易に落下しない報告³⁾がなされている。H24道示V⁴⁾においては、これまでの地震による道路橋の落橋モード分析及び多径間連続橋の地震時の挙動特性を踏まえ、橋の構造特性に応じてより合理的に落橋を防止するシステムの規定が見直された。また、H29道示V⁵⁾においては、橋軸方向、橋軸直角方向及び回転方向それぞれの方角に対して独立して働くシステムが協働して落橋防止システムを構築することが求められた。

これらの規定を遵守していくことで、落橋について、事象が減少していくと考えられるが、図-5⁶⁾に示されている落橋に対する安全性が高いとみなされる橋であっても、緊急車両が通行可能であるか否

かの判断は難しいといえる。

図-5の最下の状態から応急・復旧工事が開始されることを考える場合、緊急車両を安全に走行させるための性能をQ a（一部規制を持たせて供用開始できる性能）とし、それを実現するまでの経過時間を t_a できるだけ短くする必要がある。

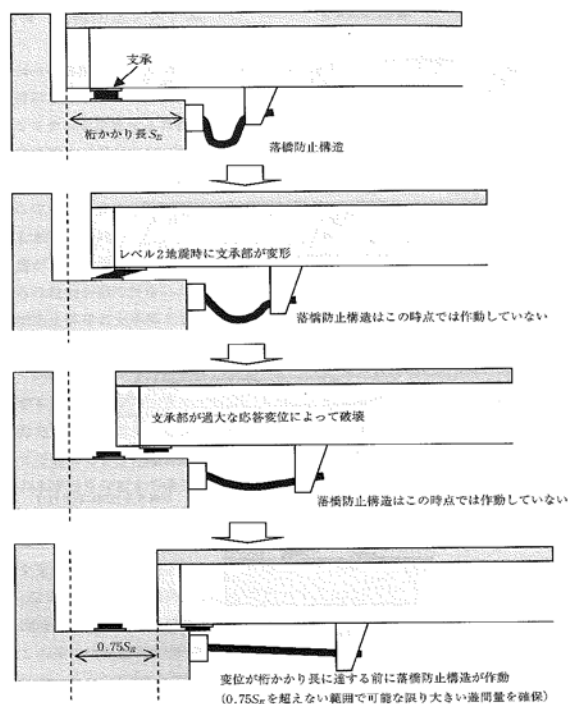


図-5 上部構造と下部構造との間に大きな相対変位が生じる状態に対する落橋防止システムの概念図（橋軸方向）道路橋示方書・同解説Ⅴ耐震設計編に関する参考資料より引用

緊急車両を安全に走行させるための性能Q a を決定して行くための1つの対策事例として、次項に橋梁架設工で実施した内容を記述する。

4. 鉄道上空のPC桁の耐震設備事例

鉄道営業線上空に橋桁および仮設物等を架設する場合には、大規模地震が発生しても列車の安全輸送を確保することが明確になっている⁷⁾⁸⁾。その内容は、線路との位置関係や架設時の設置時間によって対策の程度が区分される（図-6）。一般的には、線路直上での主桁架設作業が主であり列車が運行している状況での施工となるが、桁架設計マニュアル⁸⁾によれば、線路上空の範囲での列車通過時の対策は、弾性加速度応答スペクトル800gal、水平震度 $k_h=0.8$ に対して桁および仮設構造物が崩落、落下、転倒、逸走しないこととされ

ている。

3.3.5 地震の影響（Eg）
地震の影響は、「線路上空構造物の列車通過時」には大規模地震動の1/2程度の地震動が作用するものとし、それ以外の場合には、中規模地震動が作用するものとする。

【解説】

地震の影響については、架設時の設置時間や設置箇所に応じて定めることとし表解3.3.1の通りとした。

表解3.3.1 架設の区分と地震の影響

設置箇所による区分	線路上空（営業線）の範囲		営業線に影響する範囲（線路上空以外）	その他の範囲
	列車通過時	列車が通過しない時		
地震の影響	1/2地震動の1/2程度の大規模地震動に対して崩落、落下、転倒、逸走しない（ $k_h=0.25$ を下限値）	中規模地震の水平震度（ $k_h=0.2$ ）に対して許容応力度または応力度の制限値を上回らない	—	中規模地震の1/2の水平震度（ $k_h=0.1$ ）に対して許容応力度または応力度の制限値を上回らない

なお、「線路上空の範囲」の「列車通過時」に地震の影響による作用は、仮設構造物である仮橋脚やバントが負担する水平力を用いるので、「仮設構造物設計マニュアル」を参照するとよい。

図-6 桁架設計マニュアル⁷⁾ 抜粋

5. 検討項目

前述の800galは、鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計）⁹⁾に定められている大規模地震動の1/2程度である。施工途中の段階でこの状態に耐えうる構造にすることは容易ではなく、地震時、桁に作用する回転モーメントをどう抑えるかが問題で桁高が大きくなると回転モーメントも大きくなるため対策の内容が異なってくる。

