

レベル2地震動に対する応急復旧期間をRC橋脚と 整合化できる盛土の部分係数設計法に関する基礎的研究

松崎 裕¹・津村 拓都²・鈴木 基行³

¹正会員 博(工) 東北大学助教 大学院工学研究科土木工学専攻
(〒980-8579 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

²学生会員 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (同上)

³フェロー会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻(研究当時) (同上)

1. はじめに

災害時の避難、救命・救急活動、復旧活動に必要なとなる緊急輸送路をはじめとする道路は、日常はもとより、災害時こそ、その役割を果たす必要があり、災害後の早期復旧が求められる。道路は、橋梁区間、盛土区間、トンネル区間等の異種構造物の組み合わせから成る線状構造を有している。従って、ある道路区間の地震時復旧性を考えた場合には、最も長い復旧期間を要する構造物が当該区間における道路機能の停止期間を決定することになる。一方で、構造種別によって設計基準や復旧対応の考え方が異なることもあり、結果として、道路区間としての地震時復旧性を支配する異種構造間において地震時復旧性の関係が不明確となっているのは大きな課題である。地震後の早期復旧を図る構造計画や構造設計を実現するためには、異種構造物間において、ある構造物だけ著しく復旧期間が長期化することのないようにしなければならない。そのためには、国民生活や企業の経済活動への影響を含めた路線の重要度や各種構造物の復旧性の違いを考慮した上で、復旧期間を念頭においた限界状態の設定および照査体系の構築をしておくことが重要である。

道路橋示方書¹⁾において、重要度の高いB種の橋は地震による損傷が限定的なものに留まり、橋としての機能の回復が速やかに行い得る耐震性能2を確保するように耐震設計がなされている。一方、盛土についてはレベル2地震動に対する定量的な耐震性評価・設計法が明確化されていないために、効果的かつ経済的な対策に結び付いていないのが現状である²⁾。ここで、盛土工指針³⁾においては、極めて重大な二

次被害のおそれのある盛土を除いて、レベル1地震動に対する照査を行えば、レベル2地震動に対する照査は省略してよいとされている。その上で、盛土高20m程度以下の場合については、内部摩擦角としては締め固めた砂の場合に30度や35度が設計時に用いる土質定数の仮定値として示されている。松崎ら⁴⁾は、これらの内部摩擦角30度および35度を有する盛土高3m~10m、法面勾配1:1.8の盛土の滑り崩壊を対象として、既往の地震被害等に基づいて応答と応急復旧期間の関係を表-1および表-2に示すように定めた上で、ニューマーク法⁵⁾に基づいて算定された地震時応急復旧期間の期待値についてRC橋脚の同期待値と比較した。その結果、特に内部摩擦角30度の場合には、レベル1地震動に対する安定性は問題ないものの、図-1にレベル2地震動のII-II-1地震動¹⁾を一方向に入力した場合を例示するように、レベル2地震動に対する応急復旧期間の期待値は盛土高に大きく依存し、同期待値が1日程度のRC橋脚と必ずし

表-1 単柱式 RC 橋脚の最大応答変位と応急復旧期間

最大応答変位 δ	応急復旧期間
$\delta \leq \delta_y$	$T_1=0$ 日
$\delta_y < \delta \leq \delta_{k2}$	$T_2=1$ 日
$\delta_{k2} < \delta$	$T_3=5$ 日

δ_y : 降伏変位, δ_{k2} : 耐震性能2の限界状態の水平変位

表-2 盛土の残留沈下量と応急復旧期間

残留沈下量 δ_r (m)	応急復旧期間
$\delta_r \leq 0.02$	$T_1=0$ 日
$0.02 < \delta_r \leq 0.20$	$T_2=1$ 日
$0.20 < \delta_r$	$T_3=5$ 日

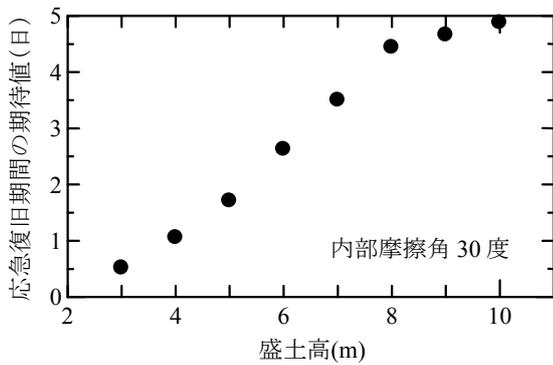


図-1 盛土高とレベル2地震動(II-II-1地震動)に対する地震時応急復旧期間の期待値の関係

も整合していないことを明らかにしている。道路ネットワークの観点からは、盛土高によって地震時応急復旧期間に差異が生じないように設計されるべきであり、それを具現化できる盛土の耐震設計法を構築する必要がある。

