

トータルコストを照査指標とした鉄筋コンクリート 構造物の復旧性照査法

岡本 大* 室野 剛隆** 坂井 公俊**

The Verification Method of Restorability of Reinforced Concrete Structures by Using the Total Cost Index

Masaru OKAMOTO Yoshitaka MURONO Kimitoshi SAKAI

After an earthquake occurred, to rehabilitate the function of structures in a short period, it is necessary to control the extent of damage to structures by using applicable technologies within a reasonable cost, considering surrounding environment of the structure. In this study, we described the concept of the verification method of restorability, which is reasonable in minimizing the sum of the initial construction cost, the rehabilitation cost and the operating losses. Then, based on the concept of the minimum total cost, we carried out the verification of restorability of the RC rigid frame viaduct.

キーワード：復旧性，トータルコスト，初期建設コスト，復旧コスト，損失コスト，ラーメン高架橋

1. はじめに

想定される地震動に対して構造物を短期間で機能回復可能な状態に保つためには、構造物周辺の環境状況を考慮し、適用可能な技術により、妥当な経費の範囲内で機能回復できるように構造物の損傷等の程度をコントロールすることが必要である。

構造物が供用期間中に想定される複数の地震動を受けた場合に、復旧期間や経費等が供用期間を通じて妥当な範囲内となることは、初期費用と地震損失費用等から直接照査することが可能である。例えば、大きな地震作用により構造物の倒壊を防止できた場合（安全性の確保）でも、損傷の程度が極めて大きい場合には、地震後に部材等の構造要素の取替え等が必要となり、復旧に莫大な費用が発生し、輸送量の多い路線では供用停止による損失が大きくなる。すなわち、耐力が小さい構造物を設計した場合には、初期コストは抑えられるが、地震後の復旧および損失コストは大きくなる。一方、耐力の大きい構造物を設計すれば初期コストは高くなるが、地震後の損傷を小さくでき、結果的に復旧・損失コストは抑えられることとなる。

本論文は、地震により構造物に損傷が生じたことを想定して初期建設コストと機能回復に至るまでの費用と損失を算定し、それが最小となるように構造物の諸元を設定することが合理的となるとの考え方¹⁾に基づいた、

トータルコストを照査指標とした復旧性照査の考え方と試算を行った例について示す。

2. 性能の表現方法

「妥当な期間および経費で機能を回復できる」という性能を工学的に表現する指標として、初期建設コストと設計耐用期間における地震後の復旧コストと間接被害の期待値の和、すなわち「トータルコストの最小化」を考える。その概念図を図1に示す。

耐震設計におけるトータルコストは(1)式により計算することとする。なお、安全性の照査を満足することによって構造物の崩壊を防止することが前提となっているので、地震損失に利用者が被災することは想定していない。

$$TC = C_i + \sum P_f \cdot C_f \tag{1}$$

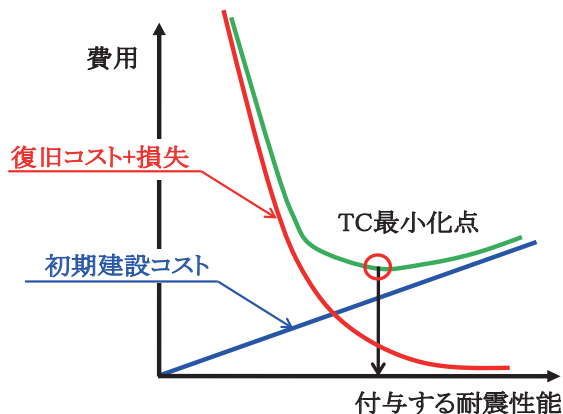


図1 トータルコスト最小の概念

* 構造物技術研究部 コンクリート構造研究室

** 構造物技術研究部 耐震構造研究室

特集：構造物の耐震設計技術

$$C_f = C_{RE} + C_{TD} \quad (2)$$

ここに、 TC ：トータルコスト、 C_f ：初期建設コスト（材料費+施工費）、 P_f ：構造物の損傷確率、 C_f ：損傷コスト、 C_{RE} ：直接復旧コスト、 C_{TD} ：供用停止に伴う損失コストである。

