

2015 年鬼怒川洪水の外水氾濫における建築構造物の危険性評価

Research on a Risk Evaluation of Building Structures Resulting from the 2015 Kinu River External Water Flooding

室蘭工業大学 ○学生員 石上元春 (Motoharu Ishigami)
 室蘭工業大学 正 員 中津川誠 (Makoto Nakatsugawa)
 室蘭工業大学 学生員 小池達也 (Tatsuya Koike)
 (株)水工技研 正 員 石田義明 (Yoshiaki Ishida)

1. はじめに

2015 年 9 月 9 日から 10 日にかけて北関東を中心に記録的な大雨が降り、その影響で茨城県常総市鬼怒川にて破堤が生じた。この洪水により写真-1¹⁾のように多くの家屋が床下・床上浸水、一部の家屋が転倒・滑動の被害を受けた。洪水からの回避方法に家屋の中で浸水から避難する垂直避難がある。しかし、家屋が転倒や滑動しないことが判別できなければ垂直避難も危険となる。

そこで本研究では奥山ら²⁾の構造物に対する津波の危険性評価に関する既往研究を参考に、iRIC2.3³⁾による外水氾濫解析と常総市街地における家屋の転倒・滑動の検討から、外水氾濫による家屋の危険性の評価を以下の手順で行う。

- (1) iRIC2.3 を用いて計算された最大水深予測図と佐山ら⁴⁾の平成 27 年関東・東北水害鬼怒川氾濫による常総市周辺の浸水分布調査を比較し、計算精度の検証を行った。
- (2) 外水氾濫による家屋の安全性を評価するため、家屋にかかる流体力の算定、直接基礎と杭基礎の家屋の転倒・滑動の検証を行った。
- (3) 転倒滑動危険曲線を作成し、その結果より常総市破堤地点近辺での転倒滑動範囲想定図を作成した。

2. 研究方法

2.1 災害事例の概要⁵⁾

当該洪水での被害者数は死者 2 名、負傷者 30 名、建物の被害は常総市だけで全壊 50 件、大規模半壊 914 件、半壊 2,773 件、床下浸水 2,264 件発生したと報告されている。また避難指示は 11,230 世帯、31,398 人に、避難勧告は 990 世帯、2,775 人に発令された。しかし、避難の遅れなどにより多くの住民が孤立し、約 4,300 人がヘリや地上部隊により救助された。住宅地及び公共施設等の浸水が概ね解消するのに約 10 日かかった。

2.2 外水氾濫解析と流体力の算定

(1)iRIC2.3 Nays2D Flood を用いた外水氾濫解析

iRIC2.3 は、河川の流れ・河床変動解析を行うソフト

ウェアである。iRIC2.3 ソフトウェアに含まれる Nays2D Flood は、地形・河川のデータ・粗度のデータ等を入力し、氾濫流解析を行うソルバーの一つである。

本研究における計算条件等のデータは、地形標高は国土地理院基盤地図情報の数値標高モデル 5m メッシュを使用し、粗度係数は河道(0.030)、市街地(0.050)、水田(0.060)、大規模道路(0.020)で設定し、流量ハイドログラフは鬼怒川鎌庭水位観測所のリアルタイム 10 分水位⁶⁾を既往洪水(2001 年 9 月洪水)⁹⁾の H-Q 関係を用いて Q-T に変換して与えた。

堤防は決壊した状態を初期値として溢水標高 20.5m、破堤幅は約 140m、破堤後の敷高は 17.5m として設定した。なお、内水域の降雨、水門・樋門等の大規模排水施設等は氾濫計算で考慮していない。

(2)家屋にかかる流体力の算定

外水氾濫による家屋の危険性を評価するにあたり、家屋にかかる流体力を算定する。本研究では、高橋ら⁷⁾の研究を参考に形状抵抗を考慮した流体力の式を使用した。

$$F_t = C_D B h_f \frac{\rho u^2}{2} \quad (1)$$

ここで、 C_D は形状抵抗係数であり、今回は高橋ら⁷⁾の研究を参考に 2.128 を使用した。 B は受圧幅(m)、 h_f は浸水深(m)、 ρ は流体密度(kg/m^3)、 u は水平方向流速(m/s)である。

