



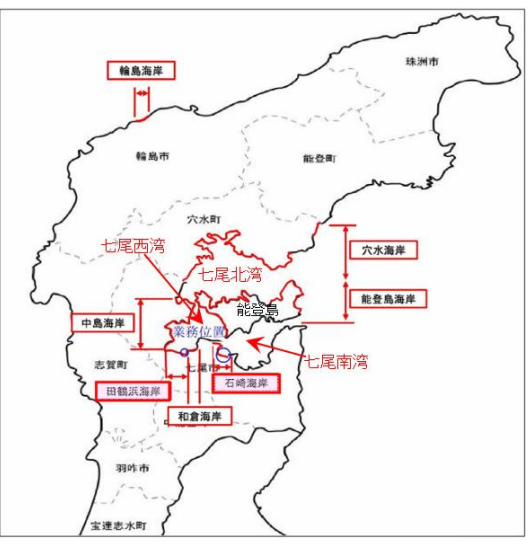
能登半島地震により傾斜した堤防護岸の耐震性能照査手法の確立

－残留傾斜に応じた対策要否の早期判定を目指して－

内外エンジニアリング 株式会社

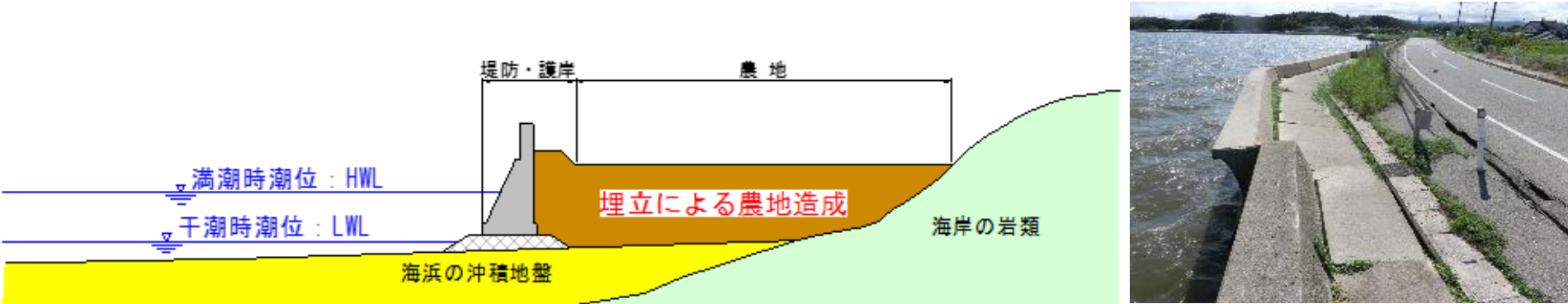
概要

令和 6 年能登半島地震により、七尾湾沿岸の農地海岸保全施設（堤防護岸）の多くが、倒壊や天端沈下、傾斜・移動による目地開きなどの被害を受け、その機能が著しく低下した。この状態では、高潮等による更なる被害が懸念されたため、北陸農政局土地改良技術事務所により、被災した堤防護岸の復旧工事が進められている。被害を受けた堤防護岸は、重力式コンクリート構造がほとんどで、多くが傾斜した状態で残存した。本報では、傾斜した堤防護岸の安定性評価（残存耐力照査）を行い、対策の要否判定を明確にすることで早期復旧を目指した事例を報告する。



対象施設の概要と被害状況

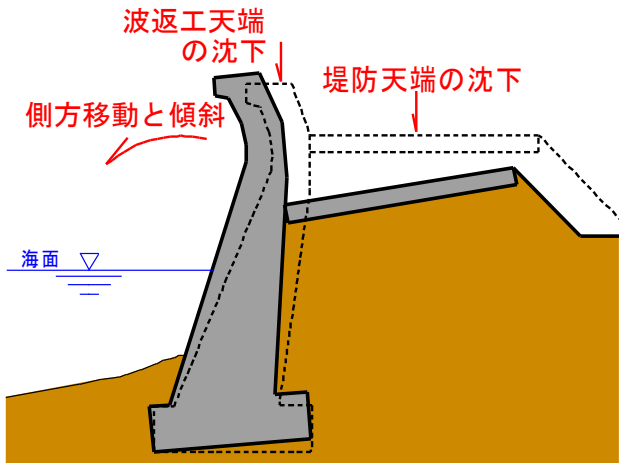
■対象施設概要：被害を受けた堤防護岸は、昭和 20～40 年代に建設され、高さ 3～4m 程度の護岸の背後を埋立して農地とする“地先干拓”における堤防である。