3. 復旧性照査の手順と各コストの考え方

3.1 照査手順の概略

トータルコストの最小化を指標とした復旧性照査の流れを図2に示す。照査においては、まず、照査対象とする構造物の断面や配筋詳細等の構造諸元を複数設定する。そして別途、構造物の建設地点の地震危険度解析に基づいた生起確率付き地震動群を算出し¹⁾、この地震動群に対して設定した各構造物の動的解析を行い、損傷確率を算出する。そして、初期建設コストと損傷確率に基づく地震被害復旧コストを算出して、間接的な損失コストを含めたトータルコストが最小となっている最適な構造諸元を選定する。

3.2 構造諸元の設定

断面寸法や、配筋詳細等の構造諸元の設定方法を鉄筋コンクリート（以下、RC）ラーメン高架橋を例として以下に示す。

- (1) 構造物に想定する降伏震度の範囲を設定する。
- (2) 設定した範囲内の各降伏震度において、初期建設コストが最小となるような、軸方向鉄筋と断面寸法の組み合わせを求める。
- (3) 各降伏震度において設定した断面寸法と軸方向鉄筋配置に対して、図3に示すように安全性照査を満足

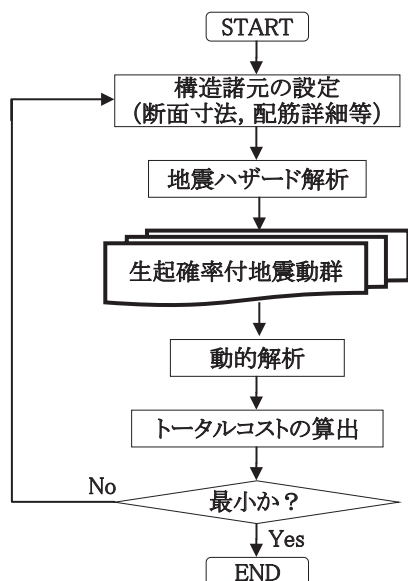


図2 照査の流れ

し、変形性能の算定式における帯鉄筋比の上限を超えない範囲で帯鉄筋量を変化させた複数の断面を設定する。

また、構造物の損傷過程に関しては、以下の条件を設定する。

- (1) 他の部材に先行して柱が先行して降伏することとする。
- (2) 柱の破壊形態は曲げ破壊型とすることとする。
- (3) 上層梁、および杭は、柱より先行して安全性限界に至らないこととする。

これらの条件は、降伏震度別にトータルコストを等価に比較するための前提条件になると考えられる。(3)に関しては、上層梁および杭の復旧コストは柱に比べて高いため、柱が先行して安全性限界に達するほうが復旧コストが安価となると考えられるためにこの条件を設定している。

3.3 初期建設コストの算定の考え方

初期建設コストとしては、設定した各構造諸元について鉄筋やコンクリート等の材料費や、施工費の直接工事費を算定する。

3.4 復旧コストの算定の考え方

復旧コストの算定は、まず各降伏震度で設定した諸元を有する構造物に対して生起確率付き地震動群²⁾を入力し、入力したすべての地震動に対して構造物を構成する各部材の損傷レベルを鉄道構造物等設計標準・同解説（コンクリート構造物）³⁾（以下、RC標準）に準じて算定する。そして、表1に示すような損傷レベルに応じた復旧工法を想定し、復旧費用をそれぞれのケースについて算定する。算定された復旧費用に地震発生確率を乗じて合計することにより、期待復旧費用が算定される。