2.3 転倒に対する検討方法

計算条件として流体力を受ける家屋は、木造 3 階建、鉄骨造 3 階建、RC 造 3 階建を想定した。さらに本研究では、各構造形式において直接基礎の他に杭基礎を考慮した検討を行う。今回使用する杭や家屋の設計条件は、日本建築防災協会⁸⁾の設計例と奥山ら²⁾の研究を参考にした。杭には STK400 の杭径 139.8mm、厚さ 6.6mm の杭を長さ 13m、16 本使用する。家屋の受圧幅は 8m、奥行は 5.5m、高さは 9.6m、建築面積は 44m² という条件を仮定した。家屋の外観のイメージ⁹⁾と杭の配置を図-1 に示す。家屋の地盤に作用する自重¹⁰⁾は、木造 3 階建は 388kN、鉄骨造 3 階建は 485kN、RC 造 3 階建は



写真-1 鬼怒川洪水の被害状況¹⁾

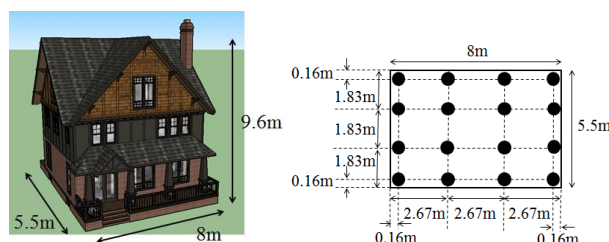


図-1 建物の外観⁶⁾と杭伏図

2,071kN である。また、流体力は受圧面に垂直に作用するものとし、家屋内は浸水しない場合と浸水する場合を考慮して試算した。浸水を考慮しない場合、浮力は家屋全体の排除堆積、浸水を考慮した場合、浸水している建築材料の部分のみの排除堆積とした。建築材料の寸法等¹¹⁾は、図-2 に示すとおりである。

転倒の模式図を図-3 に示す。図の O 点を中心に転倒することとした。転倒モーメントは流体力によるモーメントと浮力、抵抗モーメントは建物自重と杭の引抜抵抗力を考え、次式を満たすと家屋が転倒するとした。

$$F_t \cdot x + F_f \cdot \frac{D}{2} \geq M_g \cdot \frac{D}{2} + M_p \quad (2)$$

ここで、 F_t は水平方向流体力(kN)、 x は O 点から流体力の作用点までの距離(m)、 F_f は浮力(kN)、 M_g は建物自重(kN)、 D は建物奥行(m)、 M_p は杭の引抜抵抗力によるモーメント(kNm)であり、直接基礎の場合には M_p は 0 とする。

2.4 滑動に対する検討方法

流体力を受ける家屋の条件は、前節で示したものと同様とし、滑動の模式図を図-4 に示す。

(1)直接基礎の家屋における滑動に対する検討

家屋が滑動する条件は、水平方向流体力と家屋と接地面の摩擦力の釣り合いより、次式を用いた

$$F_t \geq \mu(M_g - F_f) \quad (3)$$

ここで、 F_t は流体力(kN)、 M_g は建物自重(kN)、 F_f は浮力(kN)、 μ は摩擦係数である。また、常総市の破堤付近の地盤は鬼怒川堤防調査委員会の調査¹²⁾より粘性土であるため、国土交通省中部地方整備局道路設計要領¹³⁾を参考に、摩擦係数は 0.5 とした。

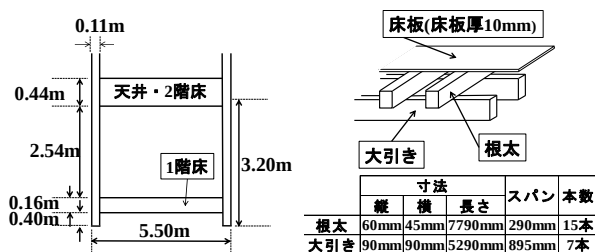


図-2 建物断面図と一階床の構造と寸法⁷⁾

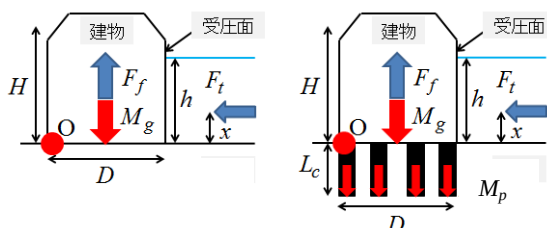


図-3 転倒模式図(左：直接基礎，右：杭基礎)