そこで、本研究では、レベル2地震動に対する耐震性能が明確に規定されている耐震性能2を確保したRC橋脚と同程度の地震時応急復旧期間の期待値となる盛土を設計するための設計規準式と部分係数の組み合わせを提案し、合わせて盛土高に応じて必要となる締固め度について検討する。

2. RC橋脚と盛土の設計規準式と部分係数

道路橋示方書¹⁾では、B種の橋におけるRC橋脚の耐震設計を行う際に、3波平均の最大応答変位 $\delta_{\max,c}$ を用いて式(1)に対応する照査を行っている。

$$\gamma_1 \frac{\delta_{\max,c}}{\delta_{ls2}} \leq 1 \quad (1)$$

ここに、 γ_1 ：耐震性能2の照査に用いる許容塑性率を算出する場合の部分係数^{1,2)}、 δ_{ls2} ：耐震性能2の限界状態に相当する水平変位¹⁾であり、 δ_{ls2} を超過すると応急復旧期間は1日から5日へと延びる^{6),7)}。

崩壊モードとして滑り崩壊する盛土について、RC橋脚の場合における式(1)と同形式の設計規準式として、応急復旧期間が1日から5日へと延びる残留沈下量²⁾である0.20mを設計上の限界残留沈下量 δ_2 とした。また、設計においては、地盤物性のばらつきは考えず、平均的な単位体積重量、粘着力、内部摩擦角を確定値として用いた上で3波平均の残留沈下量 $\delta_{r,e}$ を算定する。これらの諸量を用いて、レベル2地震動に対する盛土の照査を式(2)により行う。

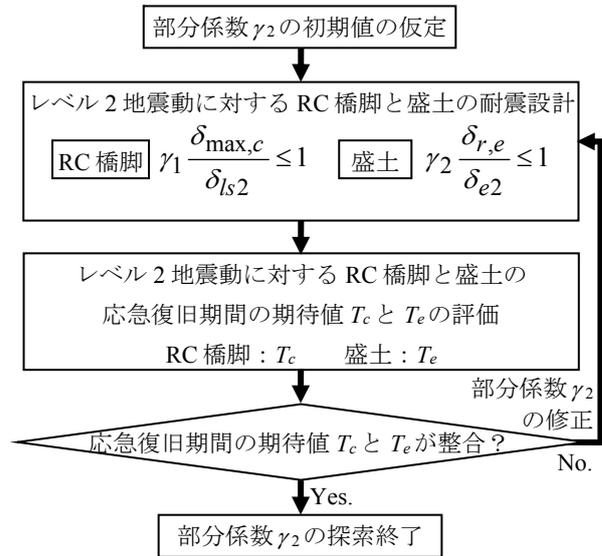


図-2 盛土の耐震設計に用いる部分係数 γ_2 の探索手順

$$\gamma_2 \frac{\delta_{r,e}}{\delta_{e2}} \leq 1 \quad (2)$$

ここに、 γ_2 ：レベル2地震動に対する盛土の照査に用いる許容残留沈下量を算出する場合の部分係数である。

3. 部分係数の探索手順と解析条件

盛土について、RC橋脚と同程度のレベル2地震動に対する応急復旧期間の期待値とするための式(2)の部分係数 γ_2 の探索手順を図-2に示す。図-2の流れとしては、2.で述べた設計規準式と部分係数を用いて設計されたRC橋脚と盛土について、レベル2地震動に対する応急復旧期間の期待値を評価し、両者の期待値が概ね等しくなるような部分係数を探索するものとなっている。地震時応急復旧期間の期待値の評価法については4.で述べる。

部分係数 γ_2 の探索に当たっては、盛土高4m、6m、8m、10m、法面勾配1:1.8の盛土を対象とした。本研究では、レベル2地震動の中でも、より地震時応急復旧期間の期待値が大きくなる⁴⁾タイプIIを対象とした。なお、盛土の単位体積重量は、松崎ら⁴⁾と同様に、内部摩擦角30度、35度の際にそれぞれ16.0kN/m³、17.0kN/m³とし、その他の内部摩擦角については単位体積重量との間に線形関係を仮定した。

4. 地震時応急復旧期間の期待値の評価法

(1) RC橋脚および盛土のモデル化

RC橋脚の水平荷重－水平変位関係について骨格

表-3 考慮した不確定要因とその統計量

	基準値	平均値	変動係数
コンクリートの圧縮強度	23.5N/mm ² ⁹⁾	28.2N/mm ² ⁹⁾	10% ⁹⁾
鉄筋の降伏強度	345N/mm ² ⁹⁾	414N/mm ² ⁹⁾	7% ⁹⁾
鉄筋の弾性係数	2.06×10 ⁵ N/mm ² ⁹⁾	2.00×10 ⁵ N/mm ² ⁹⁾	1% ⁹⁾
耐震性能2の限界状態に相当する水平変位 ¹⁾ に乗じる係数	—	1.060 ¹⁰⁾	17.5% ¹⁰⁾
盛土の内部摩擦角	—	—	15% ¹¹⁾
盛土の粘着力	—	2.0kN/m ²	15% ¹¹⁾