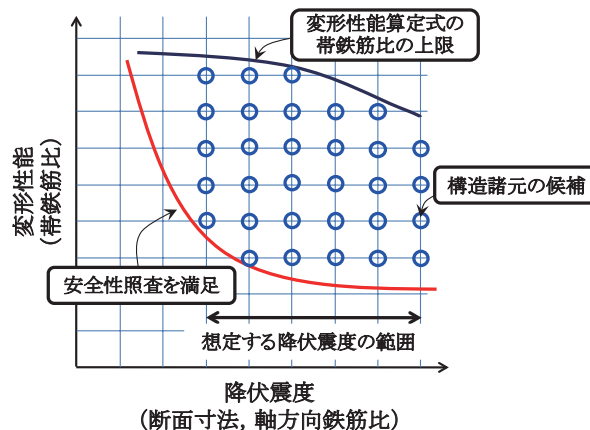


図3 構造諸元の設定例

表1 想定した損傷レベルと復旧工法の例

損傷箇所	損傷レベル			
	1	2	3	4
梁	無補修	足場工 ひび割れ注入工	足場工 ひび割れ注入工 かぶり修復	足場工 ひび割れ注入工 かぶり修復 必要に応じて部材取替え
く体/柱	無補修	足場工 ひび割れ注入工	足場工 ひび割れ注入工 かぶり修復 埋戻工*1)	足場工 ひび割れ注入工 かぶり修復 必要に応じて部材取替え

1) 橋脚下端や柱下端が損傷した場合

表2 想定した損傷レベルと復旧工法の例

供用停止期間	損傷レベル			
	1	2	3	4
	0日	0.5～1日	3～7日	1ヶ月以上

3.5 損失コストの算定の考え方

地震損失コストとしては、地震被害による供用停止で被る運輸収入の減額を考慮する。一般的には、運行停止日数と運輸収入を乗じることにより損失（減収）が算定される。表2は、供用停止日数と損傷レベルの関係について既往の鉄道被害の実績を踏まえて示したものであるが、運行停止日数と損傷レベルの関係は対象となる構造物周辺の環境状況に応じて適宜設定する必要がある。また、平時の運輸収入についても、対象となる線区の状況に応じて適宜設定する必要がある。

ただし、運行停止に伴う損失コストは、個々の構造物ではなく路線に対して算出される。そのため、構造物を設計する際に、路線で被る損失コストを個々の構造物にどの程度負担させるのかを設定することは非常に難しい問題である。そのため現状では、損失コストは既往の地震被害例等を参考に適切に定めるのが良いと考えられる。

4. トータルコストを照査指標とした復旧性照査の検討例

4.1 検討対象構造物の概要

検討は、表3および図4に示すRC標準に準拠したRCラーメン高架橋の照査例⁴⁾の線路直角方向ラーメンを対象に行った。対象としたRCラーメン高架橋はG3地盤に位置し、1柱1杭式で柱間隔、および高さがそれぞれ5.0m、7.0mである。検討は、図5に示す流れで行った。

4.2 降伏震度毎の断面の設定と初期建設コスト C_1 の算定

ラーメン高架橋の降伏震度 k_{hy} は、 $k_{hy} = 0.4$ を下限値、 $k_{hy} = 1.0$ を上限値として、その間を0.1刻みで7水準の目標降伏震度を設定した。

次に、設定した降伏震度毎に、降伏震度近傍で初期コ

表3 対象RCラーメン高架橋の基本諸元

構造形式	RCビームスラブ式 ラーメン高架橋
軌道構造	複線、直線スラブ軌道
基礎形式	1柱1杭基礎
地盤条件	G3地盤
列車荷重	EA-17
径間数（線路直角方向）	1径間
柱間隔（線路直角方向）	L = 5.000m
高さ （地中梁天端～スラブ天端）	H = 7.000m