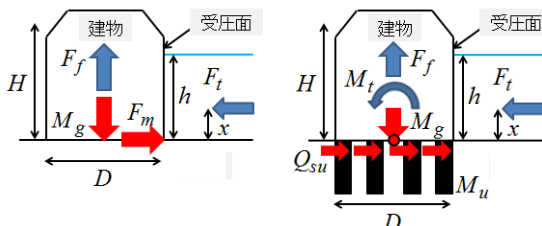


図-4 滑動模式図(左：直接基礎，右：杭基礎)

(2)杭基礎の家屋における滑動に対する検討

家屋が滑動する条件は、流体力と杭のせん断耐力、流体力による曲げモーメントと杭の曲げ耐力との釣り合いである。また、今回使用した式や計算過程は「建築基礎構造設計指針」¹⁴⁾と奥山ら²⁾の研究を参考にした。まず、杭のせん断耐力との釣り合いとして、次式を満たすとき、家屋が滑動すると考える。

$$F_t \geq nQ_{su} \quad (4)$$

ここで、 F_t は流体力(kN)、 Q_{su} は杭のせん断耐力(kN)、 n は杭の本数である。さらに、杭の曲げ耐力との釣り合いとして、次式を満たすとき、家屋が滑動すると考える。

$$M_t \geq M_u \quad (5)$$

ここで、 M_t は流体力による曲げモーメント(kNm)、 M_u は軸力を考慮した杭の曲げ耐力(kNm)である。軸力を考慮した杭の曲げ耐力 M_u を、次式により算定する。

$$M_u = M_p \cdot \cos\left(\frac{\pi N_t}{2N_y}\right) \quad (6)$$

ここで、 M_p は全塑性曲げモーメント(kNm)、 N_t は杭に作用する最大軸力(kN)、 N_y は降伏圧縮限界耐力(kN)である。流体力による曲げモーメント M_t は次式により算定する。

$$M_t = \frac{\sqrt{2}}{2\beta} e^{-\frac{3}{4}} \frac{F_t}{n} \quad (7)$$

ここで、 β は杭の特性値(m^{-1})、 n は杭の本数である。したがって、(6)式の M_u と(7)式の M_t から、(5)式のとおり、流体力による曲げモーメントと杭の曲げ耐力との釣り合いが評価され、滑動の有無が判定できる。

(3)転倒滑動危険曲線の作成方法

高橋ら⁷⁾の研究を参考に求めた転倒滑動耐力より、家屋が転倒滑動するときの流速と水深を逆算し、その関係性を示したものが転倒滑動危険曲線である。

転倒滑動危険曲線の作成するにあたって、まず形状抵抗を考慮した流体力を表す式(1)から流速を逆算する。

$$F_t = C_D B h_f \frac{\rho u^2}{2} \rightarrow u = \sqrt{\frac{2F_t}{\rho C_D B h_f}} \quad (8)$$

次に、家屋が転倒滑動する条件の釣り合いから危険性を判断する F_t を求める式に変換する。直接基礎の転倒の場合、以下ようになる。

表-1 転倒滑動危険曲線の作成に必要な式

	判別式	危険性を判断する流体力 F_t	危険性を判断する流速 u
直接基礎	転倒 $F_t \cdot x + F_f \frac{D}{2} \geq M_g \frac{D}{2}$	$F_t = \frac{D(M_g - F_f)}{2x}$	$u = \sqrt{\frac{D(M_g - F_f)}{x \rho C_D B h_f}}$
	滑動 $F_t \geq \mu(M_g - F_f)$	$F_t = \mu(M_g - F_f)$	$u = \sqrt{\frac{2\mu(M_g - F_f)}{\rho C_D B h_f}}$
杭基礎	転倒 $F_t \cdot x + F_f \frac{D}{2} \geq M_g \frac{D}{2} + M_p$	$F_t = \frac{D(2M_p + M_g - F_f)}{2x}$	$u = \sqrt{\frac{D(2M_p + M_g - F_f)}{x \rho C_D B h_f}}$
	せん断 滑動 曲げ $\frac{\sqrt{2}}{2\beta} e^{-\frac{3}{4}} \frac{F_t}{n} \geq M_u$	$F_t = nQ_{su}$ $F_t = \sqrt{2n\beta M_u} e^{\frac{3}{4}}$	$u = \sqrt{\frac{2nQ_{su}}{\rho C_D B h_f}}$ $u = \sqrt{\frac{2\sqrt{2n\beta M_u} e^{\frac{3}{4}}}{\rho C_D B h_f}}$

$$F_t \cdot x + F_f \frac{D}{2} = M_g \frac{D}{2} \rightarrow F_t = \frac{D(M_g - F_f)}{2x} \quad (9)$$