曲線に道路橋示方書¹⁾により算定される降伏点を折れ点とする完全弾塑性型のバイリニアモデル、履歴曲線に Takeda 型モデル⁸⁾を用いた。橋軸方向に対して1自由度系の動的解析(減衰定数 0.02)を行い、最大応答変位を算定した。

盛土の残留沈下量の算定に当たっては、ニューマーク法⁹⁾を用いた。ニューマーク法は、入力パラメータの設定がしやすく簡便な手法であり、盛土工指針³⁾等の指針類においても採用されている。剛体としての滑りを仮定しているため、大変位の算定には課題があるが、本研究において残留沈下量の許容値として考える 0.02m, 0.20m 程度の残留沈下量であれば盛土高に比較して小さな変位であり、適用できると判断した。

(2) 考慮する不確定要因

コンクリートおよび鉄筋の材料特性の不確定性は足立・運上⁹⁾、RC 橋脚の変形性能評価に係る不確定性は文献 10)、盛土および表層地盤の地盤定数の不確定性は田中ら¹¹⁾に基づいて表-3 のように設定した。なお、全ての変数について正規分布を仮定した。試行回数 10,000 回のモンテカルロシミュレーションに基づき、これらの不確定性を考慮した。

(3) 入力地震動

道路橋示方書¹⁾におけるレベル2地震動のタイプIIのII種地盤の標準加速度応答スペクトルにフィッティングされた設計地震動を入力地震動として用いた。

(4) 地震時応急復旧期間の期待値の評価法

RC 橋脚の最大応答変位および盛土の残留沈下量が各応答レベルとなる確率を表-1 および表-2 に対応させて、表-4 および表-5 のように算定する。これらの確率に各応答レベルの場合の応急復旧期間 T_i を乗じて各構造物で全ての応答レベルについて総和をとることで、式(3)および式(4)に基づいて、RC 橋脚および盛土のレベル 2 地震動に対する応急復旧期間の期待値 T_c および T_e を評価する。

表-4 単柱式 RC 橋脚の最大応答変位レベルとその確率

最大応答変位 δ	当該応答レベルになる確率
$\delta \leq \delta_y$	p_{c1}
$\delta_y < \delta \leq \delta_{ls2}$	p_{c2}
$\delta_{ls2} < \delta$	p_{c3}

δ_y : 降伏変位, δ_{ls2} : 耐震性能2に相当する水平変位

表-5 盛土の残留沈下量レベルとその確率

残留沈下量 δ_r (m)	当該応答レベルになる確率
$\delta_r \leq 0.02$	p_{e1}
$0.02 < \delta_r \leq 0.20$	p_{e2}
$0.20 < \delta_r$	p_{e3}

$$T_c = \sum p_{ci} T_i \quad (3)$$

$$T_e = \sum p_{ei} T_i \quad (4)$$

5. RC橋脚と同程度の応急復旧期間とするためのレベル2地震動に対する盛土の耐震設計に用いる部分係数

まず、図-2において、比較対象となるRC橋脚のレベル2地震動に対する応急復旧期間の期待値について、複数の諸元のRC橋脚で検討を行った。その結果、レベル2地震動に対する応急復旧期間の期待値は耐震性能2に反映された設計思想通り、1.0日~1.6日程度と、松崎ら⁴⁾の検討結果とほとんど変わらない結果を得ている。

次に、部分係数 γ_2 の初期値の候補を選定するため、内部摩擦角30度の場合を示した図-1の結果を参考にする。レベル2地震動に対する応急復旧期間の期待値は、盛土高4mの場合は1.1日、盛土高5mの場合は1.7日であり、上記のRC橋脚の同期待値と概ね整合している。そこで、式(2)と同様に、これらの盛土について、設計用モデルとして、盛土内において内部摩擦角30度で一定として設計残留沈下量を算定すると、盛土高4mの場合は0.07m、盛土高5mの場合は