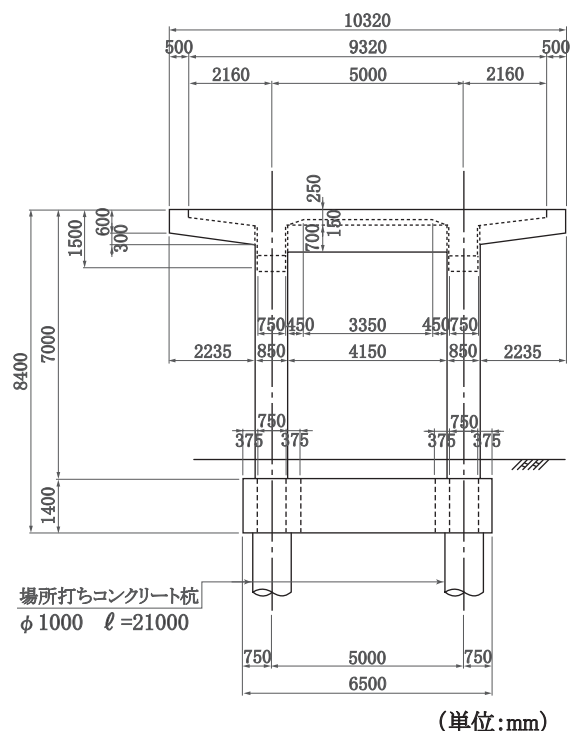


図4 対象RCラーメン高架橋一般図

特集：構造物の耐震設計技術

ストが最小になり、かつ非線形スペクトル法による安全性照査を満足する断面の設定を行った。断面の設定では、まず、地震時以外の照査を満足している図4に示す断面寸法を基本とし、軸方向鉄筋量を変化させることにより初期建設コストが最小となる降伏震度毎の断面設定を行った。ただし、軸方向鉄筋量の調整で降伏震度の設定、あるいは安全性の照査を満足できない場合には、断面寸法の変更を行うこととした。また、柱の帯鉄筋量は

図3に示すように、目標とする1つの降伏震度に対して以下の3種類のケースを設定した。

- (1) 帯鉄筋量(低)：帯鉄筋比が照査の前提を満足し、かつ曲げ破壊型となる最小値
 - (2) 帯鉄筋量(高)：変形性能算定式の上限值となる帯鉄筋量
 - (3) 帯鉄筋量(中)：(1)と(2)の中間程度の帯鉄筋量
- これら3種類のケースは、同じ降伏震度で変形性能が最大となるもの、最小となるもの、およびその中間程度となるものを設定したこととなる。