この F_t を(8)式に代入すると以下ようになる。

$$u = \sqrt{\frac{D(M_g - F_f)}{x\rho C_D B h_f}} \quad (10)$$

(10)式に水深とその時の浮力を与えることにより、転倒するときの流速を求めることができる。同じように式を変換したものを表-1 に示す。

3. 結果と考察

3.1 2015 年鬼怒川破堤時の外水氾濫流の再現結果

iRIC2.3 による外水氾濫解析結果を図-5、佐山ら⁴⁾の平成 27 年関東・東北水害鬼怒川氾濫による常総市周辺の浸水深分布調査による浸水深分布図との比較を図-6 に示し、それらを比較することで計算精度を検証する。まず iRIC2.3 による外水氾濫解析結果より、最大流速は破堤地点付近で高い値となり、下流側の大部分は 1m/s になった。最大水深は下流側に行くほど高い値を示した。実際に転倒・滑動が確認できたのは、破堤地点付近が大半で越流地点付近に数件であり、下流側では確認できなかった。家屋が転倒・滑動するリスクは、従来から 1 階の天井を超える程度の水深に達すると増大すると言われるように水深の影響が大きいと考えられている。しかし、iRIC2.3 による外水氾濫解析結果からは流速も重要な要因と考えられる。また、浸水深分布図との比較では、破堤・越流地点付近では同程度の値となったが、下流側に行くにつれて誤差が大きくなり、最大で約 60cm の誤

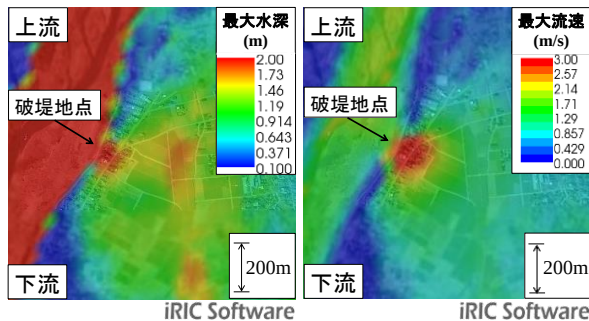


図-5 iRIC による外水氾濫解析結果
(左：最大水深，右：最大流速)

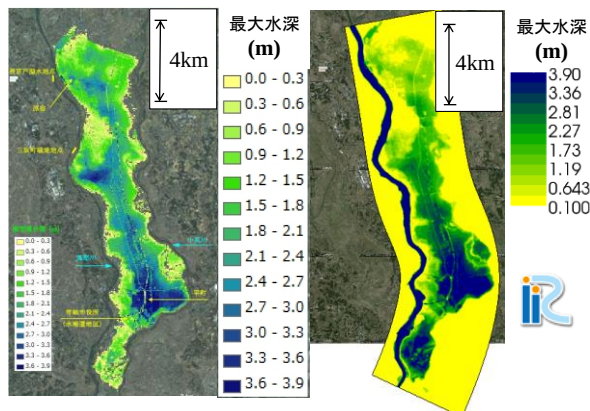


図-6 左：常総市周辺の浸水深分布図⁴⁾，
右：iRIC による外水氾濫解析結果

差が発生した。こちらの要因としては樋門や水門等の排水を考慮していないことが考えられる。

3.2 転倒滑動危険曲線の作成結果

図-7 に浸水を考慮しない場合の転倒危険曲線、図-8 に浸水を考慮しない場合の滑動危険曲線、図-9 に転倒滑動危険曲線から求めた転倒滑動範囲想定図を示す。図では危険曲線を超える流速・水深になると、家屋が転倒滑動する危険性があることを意味する。直接基礎の場合は転倒より滑動の方が先に起きる結果となったので安全側をとり、杭基礎の場合は水深が低いときは滑動が先に起き、3m を超えたあたりから転倒が先に起きるので安全側をとり転倒滑動範囲想定図を作成した。作成した結果、RC 造直接基礎、杭基礎は転倒滑動範囲が現れなかったため、洪水対策として RC 造や杭基礎は有効であると考えられる。実際に破堤付近で周りの家が流されている中、杭基礎の家屋だけが残っていたと報告されている¹⁾。木造・鉄骨造の転倒滑動範囲想定図を見ると常総市の大部分が危険範囲になってしまい、大幅に過大評価する結果になった。原因としては浸水を考慮していないために大きな浮力が働き、水深が 1m 前後で家屋が浮いてしまうためである。