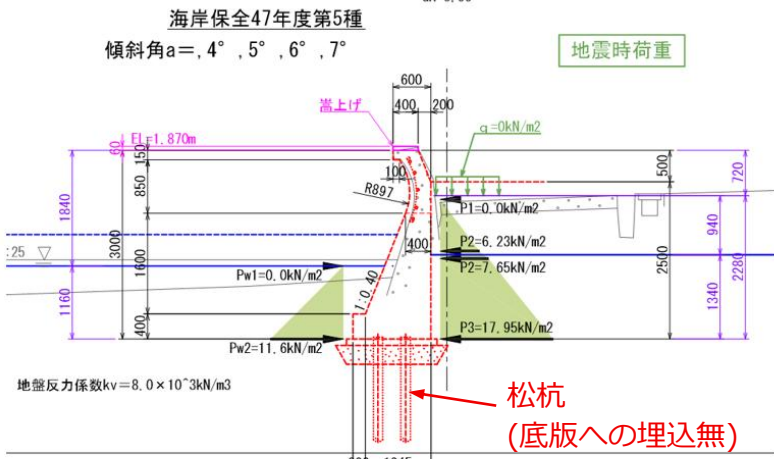
■被害状況：七尾湾沿岸付近では、震度 6 弱～6 強を観測し、レベル 2 地震動による変状であった。傾斜している堤防護岸の角度（波返工天端で計測）は、1°～最大 20°程度であった。

■モデル化と設計条件

- 基本方針：本復旧設計では、従来地震相当（レベル 1 地震動）に対する“原形復旧”を基本とし、既設堤体・護岸を安定する状態とする復旧方法を検討した。
なお、本地区の堤防護岸は、“農地海岸堤防”であり、堤防背後地の重要度を踏まえ、レベル 2 地震動は対象としない。
- 照査方法：一般的に用いられ実績のある「安全率法」による照査方法を採用した。
- 材 料：躯体無筋コンクリート(22.6kN/m³)
底版下面摩擦係数(砂質土 0.6、粘性土 0.5)
- 荷 重：躯体自重、背面土圧、前面外水位、躯体浮力、地表面荷重
- 安全率の許容値：滑動安全率 1.0、転倒安全率 1.1



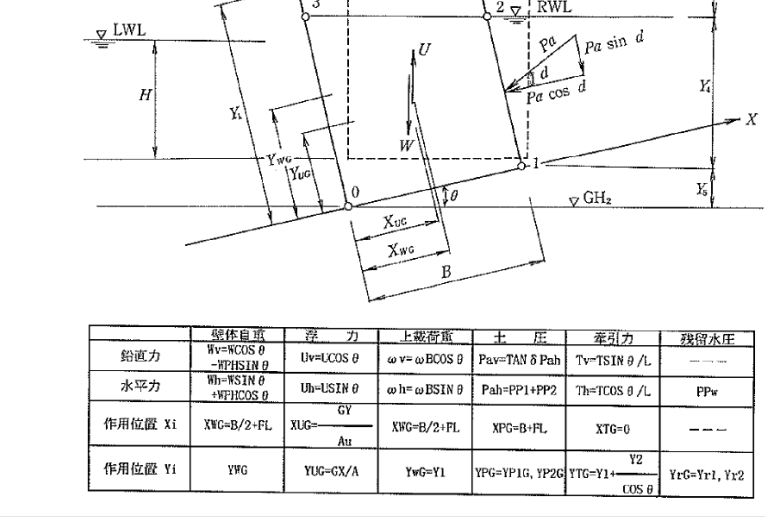
田鶴浜海岸1 NO. 2+20.00



【荷重図】

耐震性能照査

■解析モデル：港湾技術資料 No.912、「被災した係留施設の残存耐力の評価手法の開発」に準じ、被災形態のパラメータとして傾斜角θをもつ、傾斜した底面上に設置された壁体として、通常の安定計算を行った。また、傾斜した多くは滑動、転倒によるものと判断されたため、本検討でも照査指標を「滑動・転倒」として実施した。



全鉛直力
 $\Sigma V = W_v - U_v + \omega v + P_a v - T_v$
全水平力
 $\Sigma H = W_h - U_h + \omega h + P_a h + T_h + P_p w$
転倒モーメント
 $M_d = W_h \cdot Y_{WG} - U_h \cdot Y_{UG} + \omega h \cdot Y_{WG} + P_a h \cdot Y_{PG} + T_h \cdot Y_{TG} + P_p w \cdot Y_{rG}$
抵抗モーメント
 $M_r = W_v \cdot X_{WG} - U_v \cdot X_{UG} + \omega v \cdot X_{WG} + P_a v \cdot X_{PG} + T_v \cdot X_{TG}$
(ここで、 $P_a h \cdot Y_{PG} = P_1 \cdot Y_{P1G} + P_2 \cdot Y_{P2G}$ 、 $P_p w \cdot Y_{rG} = P_{w1} \cdot Y_{r1} + P_{w2} \cdot Y_{r2}$)