以上の手順により降伏震度毎に設定した断面の初期建設コストと、その場合の各部材の諸元をそれぞれ、図6、表4に示す。

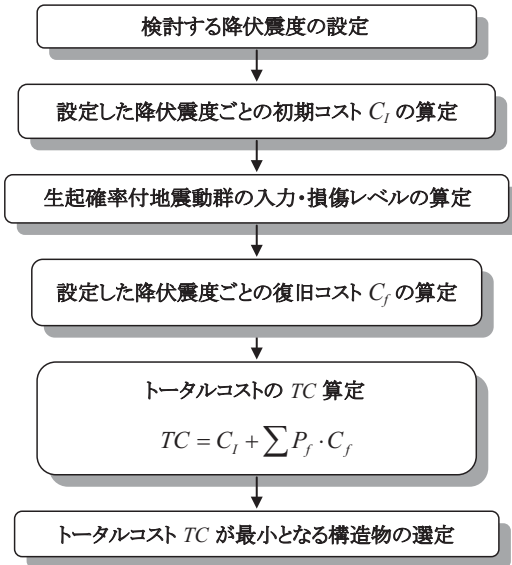


図5 検討の流れ

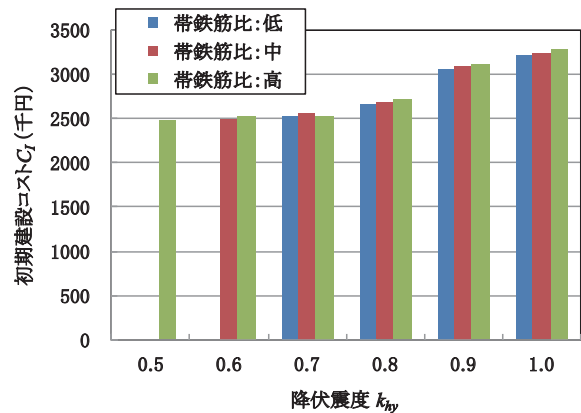


図6 降伏震度毎の最小初期建設コスト

表4 設定した各部材の諸元と最小初期建設コスト

降伏震度		0.4	0.5	0.6	0.7			0.8			0.9			1.0				
柱部材の帯鉄筋量		高	高	高	中	高	中	低	高	中	低	高	中	低	高	中	低	
初期建設コスト C ₁ (千円) ※		2142.0	2472.5	2470.8	2499.0	2535.7	2570.2	2596.6	2671.4	2690.6	2710.6	3066.3	3085.4	3107.2	3212.6	3232.6	3285.4	
柱	B, H (mm)	850	850	850	850	850	850	850	850	850	850	900	900	900	950	950	950	
	軸方向鉄筋	D	25	25	29	29	29	29	29	32	32	32	32	32	32	32	32	32
		本数	5	7	7	7	9	9	9	8	8	8	8	9	9	10	10	10
	帯鉄筋	D	19	19	19	16	19	19	13	19	19	19	22	19	16	22	19	16
		組数	2	2	2	2	2	2	1.5	2	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	2	1.5	1.5
ピッチ (mm)		100	100	100	100	100	150	150	100	100	150	100	100	100	100	100	100	
上層梁	B (mm)	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	1000	1000	1000	1000	1000	1000	
	H (mm)	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	1100	
	上側軸方向鉄筋	D	29	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
		本数	12	10	12	12	16	16	16	16	16	16	20	20	20	20	20	20
	下側軸方向鉄筋	D	29	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
		本数	6	6	8	8	8	8	8	8	8	8	8	20	20	20	20	20
	帯鉄筋	D	16	16	16	16	16	16	16	19	19	19	22	22	22	22	22	22
組数		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
ピッチ (mm)		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
地中梁	B (mm)	750	750	750	750	850	850	850	850	850	850	1100	1100	1100	1200	1200	1200	
	H (mm)	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	1400	
	上側軸方向鉄筋	D	25	29	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
		本数	12	12	12	12	12	12	12	22	22	22	28	28	28	34	34	34
	下側軸方向鉄筋	D	25	29	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
		本数	12	12	12	12	12	12	12	22	22	22	28	28	28	34	34	34
	帯鉄筋	D	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
組数		2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	
ピッチ (mm)		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	
杭	D (mm)	500	500	500	500	500	500	500	600	600	600	650	650	650	750	750	750	
	軸方向鉄筋	D	25	25	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
		本数	12	12	12	12	16	16	16	16	16	16	20	20	20	20	20	20
	帯鉄筋	D	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
		組数	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
ピッチ (mm)	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	125	

※初期建設コストは、検討対象とした線路直角方向の1ラーメン(柱、上層梁、地中梁、杭)あたりの値

表4に示す部材の諸元の場合、表5に示すように、 $k_{hy} = 0.4$ のケースでは、帯鉄筋比を“高”としても曲げに関する安全性照査を満足できず（損傷レベル4）、 $k_{hy} = 0.5$ のケースでは、帯鉄筋比が“高”のケースのみが安全性照査を満足した。そのため、これらのケースについては、帯鉄筋比が“高”のケースのみを表4に示した。同様に $k_{hy} = 0.6$ のケースでは、“低”のケースが安全性照査を満足しなかったため、“高”および“中”のケースを表4に示した。なお、各降伏震度における帯鉄筋比が“高”のケースは、変形性能算定式における帯鉄筋比の上限値（1.29%）を上回るような帯鉄筋の組み合わせとなっている。これは、D19を用いると上限値以下となり、D22では上限値を超えるような場合には、D22を用いることとしているためである。

図6に示すように、目標降伏震度の設定値が0.9を超えると初期建設コストの増加割合が大きくなっている。これは、表4に示すように、柱、上層梁、地中梁、および杭の全部材で断面が増加していることが原因となっている。

4.3 生起確率付き地震動群の入力と損傷レベルの算定

生起確率付き地震動群は、地震危険度解析結果に基づいて、文献2)に示される手順で作成した。地震動の発生確率は対象とする地点、期間によって変化する。今回の検討では、対象地点としては大阪とし、対象期間は標準的な鉄道構造物の設計耐用期間⁵⁾である100年とした。

表4に示すすべての設定断面に対して、生起確率付き地震動群を入力し、構造物を構成する柱、上層梁、地中梁、および杭の損傷レベルを算定した。地震動群としては、100gal～1000galまでの加速度について100gal刻みの10強度、および1200gal、1500galの合計12強度とし、加速度レベル毎に10種類の地震波を作成した。