そこで、次に浸水を考慮した転倒滑動危険曲線を作成した。図-10 に浸水を考慮した転倒滑動危険曲線、図-11 に浸水を考慮した転倒滑動範囲想定図を示す。浸水を考慮した場合、木造の場合は転倒・滑動範囲が小さくなり、鉄骨造は転倒・滑動範囲が現れない結果となった。

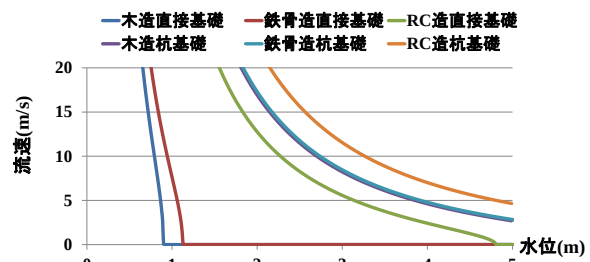


図-7 浸水を考慮しない場合の転倒危険曲線

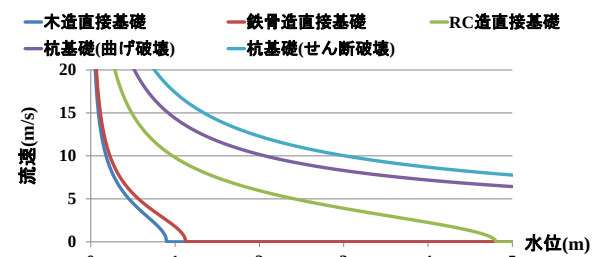


図-8 浸水を考慮しない場合の滑動危険曲線

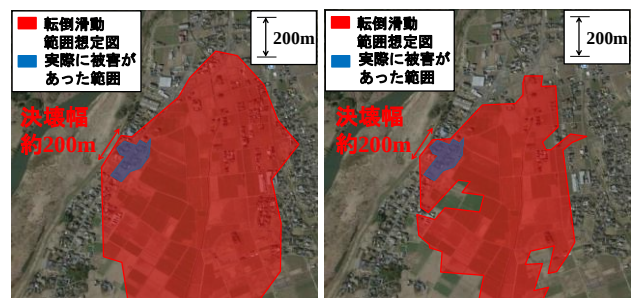


図-9 浸水を考慮しない場合の転倒滑動範囲想定図
(左：木造直接基礎，右：鉄骨造直接基礎)

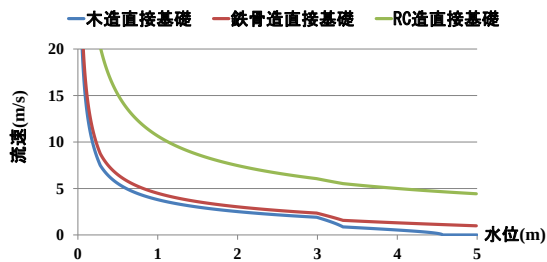


図-10 浸水を考慮した転倒滑動危険曲線

3.3 転倒滑動限界から見た家屋の転倒滑動範囲想定図

図-12 に浸水を考慮した場合と時間経過に伴う水深と流速の変化を考慮した場合の転倒滑動範囲想定図を示す。時間経過に伴う水深と流速の変化を考慮した場合は、各地点で水深が上がり始めて最初の 10 分間を浸水しないこととし、10 分以降を浸水すると仮定して算出した転倒滑動範囲想定図である。浮力は従来から、家屋の転倒や滑動に対してかなり重要な要素と言われており⁷⁾、浸水を考慮した転倒滑動範囲想定図では、過小評価してしまう場所が存在した。したがって、時間経過に伴う水深と流速の変化を考慮した場合に概ね妥当な転倒滑動範囲想定図が得られた。

4. おわりに

本研究で得られた成果を下記に記す。

- 1) iRIC2.3 を用いて外水氾濫解析を行った結果、時間経過による水位・流速の変化がどのように起こっているのかが分かった。
- 2) 実際の設計例を用いた家屋を想定することで、転倒や滑動についての安全性を家屋の基礎を考慮して検討した。
- 3) 転倒滑動危険曲線を作成することにより家屋の転倒滑動範囲想定図を示した。