①滑動の安全率
$$F_s = \frac{\mu \cdot \Sigma V}{\Sigma H}$$

②転倒の安全率
$$F_r = \frac{M_r}{M_d}$$

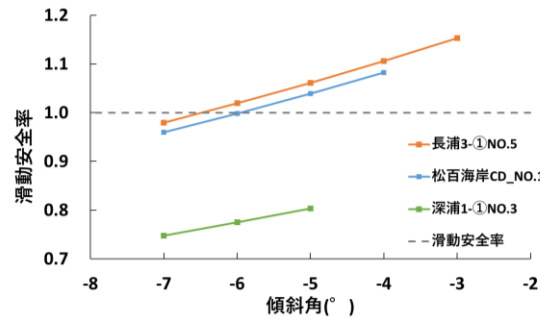
【重力式岸壁安定計算モデル図、外力の釣合式】 出典：「港湾空港技術研究所 資料 No.912 1998 年 09 月」P.16 より

■耐震性能(残存耐力)照査結果：照査結果より、各断面において滑動・転倒で許容安全率を下回る傾斜角を特定した。安全率を満足しない堤防護岸については、要対策と判断した。以上から、傾斜角と安全率の関係により、対策の必要な傾斜角の推定が可能になった。

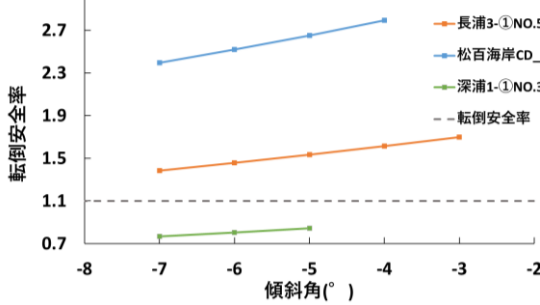
▼中島海岸（長浦 3-①NO.5）

ケースNo	ケース.1	ケース.2	ケース.3	ケース.4	ケース.5
傾斜角	-3度	-4度	-5度	-6度	-7度
断面図					
作用力					
垂直重力 PV	80.16	79.42	78.66	77.87	77.06
土圧 PH	41.71	43.10	44.48	45.85	47.20
転倒モーメント Mr	-36.20	-37.16	-38.11	-39.04	-39.97
抵抗モーメント Mr	61.52	60.01	58.48	56.93	55.36
天端変位	水平変位 mm -82.82	水平変位 mm -84.74	水平変位 mm -86.93	水平変位 mm -89.11	水平変位 mm -91.26
変位	変位 mm -8.42	変位 mm -9.94	変位 mm -11.53	変位 mm -13.20	変位 mm -14.94
照査	許容値 比率 判定	許容値 比率 判定	許容値 比率 判定	許容値 比率 判定	許容値 比率 判定
滑動安全率 F _s	1.15 > 1.00 OK	1.11 > 1.00 OK	1.06 > 1.00 OK	1.02 > 1.00 OK	0.98 < 1.00 NG
転倒安全率 F _r	1.70 > 1.10 OK	1.64 > 1.10 OK	1.58 > 1.10 OK	1.46 > 1.10 OK	1.39 > 1.10 OK
判定	OK	OK	OK	OK	NG

※全 39 断面(244 ケース)のうち、中島海岸（長浦 3-①NO.5）での一覧表を記載。右記グラフでは、その他、石崎海岸（松百海岸 C D_NO.10）、中島海岸（深浦 1-①NO.3）の照査結果を图示。



【滑動安全率における照査結果】



【転倒安全率における照査結果】

まとめ

- ・既往資料による堤防構造と現地での被災状況調査から、護岸の形式・形状ごとの傾斜角を計測し、傾斜した解析モデルでの安定計算を行った。この安定計算は、護岸躯体の「滑動・転倒」に対する安定性確認を目標とし「安全率法」による耐震性能（残存耐力）照査を行った。
- ・全 244 ケースを対象に計算を行い、護岸躯体の形式・形状、傾斜方向（海側か陸側か）別での安全率の傾向を把握することができた。安全率が満足しない場合、対策が必要と判定した。
- ・早期復旧が求められる状況の中で、今回適用した手法により、早急な対策要否、優先度の判断を可能とした。
- ・能登半島地震は、近年、大規模地震を含めレベル 1 地震動の発生が頻発している。今回検討した結果から、今後、地震により傾斜したとしても、堤防護岸の区間ごとに傾斜角度による安定性確認が瞬時に行える。
- ・さらには、地震被害後の迅速な補強要否判定が行えるよう、本データを利活用した自動判定ツールの構築やデータ連携等を行っていくことが考えられる。