4.4 直接復旧コスト C_{RE} の算定

地震時の復旧では、工事用道路の確保や復旧用資材等の確保により多くのコストを要するものと考えられる。そこで、直接復旧コスト C_{RE} は、理想的な条件下での復旧コスト C_{RE0} に、施工条件を考慮するための係数 b を乗ずることで算定することとし、 $b=10$ として計算した¹⁾。

C_{RE0} の算定は、まず「4.3 生起確率付き地震動群の入力と損傷レベルの算定」の計算で得られた各地震波に対する部材の損傷レベルに応じて復旧コストを算定した。次に、式(3)に示すように、得られた復旧コストに地震発生確率を乗じ、全最大加速度で総和することにより、表4に示す各設定断面に対する C_{RE0} の期待値を算定した。

$$C_{RE0j} = \sum_{k=1}^{N_k} (p(S_k) \cdot c_{ijk}) \quad (3)$$

ここに、 C_{RE0j} : i 番目の降伏震度の j 番目の断面の理想的な条件下での直接復旧コストの期待値、 $p(S_k)$: 最大加

速度 S_k の k 番目の地震波の発生確率、 c_{ijk} : i 番目の降伏震度の j 番目の断面の最大加速度 S_k の k 番目の地震波による復旧コストである。

図7、および表6に、設定した各降伏震度と復旧費用の関係の算定結果を示す。図に示すように、目標とした降伏震度が小さくなるのにしたがって、復旧コストが大きくなるのが分かる。これは、より低い降伏震度では、損傷が発生する地震動の最大加速度が低く、かつ多くの部材で損傷が発生するためである。

一方、同一の降伏震度における帯鉄筋比の違いでは、本検討では明白な違いが算出されなかった。これは、本検討では、安全性の照査においては降伏震度によって損傷レベルが3以上となるケースが存在するが、生起確率付き地震動群に対しては、すべての設定断面において1500galの地震動においても柱の最大の損傷レベルは2に留まり、帯鉄筋量の差がより顕著に現れる損傷レベル3に到達しなかったためであると考えられる。

表5 安全性照査における柱の損傷レベル

降伏震度	柱帯鉄筋比	柱部材の損傷レベル
0.4	高	4
	中	4
0.5	高	3
	低	4
0.6	中	3
	高	2
0.7	低	3
	中	2
0.8	高	2
	低	2
0.9	中	2
	高	2
1.0	低	2
	中	2
	高	2

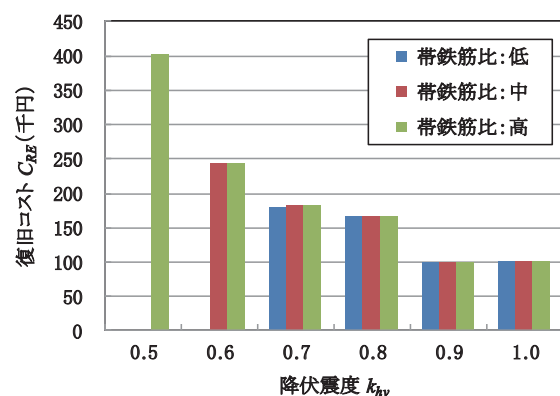


図7 降伏震度と復旧コストの関係

特集：構造物の耐震設計技術

表6 設定した断面の諸元と復旧コスト

降伏震度	柱帯鉄筋比	C_{REV}	$C_{RE} (=C_{REV} * b)$
0.5	高	40.2	402.0
	中	24.2	242.0
0.6	高	24.2	242.0
	低	17.9	179.0
0.7	低	17.9	179.0
	中	18.1	181.0
	高	18.1	181.0
0.8	低	16.6	166.0
	中	16.7	167.0
	高	16.6	166.0
0.9	低	9.8	98.0
	中	9.9	99.0
	高	9.9	99.0
1.0	低	10.2	102.0
	中	10.2	102.0
	高	10.2	102.0