今後は、様々な家屋や地盤などを計算条件として市街地全体の安全性について検討していきたい。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、室蘭工業大学大学院環境建築学コースの土屋勉教授には有益な助言をいただいた。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所, 国立研究開発法人建築研究所: 平成 27 年 9 月 10 日に茨城県常総市で発生した鬼怒川氾濫による建築物の被害調査報告, 2015. <http://www.kenken.go.jp/japanese/contents/topics/2015/151026.pdf> (2015.11.20 閲覧)
- 2) 奥山裕介, 中津川誠, 吉田ちあき: 釧路市を対象とした津波による家屋の安全性評価, 平成 26 年度土木学会北海道支部論文報告集, 71, B-21, 2015.
- 3) iRIC プロジェクト: iRIC ソフトウェア. <http://i-ric.org/ja/>
- 4) 佐山敬洋, 大槻順朗, 永野博之, 二瓶泰雄: 平成 27 年関東・東北水害鬼怒川氾濫による常総市周辺の浸水深分布調査(第 2 報), 2015. <http://hydro.iis.u->

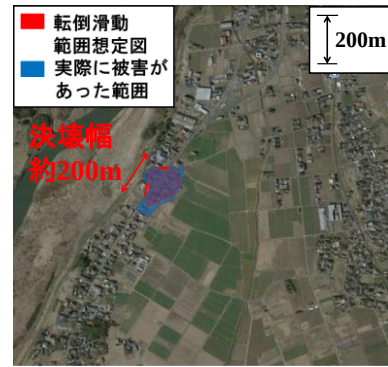


図-11 浸水を考慮した場合の転倒滑動範囲想定図

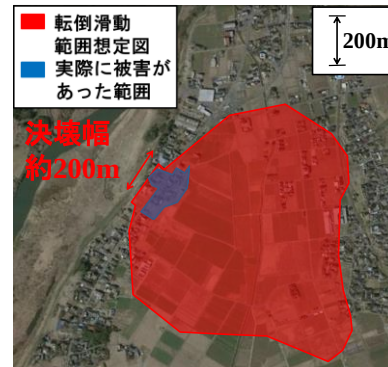


図-12 時間経過に伴う水深と流速の変化を考慮した場合の転倒滑動範囲想定図

- okyo.jp/Mulabo/news/2015/20150910_KinuFloodReport_v02.pdf (2015.11.1 閲覧)
- 5) 国土交通省関東地方整備局: 「平成 27 年関東・豪雨」に係わる洪水被害及び復旧状況等について, 2015. http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000636288.pdf (2015.10.27 閲覧)
 - 6) 国土交通省: 水文水質データベース. <http://www1.river.go.jp/> (2015.10.1 閲覧)
 - 7) 高橋保, 中川一, 加納茂紀: 洪水氾濫による家屋流失の危険度評価, 京都大学防災研究所年報, B, 28, B-2, pp.455-470, 1985.
 - 8) 一般財団法人日本建築防災協会: 津波により浸水の恐れがある地域における住宅の設計例 1. http://www.kenchiku-bosai.or.jp/files/2013/11/12_tsunami08.pdf (2015.10.2 閲覧)
 - 9) Trimble: SketchUp ソフトウェア. <http://www.sketchup.com/ja>
 - 10) 有限会社 ADS 計画研究所: 建物の重さ. <http://www.ads-network.co.jp/taishinsei/kozo-kagaku-01.htm> (2015.10.2 閲覧)
 - 11) 住まいづくり研究室: 木造住宅のつくり方. <http://www.ie-erabi.com/> (2015.11.4 閲覧)
 - 12) 国土交通省鬼怒川堤防調査委員会: 第 2 回鬼怒川堤防調査委員会資料, 2015. http://www.ktr.mlit.go.jp/ktr_content/content/000633270.pdf (2015.10.10 閲覧)
 - 13) 国土交通省中部地方整備局: 道路設計要領, 第 2 章擁壁. <http://www.cbr.mlit.go.jp/road/sekkeiyouyou/> (2015.10.2 閲覧)
 - 14) 日本建築学会編: 「建築基礎構造設計指針」, 2001. (2015.10.2 閲覧)