【例1】PC単純コンボ橋（3主桁）

架設工法は橋台上に門構を組立後、門構を使用して架設桁を架設、架設桁の上路を主桁が自走して門構で所定の位置に架設する工法である。

線路上空での作業は全て夜間作業となることから、施工途中で線路上空に仮設した状態が発生するため、列車運行時間帯の耐震設備が必須となる。

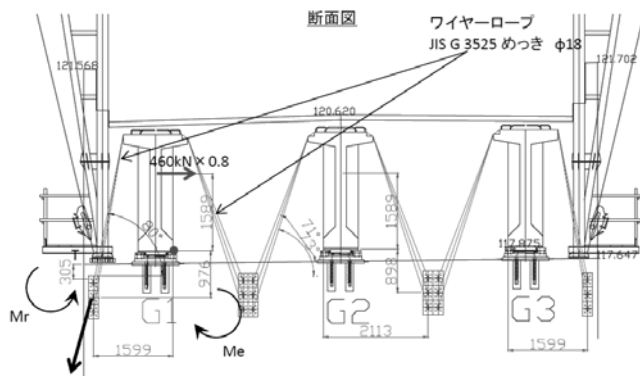
検討する内容は門構・架設桁・主桁それぞれで必要となるが、今回は主桁について示す。

主桁架設後の状態において水平震度 $k_h=0.8$ が作用した場合、転倒モーメントは584kN・mとなる。

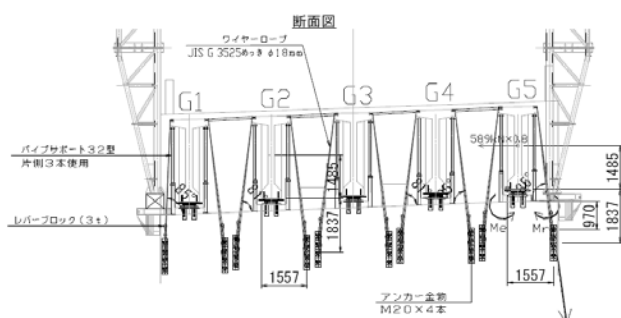
図-2のように、主桁は躯体に設置したアンカー金具と切断荷重160kNのワイヤーを3本固定して抵抗モーメントを確保した。

【例2】3径間ポストテンション方式PCコンボ橋（5主桁）

架設工法は例1と同様であるが、桁高が2.8mと高くなることから作用する転倒モーメントは699kN・mと大きくなる。固定方法は例1と同様としたが、固定用ワイヤーは3本では不足することから、図-3のように4本配置した。ワイヤーによる主桁の固定は、全ての桁を横締めし安定させるまで設置した。



図－7 桁架設時の耐震設備（例 1）



図－8 桁架設時の耐震設備（例 2）

6. 問題点の抽出と考察

固定に必要なアンカーボルト（M22×350）の施工数量は両橋台でおおよそ 320 本となり、定着材の強度発現に要する期間も考慮にいと通常日中 8 時間の作業時間で 7 日程度を要した。従って、アンカーボルト設置してから強度発現定までの時間を考慮する必要がある。

また、例 2 における主桁の固定時間は、計画時間 30 分に対して 2 時間を要した。その理由は、桁のワイヤー固定作業は桁の両端に 2 名 2 班を配置する体制で行ったが、桁高（約 2m）が高かったこと、ワイヤーの本数が 4 本と多かったこと、可動柵の仮固定設備が干渉したことなどである。桁高が高いとワイヤーを回す範囲が大きくなり、桁の本数が多いと固定する位置が制限され、互いのワイヤーが干渉することなども考慮することが必要となる。

これらの作業を最少人数で効率良く実施するためには、固定ワイヤーやジャッキ等の必要材料の準備することは勿論のことであるが、クレーン等の機械を利用することを考えておく必要がある。

7. 効果の確認

工事期間中に震度 4 程度の地震が発生したが、架設した PC 桁の変位は見られなかった。また、耐震設備の撤去までアンカー金具や金具固定用アンカー、ワイヤー類に損傷は見られなかった。

8. まとめ

復興過程における性能 Q_a と経過時間 t_a の重要性和性能 Q_a を弾性加速度応答スペクトル 800gal、水平震度 $k_h=0.8$ とした場合の 2 例を示した。この例からアンカーボルトの削孔時間と定着強度発現時間を考慮しておくことやワイヤー設置には、クレーン等の重機械使用の考慮が必要であることが導かれた。今後、復興過程における性能 Q_a と経過時間 t_a の重要性和妥当性について事例収集を含め検証を行い、性能 Q_a の設定について提案していきたい。

参考文献

- 1) 本田利器他：「危機耐性」を考慮した耐震設計体系－試案構築にむけての考察－，土木学会論文集 A-1（構造・地震工学），Vol.72，No.4（地震工学論文集第 35 巻），I 459- I 472，2016
- 2) Bruneau, M., S.E.Chang, R.T.Eguchi, G.C.Lee, T.D. O'Rourke, A.M. Reinhorn, M. Shinozuka, K. Tierney, W.A. Wallace, and D. von Winterfeldt: A Framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities, Earthquake Spectra, Vol.19, No.4, pp.733_752, 2003
- 3) 堺淳一, 運上茂樹, 星隈順一：大規模地震における落橋メカニズムと落橋防止構造の効果に関する分析, 土木学会論文集 A 1（構造・耐震工学）, Vol. 67, No.1, pp.57-71, 2011 年 2 月
- 4) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2012
- 5) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2017
- 6) 日本道路協会, 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編に関する参考資料, 2014
- 7) 東日本旅客鉄道(株)：桁架設計マニュアル，2004.12
- 8) 東日本旅客鉄道(株)：仮設構造物設計マニュアル，2004.12
- 9) (公財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（耐震設計），2012.9