4.5 損失コスト C_{TD} の算定

地震時損失コスト C_{TD} としては、地震被害によって供用停止する運輸収入の減額のみを想定することとし、構造物の損傷程度に応じた供用停止日数と、1日あたりの運輸収入とを乗じることにより算出した。ただし、その一般的な値を精度よく見積るのは現状では困難であるため、本検討では供用停止による損失コストは直接復旧コスト C_{RE} の倍数であるとして、式(4)により算定した。なお、本検討においては、兵庫県南部地震における直接復旧コストと営業損失の関係⁶⁾を参考に、 $k=2$ とした¹⁾。

$$C_{TD} = k \cdot C_{RE} \quad (4)$$

表7に、設定した各降伏震度と損失コストの関係を示す。

4.6 トータルコスト TC の算定

以上の計算結果より、トータルコスト TC は、初期建設コスト C_I 、復旧コスト C_{RE} 、損失コスト C_{TD} の和として式(1)により算出した。

表7および図8に、設定した各降伏震度とトータルコストの関係の算定結果を示す。図8に示すように、本検討でトータルコストが最小である構造物として選択されたケースは降伏震度 $k_{fy} = 0.7$ で、帯鉄筋量が“低”のケースとなった。ただし、帯鉄筋量の多少がトータルコストに与える影響は比較的小さいと考えられるため、地震作用に対する冗長性を増加させる意味から、今回のような検討結果の場合でも帯鉄筋比を中、あるいは高程度とするのが望ましいと考えられる。

5. まとめ

トータルコストを照査指標した復旧性照査方法は、時間軸を考慮した上で合理的な構造物を設計するための有効な手段と考えられ、今後、実設計へ汎用的な適用が期待される。ただし、震災時における復旧コストや損失コ

表7 設定した断面の諸元とトータルコスト

降伏震度	柱帯鉄筋比	C_I	C_{RE}	C_{TD}	TC
0.5	高	2472.5	402.0	804.0	3678.5
	中	2499.0	242.0	484.0	3225.0
0.6	高	2522.7	242.0	484.0	3248.7
	低	2535.7	179.0	358.0	3072.7
0.7	中	2570.2	181.0	362.0	3113.2
	高	2596.6	181.0	362.0	3139.6
	低	2671.4	166.0	332.0	3169.4
0.8	中	2690.6	167.0	334.0	3191.6
	高	2710.6	166.0	332.0	3208.6
	低	3066.3	98.0	196.0	3360.3
0.9	中	3085.4	99.0	198.0	3382.4
	高	3107.2	99.0	198.0	3404.2
	低	3212.6	102.0	204.0	3518.6
1.0	中	3232.6	102.0	204.0	3538.6
	高	3285.4	102.0	204.0	3591.4

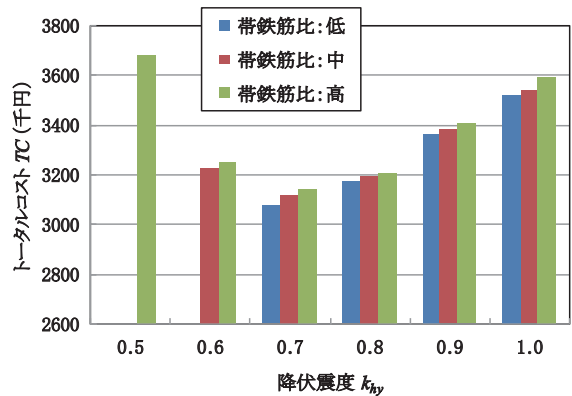


図8 降伏震度とトータルコスト TC の関係

ストの算定方法については、算定精度の向上を図る事が必要と考えられ、今後の検討課題としたい。

文献

- 1) 坂井公俊, 室野剛隆, 澤田純男: 経済性を考慮した復旧性照査法に関する提案, 第13回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造物の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, 2010.2
- 2) 坂井公俊, 室野剛隆: 地震危険度解析に基づく生起確率付地震動群の作成方法, 鉄道総研報告 Vol.24, No.5, 2010, 5
- 3) 国土交通省 鉄道局監修, 財団法人鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物), 丸善, 2004.4
- 4) 財団法人鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(コンクリート構造物) 照査例 RC ラーメン高架橋, 2005.3
- 5) 国土交通省 鉄道局監修, 財団法人鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(耐震設計), 丸善, 1999.10
- 6) 阪神淡路大震災復興記録編纂委員会編: よみがえる鉄路, 山海堂, 1996