表-6 レベル2地震動に対する盛土高毎の設計残留沈下量と応急復旧期間の期待値

地震動	盛土高 4m(29度)		盛土高 6m(31度)		盛土高 8m(32度)		盛土高 10m(33度)	
	設計残留沈下量(m)	復旧期間の期待値(日)	設計残留沈下量(m)	復旧期間の期待値(日)	設計残留沈下量(m)	復旧期間の期待値(日)	設計残留沈下量(m)	復旧期間の期待値(日)
II-II-1	0.13	1.4	0.14	1.4	0.15	1.5	0.11	1.2
	0.18	1.7	0.20	1.8	0.21	1.9	0.16	1.4
II-II-2	0.12	1.2	0.13	1.3	0.14	1.3	0.11	1.1
	0.11	1.1	0.12	1.1	0.12	1.2	0.10	1.0
II-II-3	0.16	1.5	0.17	1.6	0.18	1.6	0.16	1.3
	0.09	1.0	0.10	1.0	0.11	1.1	0.08	0.9
平均値	0.13	1.3	0.14	1.4	0.15	1.4	0.12	1.1

* 盛土高の後の括弧内の数値は、設計に用いる内部摩擦角の値である。

0.15mとなった。これらの設計残留沈下量に対する限界残留沈下量0.20mの比率を参考にして部分係数 γ_2 の初期値を定め、部分係数の探索を行った。

その結果、式(2)において、 $\gamma_2=1.3$ として盛土の耐震設計を行うと、表-6のように、地震動に依らず、概ねRC橋脚と同程度の地震時応急復旧期間の期待値となることが示された。なお、盛土高が大きい程、式(2)を満足した結果として、RC橋脚と同程度の地震時応急復旧期間の期待値となるために必要となる締め固め度に対応した内部摩擦角は大きくなっている。

6. まとめ

本研究では、異種構造物間における地震時応急復旧期間の整合化に向けた基礎的研究として、盛土高10mまでの範囲を対象として、レベル2地震動に対する耐震性能が明確に規定されている耐震性能2を確保したRC橋脚と同程度の地震時応急復旧期間の期待値とすべく、盛土の残留沈下量の照査に用いる設計規準式と部分係数を提案した。本研究における解析条件は限られたものであり、今後もより広範な諸元・条件に基づく検討が必要であるが、本研究で得られた知見は以下のようにまとめられる。

- 1) 地震時応急復旧期間が1日から5日へと延びる限界残留沈下量0.20mに対して、3波平均の設計残留沈下量について、部分係数1.3を用いて照査を行うことで、耐震性能2を確保したRC橋脚と同程度のレベル2地震動に対する応急復旧期間の期待値となる盛土の耐震設計がなされる。
- 2) 1)の照査を満足するためには、盛土高が大きい程、所要の残留沈下量に抑えるためによく締め固めることが要求される。盛土高に関わらず、同一の限界残留沈下量および部分係数を用いて設計される結果、地震時応急復旧期間の期待値が整合するように盛土の耐震設計がなされる。

謝辞：本研究は、一般財団法人国土技術研究センターの平成26年度(第16回)研究開発助成(研究代表者：松崎裕)を受けて実施されたものです。ここに記して関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編，丸善出版，2012。
- 2) 常田賢一，小田和広：道路盛土の耐震性能評価の方向性に関する考察，土木学会論文集C，Vol. 65，No. 4，pp. 857-873，2009。
- 3) 日本道路協会：道路土工—盛土工指針(平成22年度版)，2010。
- 4) 松崎裕，笠原康平，鈴木基行：RC橋脚と盛土の地震時復旧期間の整合化に関する基礎的研究，JCROSSAR2015論文集，pp. 378-384，2015。
- 5) 館山勝，龍岡文夫，古関潤一，堀井克己：盛土の耐震設計法に関する研究，鉄道総研報告，Vol. 12，No. 4，pp.7-12，1998。
- 6) 土木研究所：道路橋の耐震設計における部分係数設計法に関する研究，平成19年度重点プロジェクト研究報告書，<https://www.pwri.go.jp/jpn/results/report/report-project/2007/pdf/2007-9-4.pdf>
- 7) 日本道路協会：道路震災対策便覧(震災復旧編)平成18年度改訂版，丸善，2007。
- 8) Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielsen, N. N.: Reinforced concrete response to simulated earthquakes, *Journal of the Structural Division, ASCE*, Vol. 96, No. 12, pp. 2557-2573, 1970.
- 9) 足立幸郎，運上茂樹：材料特性等のばらつきが鉄筋コンクリート橋脚の地震応答特性評価に及ぼす影響，第25回地震工学研究発表会講演論文集，pp. 961-964，1999。
- 10) 土木研究所：鉄筋コンクリート橋脚の地震時限界状態の評価手法に関する研究，土木研究所資料，第4262号，2013。
- 11) 田中博文，沖村孝，鳥居宜之：盛土の地震応答特性評価に地盤の空間的不均質性が及ぼす影響，土木学会地震工学論文集，Vol. 28，論文番号0005，2005。